СССР
МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, КАНАЛИЗАЦИИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ (ВОДГЕО)

Цена

СПРАВОЧНИК ПО ГИДРОТЕХНИКЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ
Москва—1955

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 1

Раздел первый

ОБЩИЙ

Глава первая

Математика

д-р техн. наук Нестерук Ф. Я.

1–А. ТАБЛИЦЫ

1— 1. Часто встречающиеся величины 5
1— 2. Степени, корни, логарифмы, обратные числа, длины окружностей и площади кругов . . 5
1— 3. Длины дуг, стрелки, длины хорд и площади сегментов для радиуса, равного 1 30
1— 4. Натуральные тригонометрические функции (Синусы, косинусы, тангенсы и котангенсы) . 32
1— 5. Показательные и гиперболические функции 33
1— 6. Таблица полных эллиптических интегралов первого рода 34
1— 7. Эллиптические интегралы первого рода . 36

1–Б. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ

1— 8. Логарифмы 39
1— 9. Площади, объемы и поверхности тел . . 40
1—10. Тригонометрические функции 46
1—11. Плоские треугольники 47
1—12. Конические сечения (кривые второго порядка) 48
1—13. Основные формулы дифференцирования . 49
1—14. Нахождение максимума и минимума . . 50
1—15. Основные формулы интегрирования . . . 51
1—16. Дифференциальные уравнения 52

Глава вторая

Гидравлические расчеты

Кандидаты техн. наук
Латышенков А. М. (разд. А—И), Розанов Н. П. (п. 2—12 и разд. К)

2–А. ГИДРОСТАТИКА

2— 1. Гидростатическое давление в точке . . . 54
2— 2. Давление на плоские фигуры 54
2— 3. Давление на цилиндрические поверхности . 56
2— 4. Плавание тел 57
1. Пловучесть 57
2. Остойчивость 57

Стр.

2–Б. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

2— 5. Малые отверстия в тонкой стенке 58
2— 6. Большие отверстия в тонкой стенке . . . 59
2— 7. Истечение через насадки 59
1. Внешний цилиндрический насадок 59
2. Внутренний цилиндрический насадок . . 59
3. Конические насадки 60
2— 8. Истечение при переменном напоре 60
1. Истечение при постоянном притоке Q_0 . . 60
2. Время опорожнения или наполнения резервуара 60
3. Истечение при переменном напоре под переменный уровень 60
4. Истечение при переменном напоре из непризматических резервуаров 61
5. Опорожнение и наполнение водохранилищ . 62

2–В. ВОДОСЛИВЫ

2— 9. Классификация водосливов 62
2—10. Водосливы с тонкой стенкой 63
1. Прямоугольный водослив 63
2. Треугольный водослив 64
3. Трапецоидальный водослив 64
4. Косой водослив 65
5. Боковой водослив 65
6. Пропорциональный водослив 65
2—11. Безвакуумные водосливы практических профилей 65
1. Очертание водосливной грани безвакуумного криволинейного водослива практического профиля с вертикальной напорной гранью $\alpha = 90°$ 65
2. Пропускная способность водослива 66
3. Учет полноты напора 66
4. Учет ширины гребня 66
5. Учет бокового сжатия 66
6. Учет затопления 67
2—12. Вакуумные водосливы практических профилей 67
1. Очертание вакуумных профилей 67
2. Коэффициенты расхода 68
3. Коэффициенты затопления 69
4. Данные о вакууме 69
2—13. Водослив с широким порогом 70
1. Пропускная способность 70
2. Учет бокового сжатия 71
3. Учет затопления водослива 71
2—14. Водосливы прямоугольной, трапецоидальной и полигональной форм 72

Стр.

1. Прямоугольные водосливы 72
2. Трапецоидальные профили 72
3. Полигональные профили 73

2—Г. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

2—15. Основные расчетные формулы 73
2—16. Гидравлически наивыгоднейшее сечение . . 78
2—17. Гидравлический расчет каналов (типы задач) 79
2—18. Расчет каналов по способу единичных расходных характеристик 79
2—19. Удельная энергия сечения. Критическая глубина потока 82
2—20. Критический уклон 84

2—Д. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

2—21. Типы кривых свободной поверхности в призматическом русле 85
1. Водотоки с прямым уклоном дна ($i>0$) . 85
2. Водотоки с горизонтальным дном ($i=0$) . 86
3. Водотоки с обратным уклоном дна ($i<0$) . 86
2—22. Построение кривых свободной поверхности в призматическом русле при $i>0$ 86
2—23. Построение кривых свободной поверхности в призматических руслах с горизонтальным дном ($i=0$) 89
2—24. Построение кривых свободной поверхности в призматических руслах с обратным уклоном дна ($i<0$) 91
2—25. Построение кривых свободной поверхности в непризматических руслах путем непосредственного суммирования 92
2—26. Интегрирование уравнения неравномерного движения в непризматическом русле при постоянной глубине потока 92
1. Водоток с прямым уклоном дна ($i>0$) . 93
2. Водоток с горизонтальным дном ($i=0$) . 93
3. Водоток с обратным уклоном дна ($i<0$) . 93
2—27. Построение кривых свободной поверхности в естественных водотоках 93
1. Способ непосредственного суммирования . 93
2. Способ постулата неизменяемости модуля сопротивления 94
3. Способ проф. А. Н. Рахманова 95

2—Е. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ И ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ

2—28. Гидравлический прыжок 95
1. Прыжок в условиях плоской задачи . . . 95
2. Прыжок в условиях пространственной задачи 96
2—29. Сопряжение бьефов 96
2—30. Сопряжение бьефов с донным режимом . 97
1. Основные расчетные случаи 97
2. Определение сжатой и сопряженной глубин 98
2—31. Истечение из-под щита 99
1. Незатопленное отверстие 99
2. Затопленное отверстие 100
2—32. Расчет водобойного колодца 100
2—33. Расчет водобойной стенки 102
2—34. Сопряжение бьефов с поверхностным режимом 102

2—Ж. ПЕРЕПАДЫ И БЫСТРОТОКИ

2—35. Одноступенчатый перепад 105
1. Водослив с широким порогом 105

Стр.

2. Водослив практического профиля 105
3. Щелевой перепад 106
2—36. Многоступенчатый перепад 106
1. Перепад без водобойных стенок 106
2. Перепад с водобойными стенками (многоколодезный) 107
2—37. Быстротоки 107
1. Быстроток с постоянной шириной по дну . 107
2. Быстроток с переменной шириной по дну . 108
2—38. Учет аэрации при расчете быстротоков . . 109
2—39. Усиленная шероховатость на быстротоках . 110
2—40. Консольные перепады 112

2—З. ШАХТНЫЕ ВОДОСБРОСЫ

2—41. Расчет входной воронки 115
1. Воронка с плоским гребнем 115
2. Воронка без плоского гребня 116
2—42. Расчет переходного участка шахты, штольни и отводящего туннеля 116
2—43. Подвод воды к воронке 117

2—И. СИФОННЫЕ ВОДОСБРОСЫ

2—44. Виды сифонных водосбросов 118
2—45. Гидравлический расчет сифонного водосброса 119
2—46. Давление в сифонном водосбросе 120

2—К. ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ

2—47. Общие замечания 121
Безнапорные трубы 122
2—48. Короткие незатопленные трубы и отверстия в толстой стенке 122
1. Критерии затопления 122
2. Предельные длины коротких труб . . . 123
3. Предельные длины труб, работающих как отверстие в толстой стенке 124
4. Определение критического уклона 124
5. Общие формулы пропускной способности 124
6. Учет несовершенства сжатия потока . . 124
7. Значения коэффициентов расхода при $i\approx 0$ для коротких труб 124
8. Учет влияния уклона трубы на коэффициент расхода 124
9. Коэффициенты расхода отверстий в толстой стенке 124
10. Графики пропускной способности коротких труб 124
11. Максимальные скорости в трубах 128
12. Расчет отверстий по максимальной допускаемой скорости 128
13. Значения отношений ψ (глубины на выходе из трубы) 129
14. Глубина воды при входе в трубу . . . 129
2—49. Длинные незатопленные трубы 129
1. Предельные длины 129
2. Критерии затопления 130
3. Гидравлический расчет длинных труб . . 130
4. Максимальные скорости и минимальные глубины 131
2—50. Затопленные трубы 131

Трубы с затопленным входом 132

2—51. Критерии, определяющие режим работы трубы 132
1. Трубы с уклоном $i<i_k$ 132

Стр.

2. Влияние предшествующих условий работы трубы 136
3. Трубы с уклоном $i > i_k$ 136
4. Трубы с «самозаряжающимися» оголовками 136
5. Определение «затопляющей» глубины нижнего бьефа 136
6. Дополнительные критерии устойчивости режимов в трубе 137
2—52. Расчет полунапорных труб 138
1. Пропускная способность труб 138
2. Максимальные скорости в трубе 138
2—53. Расчет напорных труб 138
1. Пропускная способность незатопленных труб 138
2. Максимальные скорости при незатопленных трубах 139
3. Пропускная способность затопленных труб 139
Литература 139

Глава третья

Сопротивление материалов

Канд. техн. наук Федоров И. В.

3—1. Растяжение и сжатие (модуль упругости, коэффициент Пуассона и их величины) 140
3—2. Геометрия сечений (площадь, моменты — статический, экваториальный. Центробежный и полярный моменты инерций. Параллельный перенос осей координат. Главные оси инерции, главные моменты инерции, радиус инерции, момент сопротивления. Значения моментов инерции, сопротивления, площади и радиусов инерции плоских фигур) 141
3—3. Изгиб (чистый изгиб, возникновение касательных напряжений, значения нормальных и касательных напряжений, зависимость между нагрузкой, поперечными силами и изгибающим моментом) 142
3—4. Опорные реакции, максимальные изгибающие моменты и прогибы однопролетных балок 148
3—5. Опорные реакции и изгибающие моменты неразрезных балок 157
1. Неразрезная балка на жестких опорах (примеры составления уравнений) 157
2. Неразрезная балка на упругих опорах (примеры составления уравнений) 158
3. Определение усилий в пролетах неразрезной балки 158
4. Опорные реакции, изгибающие моменты в неразрезных балках с равными пролетами 159
3—6. Продольный изгиб (критическое и допускаемое напряжение, значения радиуса инерции и коэффициент φ для наиболее употребительных сечений) 163
3—7. Сдвиг и кручение 167
1. Сдвиг (мера сдвига, модуль сдвига, напряжения) 167
2. Кручение (угол закручивания, напряжения, выраженные в зависимости от деформации и крутящего момента, допускаемые крутящие моменты и напряжения) 167
3—8. Сложное сопротивление 168
1. Косой изгиб 170
2. Изгиб с растяжением и сжатием 170
3. Изгиб с кручением 172
Литература 172

Стр.

Глава четвертая

Строительная механика

Кандидаты техн. наук Строганов А. С. (пп. 1—3), Самарин И. К. (п. 4)

4—1. Фермы 173
1. Общие сведения 173
2. Условия неизменяемости 173
3. Определение усилий в фермах 174
а) При действии постоянной нагрузки . . 174
б) При действии подвижной нагрузки . . 175
4—2. Рамы 178
1. Определение перемещений 178
а) Формула Максвелла—Мора 178
б) Теорема Верещагина 179
2. Метод сил 184
3. Метод деформаций 186
4. Комбинирование метода сил и метода деформаций 196
5. Смешанный метод 196
6. Решения некоторых рамных систем . . . 197
4—3. Плиты 208
1. Общие сведения 208
2. Прямоугольные плиты 208
3. Круглые плиты 223
а) Загрузка по всей площади, свободное опирание 223
б) Частичная загрузка по площади круга диаметром $2b$, свободное опирание . . 223
в) Загрузка по всей площади, заделка . . 224
г) Частичная загрузка по площади круга диаметром $2b$, заделка 224
4. Прочие виды плит 224
4—4. Балки, плиты и рамы на упругом основании 246
1. Балки на упругом основании 246
а) Расчет балок на упругом основании методом теории упругости 246
б) О методах расчета балок на упругом основании по гипотезе коэффициента постели 254
2. Плиты на упругом основании 255
а) Расчет плит по методу проф. Б. Н. Жемочкина 255
б) Расчет абсолютно жестких плит . . . 258
3. Рамы на упругом основании 258
Литература 259

Глава пятая

Расчет осадок гидротехнических сооружений на связных грунтах

Д-р техн. наук Ничипорович А. А., научн. сотрудник Цыбульник Т. И.

5—1. Основные понятия 260
5—2. Исходные расчетные данные 260
1. Необходимые данные для расчета осадок 260
2. Учет снятого бытового давления 260
3. Учет жесткости фундамента 261
4. Классификация расчетных случаев 261
а) Одноразмерная задача 261
б) Плоская двухмерная задача 261
5—3. Основные методы определения напряжений в грунтах 261

Стр.

1. Распределение напряжений в случае пространственной задачи 262
а) Действие сосредоточенной силы . . . 262
б) Действие вертикальной, произвольно распределенной нагрузки 262
2. Распределение напряжений в случае плоской задачи 265
а) Действие сосредоточенной силы . . . 265
б) Действие равномерно распределенной нагрузки 265
в) Действие неравномерной нагрузки, меняющейся по закону треугольника . . . 265
г) Действие нагрузки произвольного вида . 267
3. Определение активной зоны 267
5—4. Методы определения полной осадки . . . 267
1. Непосредственное применение линейной задачи 267
2. Метод суммирования деформаций 268
а) Определение деформации элемента по формуле линейной задачи 268
б) Определение деформации элемента с учетом всех трех компонентов нормальных напряжений (σ_z, σ_y, σ_x) 268
в) Способ ВИОС 268
3. Метод угловых точек 269
4. Метод эквивалентного слоя грунта . . . 269
5. Расчет осадок в случае неоднородных грунтов 270
а) Среднее значение коэффициента уплотнения 270
б) Среднее значение коэффициента пористости 270
в) Среднее значение коэффициента фильтрации 270
6. Общие замечания 271
5—5. Определение осадок во времени 271
1. Общие замечания 271
2. Одноразмерная задача 271
а) Уплотнение слоя грунта с двумя водопроницаемыми поверхностями 271
б) Уплотнение слоя грунта с одной водопроницаемой поверхностью 271
в) Упрощенный метод расчета протекания осадки во времени при различных интенсивностях нарастания нагрузки 272
3. Приближенный способ определения осадок во времени для случая плоской задачи . 273
4. Метод эквивалентного слоя для пространственной задачи 274
Литература 275

Глава шестая

Материалы, применяемые в гидротехническом строительстве

Канд. техн. наук Рождественский Н. А.

6—А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

6— 1. Основные физико-механические свойства материалов 276
6— 2. Определение удельного веса (плотности) жидкостей 277
6— 3. Ориентировочный объемный вес главнейших строительных материалов 277

Стр.

6—Б. СТАЛЬ И ЧУГУН ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ

6— 4. Сталь для конструкций 278
6— 5. Сортаменты фасонной стали 280
1. Уголки равнобокие 280
2. Уголки неравнобокие 283
3. Балки двутавровые 285
4. Швеллер 287
5. Сортамент горячекатанной полосовой стали 289
6. Сортамент стали прокатной широкополосной универсальной 289
7. Сталь прокатная листовая (тонколистовая, толстолистовая, волнистая, рифленая) . 289
8. Сталь квадратная 290
9. Сталь для железобетона 290
10. Проволока стальная 290
11. Сортамент арматуры периодического профиля 290
12. Скобы строительные 291
6— 6. Сталь для шпунтовых свай 291
6— 7. Чугунное литье 292

6—В. ЛЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6— 8. Бревна 292
6— 9. Пиломатериалы 293

6—Г. КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6—10. Естественные каменные материалы 295
6—11. Кирпич гидротехнический 296

6—Д. ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ И БЕТОНОВ

6—12. Портландцементы 296
6—13. Цементы глиноземистые (алюминатные) . 299
6—14. Цементы расширяющиеся 299
6—15. Основные характеристики важнейших цементов 301
6—16. Тонкомолотые добавки 301
6—17. Извести 302
1. Воздушная известь 302
2. Гидравлическая известь 302

6—Е. ЗАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА И РАСТВОРОВ

6—18. Песок и мелкие заполнители 303
1. Основные требования к песку для гидротехнических бетонов и растворов 303
2. Требования к песку для подводного бетонирования методом восходящего раствора . 304
6—19. Крупный заполнитель для бетона 304
1. Гравий природный и щебень 304
2. Определение морозостойкости ($M_{рз}$) крупного заполнителя 305
6—20. Гравийно-песчаные природные смеси для бетона 306
6—21. Вода для приготовления и поливки бетона и установление агрессивности воды — среды по отношению к гидротехническому бетону . . . 306
1. Вода, применяемая для приготовления и поливки бетона 306
2. Установление агрессивности воды — среды по отношению к гидротехническому бетону 306

Стр.

6—Ж. РАСТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ

6—22. Растворы для кладки 309
6—23. Растворы для цементации трещиноватых скальных и гравелистых грунтов, бетонных и каменных кладок 310
6—24. Растворы для глинизации оснований . . 311

6—З. БЕТОН ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ

6—25. Определение, классификация и основные характеристики гидротехнического бетона . . 311
1. Определение и разновидности гидротехнического бетона 311
2. Основные характеристики гидротехнического бетона 311
3. Условные обозначения разновидностей гидротехнического бетона 313
6—26. Назначение состава гидротехнического бетона 313
1. Выбор составляющих для гидротехнического бетона 313
2. Формулы для приближенного определения В/Ц и прочности бетона 315
3. Назначение состава бетона при малых его объемах и для первоначальной ориентировки по таблицам 315
4. Лабораторный подбор состава бетона по способу ЦНИПС 316
5. Состав бетона для подводного бетонирования 317
6—27. Добавки в бетоны и растворы для повышения их подвижности, морозостойкости и долговечности 317
1. Пластифицированные цементы и пластифицирующие добавки концентратов сульфитно-спиртовой барды 317
2. Винсол 318

6—И. БИТУМНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6—28. Битумы и пеки 318
6—29. Рулонные материалы для гидроизоляции . 319
1. Гидроизоляционные рулонные материалы . 319
2. Кровельные рулонные материалы, применяемые для гидроизоляции 319
6—30. Гидроизоляционные мастики 320

6—К. ПРОЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

6—31. Хворостяные и фашинные материалы . . . 320
6—32. Металлические сетки для габионов 320
6—33. Силикат-глыба и растворимое стекло . . 321
6—34. Хлористый кальций 321
6—35. Церезит 321
Литература 322

Глава седьмая

Общие нормы проектирования гидротехнических сооружений

Канд. техн. наук Олешкевич Л. В.

7—1. Классификация гидротехнических сооружений по капитальности 323
7—2. Действующие силы и нагрузки 324
1. Расчетные группы действующих на гидротехнические сооружения сил и нагрузок . 324
2. Собственный вес сооружения 325

Стр.

3. Гидростатическое и гидродинамическое давление воды 325
4. Волновое давление воды 325
5. Давление фильтрационного потока . . . 326
6. Давление льда 328
7. Давление наносов 329
8. Давление ветра и снега 329
9. Сейсмические нагрузки 330
10. Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета проезжей части гидротехнических сооружений под автомобильную дорогу 331
7—3. Расчеты устойчивости гидротехнических сооружений 333
1. Общие указания 333
2. Коэффициенты запаса устойчивости . . . 334
7—4. Допускаемые давления на грунты 334
1. Скальные и полускальные грунты 334
2. Нескальные грунты 335
7—5. Допускаемые скорости течения воды . . . 336
1. Общие указания 336
2. Допускаемые скорости течения воды в гидротехнических сооружениях без искусственных креплений 336
3. Допускаемые скорости течения воды в гидротехнических сооружениях с искусственными креплениями 338
7—6. Транспортирующая способность и незаиляющие скорости течения воды в каналах . . . 340
7—7. Ориентировочные значения коэффициентов трения 341
7—8. Строительные характеристики горных пород 342
Литература 345

Глава восьмая

Общие указания по проектированию деревянных конструкций гидротехнических сооружений

Канд. техн. наук Латышенков А. М.

8—1. Общие данные 346
8—2. Материалы 346
8—3. Допускаемые напряжения 347
8—4. Расчет и конструирование элементов и сопряжений 348
1. Центрально растянутые элементы . . . 348
2. Растяжение и изгиб 349
3. Центрально сжатые цельные элементы . . 349
4. Сжато изогнутые цельные элементы . . . 349
5. Врубки 349
6. Допускаемые прогибы 349
Литература 349

Глава девятая

Общие указания по проектированию стальных конструкций гидротехнических сооружений

Д-р техн. наук Березинский А. Р.

9—1. Материалы 350
9—2. Допускаемые напряжения 350
9—3. Расчет соединений элементов 353
1. Сварные соединения 353
2. Заклепочные и болтовые соединения . . . 354
9—4. Расчет элементов стальных конструкций . . 355

Стр.
1. Центральное растяжение и сжатие . . . 355
2. Внецентренное растяжение и сжатие . . . 355
3. Изгиб . . . 356
4. Допускаемая гибкость . . . 357

Глава десятая

Общие указания по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений

Кандидаты техн. наук Олешкевич Л. В. (пп. 1 и 2) и Розанов Н. П. (пп. 1 и 3)

10—1. Общие данные . . . 358
10—2. Бетонные конструкции . . . 359
1. Общие указания . . . 359
2. Центральное сжатие . . . 360
3. Изгиб . . . 360
4. Внецентренное сжатие . . . 360
5. Указания по конструированию . . . 361
10—3. Железобетонные конструкции . . . 361
1. Общие указания . . . 361
2. Центральное сжатие . . . 362
3. Центральное растяжение . . . 363
4. Изгиб . . . 363
5. Внецентренное сжатие . . . 364
6. Внецентренное растяжение . . . 365
7. Малоармированные конструкции . . . 365
8. Указания по конструированию . . . 365
Литература . . . 366

Раздел второй

ИССЛЕДОВАНИЯ, ИЗЫСКАНИЯ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Глава одиннадцатая

Гидротехнические изыскания и исследования (общие данные)

Д-р техн. наук Близняк Е. В.

11—1. Классификация гидротехнических изысканий и исследований. Состав работ . . . 369
1. Классификация . . . 369
2. Состав работ . . . 369
11—2. Геодезические и топографические работы 370
1. Нивелирование . . . 370
2. Съемка . . . 370
11—3. Промерные работы . . . 371
1. Приборы . . . 371
2. Расположение промерных профилей . . . 371
Литература . . . 371

Глава двенадцатая

Гидрологические (гидрометрические) работы

Научн. сотр. Бочков Н. М.

Стр.
12—1. Общие данные . . . 372
12—2. Наблюдения над уровнями . . . 372
12—3. Определение расходов воды . . . 372
1. Вертушечный способ . . . 372
2. Поплавковый способ . . . 373
3. Объемный способ . . . 373
4. Способ смешения . . . 373
12—4. Кривая расходов . . . 373
1. Случай неустойчивого или заросшего русла 373
2. Верхняя часть кривой . . . 373
3. Кривая расходов зимнего времени . . . 373
12—5. Среднесуточные и среднемесячные расходы. Сток . . . 374
1. Среднесуточные и среднемесячные расходы 374
2. Сток . . . 374
12—6. Расходы наносов . . . 374
1. Определение расхода взвешенных наносов 374
2. Определения расхода донных наносов . . . 374
3. Определение расхода растворенных наносов 375
12—7. Основные отчетные документы . . . 375
Литература . . . 375

Глава тринадцатая

Гидрологические расчеты

Научн. сотр. Бочков Н. М.

13— 1. Общие указания . . . 376
13— 2. Водный баланс . . . 376
13— 3. Осадки и испарение . . . 376
1. Осадки . . . 376
2. Испарение . . . 379
13— 4. Сток . . . 381
1. Средний многолетний сток . . . 381
2. Кривые обеспеченности . . . 381
3. Колебания годового стока . . . 385
13— 5. Внутригодовое распределение стока . . . 385
13— 6. Максимальные расходы . . . 387
1. Основные положения . . . 387
2. Вычисление максимальных половодных расходов . . . 389
3. Вычисление максимальных дождевых расходов . . . 389
13— 7. Минимальные расходы . . . 400
13— 8. Зимний режим . . . 400
13—9. Сток наносов . . . 400
13—10. Основные отчетные документы . . . 405
1. Программа гидрологической характеристики 405
2. Программа гидрологического очерка . . . 405
3. Основные графические приложения к запискам . . . 405
Литература . . . 405

Глава четырнадцатая

Инженерно-геологические изыскания

Д-р геолого-минералогич. наук Семенов М. П., канд. техн. наук Бочевер Ф. М.

14-А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

14—1. Назначение инженерно-геологических изысканий . . . 406
14—2. Основные геологические и инженерно-геологические понятия и определения . . . 406
1. Схема стратиграфического деления земной коры . . . 406
2. Схема деления горных пород по генетическим признакам . . . 409
3. Основные типы тектонических движений земной коры . . . 410

Стр.

4. Виды нарушений в залегании горных пород (дислокации) 410
5. Ориентировочная схема разделения горных пород по инженерно-геологическим признакам 410
6. Классификация подземных вод 411
7. Физико-геологические явления 412

14—Б. СОСТАВ И МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

14— 3. Подготовительные работы 413
14— 4. Инженерно-геологическая съемка 413
14— 5. Разведочные работы 413
14— 6. Геофизические работы 415
14— 7. Гидрогеологические работы 416
1. Изучение режима подземных вод 416
2. Опытные откачки 416
3. Опытные нагнетания 423
4. Наливы воды в шурфы 424
5. Определение скорости движения подземных вод в порах и трещинах горных пород . 424
14— 8. Полевые испытания физико-механических свойств грунтов 425
1. Пробные нагрузки штампом 425
2. Испытания на сопротивления грунтов сдвигу 426
14— 9. Лабораторные исследования 426
14—10. Поиски и разведка строительных материалов 428

14—В. ОСНОВНЫЕ ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

14—11. Общие замечания 429
14—12. Отчетные документы к технико-экономическому докладу (ТЭД) 430
1. Общая часть 430
2. Специальная часть 430
14—13. Отчетные документы к проектному заданию 430
14—14. Отчетные документы к техническому проекту 431
Литература 431

Глава пятнадцатая

Физико-механические свойства грунтов

Кандидаты техн. наук Истомина В. С. (пп. 1—12) и Мигин С. И. (пп. 8, 13, 14)

15— 1. Гранулометрический состав грунтов . . 432
15— 2. Удельный вес 433
15— 3. Объемный вес и пористость 433
15— 4. Степень плотности 434
15— 5. Влажность 435
15— 6. Границы пластичности и консистенция грунтов 435
1. Граница текучести 435
2. Граница раскатывания 435
3. Число пластичности 435
4. Консистенция грунтов 435
5. Максимальная молекулярная влагоемкость 435
15— 7. Коэффициент фильтрации 436
15— 8. Сопротивление грунтов сдвигу 437
15— 9. Сопротивляемость грунтов разрыву . . . 439
15—10. Коэффициент уплотнения 439
15—11. Коэффициент бокового давления 440
15—12. Модуль деформации 441
15—13. Перечень основных грунтовых характеристик 441

Стр.

15—14. Ориентировочный перечень основных грунтовых характеристик, определяемых опытным путем при проектировании гидросооружений . 442
Литература 442

Раздел третий

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Глава шестнадцатая

Водохранилища

Инж. Шиммельмиц И. Я.

16—1. Типы водохранилищ и их основные характеристики 445
1. Типы водохранилищ 445
2. Назначение водохранилищ 445
3. Кривые площадей и объемов водохранилищ 445
4. Характерные уровни и емкости водохранилища 447
16—2. Гидрологический режим водохранилищ . . 447
1. Потери воды из водохранилища 447
2. Уровни воды в верхнем бьефе водохранилища 449
3. Заиление водохранилищ 450
4. Мертвый объем водохранилища 450
5. Размыв русла в нижнем бьефе водохранилища 450
6. Термический и ледовый режим водохранилищ 451
7. Солевой режим воды в водохранилище . . 452
16—3. Организация водохранилищ 452
1. Затопления и их последствия 452
2. Исследования и проектные работы по организации водохранилищ 453
3. Подготовительные мероприятия для ввода водохранилища в эксплуатацию 454
16—4. Водохозяйственные расчеты (задачи и исходные данные) 454
1. Задачи водохозяйственных расчетов . . . 454
2. Виды регулирования стока 454
3. Требования водопользователей 456
4. Расчетная обеспеченность 456
5. Исходные гидрологические данные 457
6. Выбор расчетного гидрологического ряда или характерных лет 457
16—5. Методы водохозяйственных расчетов . . . 458
1. Основные положения водохозяйственных расчетов 458
2. Методы водохозяйственных расчетов . . . 458
3. Регулирование стока на постоянную отдачу 459
4. Регулирование стока на переменную отдачу 465
5. Регулирование половодий и паводков . . 467
16—6. Водоэнергетические расчеты 468
1. Основные зависимости и положения . . . 468
2. Режим работы водохранилища 469
3. Суточное регулирование 471
Литература 473

Глава семнадцатая

Общие данные для проектирования плотин

Канд. техн. наук Олешкевич Л. В.

17—1. Классификация плотин 474
17—2. Инженерно-геологическая классификация поперечных створов речных долин 474

Стр.

17—3. Общие требования к основаниям плотин и выбор типа плотины 474
1. Требования к скальным основаниям . . . 474
2. Требования к нескальным основаниям . . 474
3. Соображения по выбору типа плотины . . 474
17—4. Расчет водосбросных отверстий плотин . . 474
1. Расчетная вероятность паводков и определение расчетного расхода 477
2. Основные условия пропуска паводков через водосбросные отверстия 477
3. Основные принципы назначения размеров водосбросных отверстий 477
а) Общие соображения 477
б) Стандартизация размеров отверстий . . 478
в) Учет рода грунта основания (выбор удельного расхода) и условий гашения энергии в нижнем бьефе (расчетная схема эксплуатации) 478
г) Учет пропуска наносов 480
д) Учет ледовых условий 480
е) Учет условий судоходства 480
17—5. Превышение гребня глухой плотины над горизонтом воды верхнего бьефа 480
17—6. Нормы габаритов приближения конструкций для мостов на автомобильных дорогах 481
1. Область применения 481
2. Габариты и правила применения 481
Литература 482

Глава восемнадцатая

Фильтрационные расчеты

Кандидаты техн. наук Недрига В. П. (пп. 1—12), Истомина В. С. (пп. 11, 15), канд. геолого-минералогич. наук Биндеман Н. Н. (пп. 12, 13, 14), инж. Романов А. В. (пп. 1—10)

18— 1. Общие сведения о фильтрационных расчетах 483
1. Основные цели и назначения фильтрационных расчетов 483
2. Основные положения теории фильтрации . 483
18— 2. Указания о выборе и назначении противофильтрационных устройств 484
1. Понуры 484
2. Шпунтовые стенки, завесы и зубья . . . 484
3. Дренажи 484
4. Сопряжение плотин с берегами и дамбами 485
18— 3. Гидромеханический метод расчета напорной фильтрации в основании гидротехнических сооружений 485
1. Одиночный водонепроницаемый шпунт при безграничной мощности проницаемого основания 485
2. Одиночный водонепроницаемый шпунт при ограниченной мощности проницаемого основания 486
3. Плоский флютбет без шпунтов при неограниченной мощности проницаемого основания 486
4. Плоский флютбет без шпунтов при ограниченной мощности проницаемого основания 486
5. Флютбет, заглубленный при неограниченной мощности проницаемого основания . . . 489
6. Плоский флютбет с одним водонепроницаемым шпунтом при неограниченной мощности проницаемого основания 489
7. Плоский флютбет с полукруглой дренажной траншеей при бесконечной мощности проницаемого основания 490
8. Флютбет с плоским дренажем при бесконечной мощности проницаемого основания 490
18— 4. Фрагментный метод расчета фильтрации в основании гидротехнических сооружений . . . 491
1. Флютбет с водонепроницаемыми шпунтами при ограниченной мощности проницаемого основания 491
2. Флютбет с водопроницаемыми шпунтами при ограниченной мощности проницаемого основания 498
а) Флютбет со шпунтом, доведенным до водоупора 498
б) Флютбет с водопроницаемым шпунтом, не доведенным до водоупора 498
3. Флютбет с дренажем при ограниченной мощности проницаемого основания 500
а) Общие сведения 500
б) Флютбет с горизонтальной дреной . . 501
в) Флютбет с одним рядом совершенных колодцев 502
г) Флютбет с дренажем в виде ряда несовершенных колодцев 504
18— 5. Графический метод расчета фильтрации в основании гидротехнических сооружений . . . 505
1. Построение сетки 505
2. Вычисление элементов потока по гидродинамической сетке 506
3. Случай анизотропных грунтов в основании 506
18— 6. Приближенный метод определения фильтрационного давления на флютбет 506
18— 7. Расчет безнапорной фильтрации в обход гидротехнических сооружений на участке сопряжений их с берегами при условии наличия горизонтального подстилающего водоупора . . . 507
1. Общие указания 507
2. Одиночная шпора 507
3. Плоский устой 508
4. Устой с одной произвольно расположенной шпорой 510
18— 8. Расчет напорной фильтрации в обход гидротехнических сооружений 511
18— 9. Обходная фильтрация в условиях отсутствия берегового грунтового потока 511
18—10. Расчет обходной фильтрации при сопряжении плотин с земляными дамбами, расположенными на горизонтальном водоупоре . . . 512
1. Метод расчета 512
2. Фрагмент устоя с двумя шпорами типа I . 512
3. Фрагменты типов II, III и IV 513
4. Фрагмент типа V 513
5. Глубина потока на границах смежных фрагментов 514
18—11. Фильтрация в земляных плотинах . . . 514
1. Перемычка из однородного грунта с вертикальными откосами на водонепроницаемом основании 514
2. Плотина из однородного грунта на водонепроницаемом основании при отсутствии воды в нижнем бьефе 517
3. Плотина из однородного грунта на водонепроницаемом основании при наличии воды в нижнем бьефе 518
4. Плотина с экраном и дренажной призмой на водонепроницаемом основании 519
5. Плотина с ядром (или проницаемым шпунтом) на водонепроницаемом основании . . 519

Стр.

6. Плотина смешанного типа на водонепроницаемом основании 520
7. Плотина из однородного грунта на проницаемом основании бесконечной мощности при отсутствии воды в нижнем бьефе . . 521
8. Плотина с экраном и понуром на проницаемом основании конечной мощности . . 522
9. Плотина на проницаемом основании конечной мощности с экраном и зубом . . . 523
10. Плотины любого типа на проницаемом основании конечной и бесконечной мощности 523

18—12. Полунапорная фильтрация под сооружениями 524
18—13. Расчет фильтрационных потерь из водохранилищ 525
1. Постоянные потери воды из водохранилища 525
2. Временные фильтрационные потери из водохранилища 527
18—14. Расчет подпора грунтовых вод 527
1. Расчет подпора при установившемся движении подземных вод 527
2. Формирование подпора во времени . . . 527
18—15. Фильтрационная устойчивость нескальных грунтов 530
1. Общие замечания 530
2. Устойчивость несвязных грунтов 530
3. Устойчивость связных грунтов 531
4. Подбор обратных фильтров дренажей . . 532
Литература 535

Глава девятнадцатая

Бетонные гравитационные плотины

Канд. техн. наук Олешкевич Л. В.

19— 1. Классификация 536

19—А. ГЛУХИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ

(На скальных основаниях)

19— 2. Очертание плотины в профиле 537
1. Очертание профиля 537
2. Предварительное определение размеров плотины 537
19— 3. Определение вертикальных нормальных напряжений в горизонтальных расчетных швах плотины 538
1. Ход расчета 538
2. Нормальные краевые вертикальные напряжения 538
3. Условия расчета 538
4. Расчетные случаи 538
19— 4. Определение главных напряжений на гранях плотины 539
1. Определение горизонтальных нормальных и скалывающих напряжений 539
2. Определение главных напряжений . . . 539
19— 5. Поверка устойчивости гравитационной плотины на скальном грунте на сдвиг 540
1. Поверка устойчивости плотины на сдвиг с учетом только сил трения 540
2. Учет сил сцепления кладки тела плотины со скалой основания 540
3. Случай наклонного основания плотины . . 540
19— 6. Противофильтрационные завесы в основании плотин и в берегах 541
1. Общие замечания 541

Стр.

2. Цементационные противофильтрационные завесы в основании плотин и в берегах . . 541
3. Битумизация оснований плотин 543
4. Глинизационные завесы 543
19— 7. Подготовка скальных оснований плотин . 544
19— 8. Дренаж основания и тела плотин . . . 545
19— 9. Конструктивные швы в гравитационных плотинах 545
19—10. Облицовка поверхности плотины 546
19—11. Конструкция и размеры гребня плотины . 547
19—12. Общие требования к бетону и размещение бетона различных марок по профилю . . 547
19—13. Разбивка на блоки кладки тела плотины . 547

19—Б. ВОДОСЛИВНЫЕ БЕТОННЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПЛОТИНЫ НА СКАЛЬНЫХ И НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

19—14. Расчет прочности тела гравитационной водосливной бетонной плотины на скальном грунте 548
19—15. Определение напряжений в грунте основания под плотиной 549
1. Общие соображения 549
2. Определение напряжений в грунте основания для случая жесткого сооружения . . 549
19—16. Расчет устойчивости гравитационных водосливных плотин на скальном и нескальном основании 550
1. Расчетные случаи 550
2. Устойчивость водосливной бетонной плотины на скальном основании 550
3. Поверка устойчивости на сдвиг бетонных гравитационных плотин на нескальном основании 550
19—17. Конструкция тела гравитационных бетонных плотин на нескальных грунтах элементов их флютбета 556
1. Общие соображения 556
2. Ориентировочные размеры флютбета плотины 556
3. Понуры 556
4. Шпунты 557
5. Силикатизационные завесы 558
6. Тело плотины (водослив) 558
7. Водобой плотины и гасители энергии . . 561
8. Рисберма 563
19—18. Быки водосливных гравитационных бетонных плотин 565
1. Конструкции быков 565
2. Статические расчеты быков 565
19—19. Сопряжения водосливных частей бетонных плотин с глухими частями и с берегами (сопрягающие и береговые устои) 568
1. Конструкция устоев 568
2. Статический расчет устоев 568
Литература 569

Глава двадцатая

Железобетонные и бетонные контрфорсные плотины

Канд. техн. наук Розанов Н. П.

20— 1. Типы и конструкции контрфорсных плотин 570
1. Классификация 570
2. Напорные перекрытия 572
3. Водосливные плиты 573

Стр.

4. Фундаментные плиты 574
5. Контрфорсы 574
6. Элементы жесткости 575
20— 2. Предварительное определение основных размеров элементов и технико-экономических показателей контрфорсных плотин 576
1. Плоские напорные плиты 576
2. Водосливные плиты 576
3. Фундаментные плиты 576
4. Арочные перекрытия 576
5. Консольные оголовки контрфорсов . . . 576
6. Контрфорсы 577
7. Определение некоторых технико-экономических показателей 578
20— 3. Расчет контрфорсных плотин 579
1. Расчет напорных перекрытий 579
2. Расчет водосливных плит 580
3. Расчет контрфорсов на прочность 580
4. Расчет контрфорсов на устойчивость (при продольном изгибе) 583
5. Расчет фундаментных плит 584
6. Расчет контрфорсных плотин на сдвиг . . 584
7. Приближенные расчеты контрфорсных плотин на боковой сейсм 585
8. Тепловой расчет полостей 587
20— 4. Выбор типа и конструкции контрфорсной плотины и общие указания по проектированию 589
1. Основные предпосылки 589
2. Плотины с плоскими напорными перекрытиями 591
3. Многоарочные плотины 591
4. Массивно-контрфорсные плотины 591
5. Плотины прочих типов 591
20—5. Плотины системы А. М. Сенкова 592
Литература 592

Глава двадцать первая

Деревянные плотины

Канд. техн. наук Латышенков А. М.

21— 1. Типы деревянных плотин 593
1. Основные части деревянных плотин . . . 593
2. Классификация деревянных плотин . . . 593
21— 2. Флютбеты деревянных плотин низкого напора 593
1. Свайные флютбеты 593
2. Свайно-ряжевые флютбеты 595
3. Ряжевые флютбеты 597
21— 3. Флютбеты плотин повышенного напора . 597
1. Контрфорсные флютбеты 597
2. Вертикально-ряжевые флютбеты 598
3. Наклонно-ряжевые флютбеты 598
21— 4. Устои деревянных плотин 599
1. Ряжевые устои 599
2. Свайно-обшивные устои 601
3. Контрфорсные устои 601
21— 5. Устройство отверстий деревянных плотин . 602
1. Быки 602
2. Контрфорсы 602
3. Стойки 603
4. Поворотные фермы 604
5. Затворы и подъемники 604
6. Мосты 605
21— 6. Нагрузки, действующие на части деревянных плотин 606

Стр.

21— 7. Фильтрационный расчет флютбета деревянных плотин 606
21— 8. Расчет элементов деревянных плотин . . 606
1. Расчет плоских затворов, полов и стоек . . 606
2. Расчет ряжей 608
3. Расчет ворота 610
21— 9. Расчет свай и шпунтов 611
1. Расчет одиночных свай на вертикальные нагрузки 611
2. Расчет свай и шпунтов на горизонтальные нагрузки 613
21—10. Область применения отдельных типов деревянных плотин 618
1. Общие соображения 618
2. Свайные плотины 618
3. Свайно-ряжевые плотины 618
4. Ряжевые плотины 618
21—11. Расчетные таблицы 619
1. Моменты сопротивления W сечений бревен, лежней и пластин в $см^3$ 619
2. Объемы 1 *пог. м* бревен, пластин и лежней (без учета конусности) в $м^3$ 620
Литература 620

Глава двадцать вторая

Земляные плотины

Д-р техн. наук Ничипорович А. А., канд. техн. наук Истомина В. С.

22—1. Классификация земляных плотин 621
22—2. Грунты для земляных плотин 621
22—3. Общие положения, применяемые при проектировании профиля земляных плотин . . . 622
22—4. Фильтрация в земляных плотинах . . . 624
22—5. Расчеты устойчивости земляных плотин . . 624
1. Расчет устойчивости откосов 624
2. Расчет устойчивости наружных призм намывных и полунамывных плотин 627
3. Расчет устойчивости экрана и защитного слоя 628
4. Коэффициенты запаса при расчетах устойчивости земляных плотин 629
5. Расчет устойчивости низового откоса на оплывание в месте выхода фильтрационного потока на поверхность 629
22—6. Конструирование и назначение размеров отдельных элементов земляной плотины . . . 629
1. Крепление гребня 629
2. Крепление откосов 630
3. Ядра и диафрагмы 631
4. Экраны и понуры 632
5. Дренажные устройства 633
6. Сопряжение земляной плотины с основанием и берегами 636
7. Сопряжение земляной плотины в плане с сооружениями из других материалов . . . 636
22—7. Выбор плотности и влажности глинистого грунта для тела насыпных земляных плотин . . 636
22—8. Раскладка фракций грунта в отдельных частях намывной плотины с ядром 636
22—9. Выбор типа и способа возведения земляной плотины 638

Стр.

Литература 640

Глава двадцать третья

Плотины из каменной наброски

Кандидаты техн. наук Мигин С. И. (пп. 1, 2, 6, 7, 8, 9), Хрусталев Н. Я. (пп. 3, 4, 5)

23—1. Типы плотин из камня и условия их возведения 641
1. Классификация 641
2. Условия применения и выбор типа набросных плотин 642
23—2. Требования к камню, каменной наброске и кладке 642
1. Требования к камню 642
2. Требования к каменной наброске и кладке 643
3. Высота сбрасывания камня при наброске . 643
4. Виды наброски камня по способу уплотнения 643
23—3. Устойчивость набросных плотин, их откосов и основания 643
1. Расчеты устойчивости плотины на сдвиг . 644
2. Поверка устойчивости основания плотины на выпирание 644
3. Заложение откосов и ширина по гребню . 644
23—4. Противофильтрационные устройства плотин из каменной наброски 644
1. Экраны 645
2. Диафрагмы 649
23—5. Сопряжение тела набросных плотин с основанием и дренажные устройства 649
1. Конструкция сопряжений 649
2. Дренаж 649
23—6. Плотины из сухой каменной кладки и полунабросные 649
1. Плотины из сухой каменной кладки . . . 649
2. Полунабросные плотины 650
23—7. Плотины смешанные 650
23—8. Пропуск воды через набросные плотины . 650
1. Перелив воды через наброску 650
2. Наброска камня в текущую воду 651
23—9. Преимущества и недостатки плотин из каменной наброски 655
Литература 655

Глава двадцать четвертая

Подпорные стенки

Канд. техн. наук Мейстер В. А.

24—1. Классификация 656
24—2. Конструкция подпорных стенок 657
1. Конструктивные характеристики 657
2. Конструктивные элементы 658
3. Сопряжение подпорных стенок с основанием 658
4. Дренажные мероприятия 659
5. Основные указания по выбору материала и конструкции подпорных стенок 659
6. Выбор материала засыпок 659
24—3. Расчет подпорных стенок 660
1. Общие положения 660
2. Силы, действующие на подпорную стенку . 660
3. Расчет жестких подпорных стенок 660

Стр.

4. Определение распора (активного давления) грунта 660
5. Определение отпора (пассивного давления) грунта 663
6. Расчет шпунтовых стенок 663
7. Расчет анкерных подпорных стенок . . . 664
Литература 665

Глава двадцать пятая

Водосбросы и водоспуски гидроузлов

Д-р техн. наук Ничипорович А. А.

25 — А. ВОДОСБРОСЫ

25—1. Типы водосбросов 666
1. Классификация 666
2. Водосбросы береговые открытые 669
3. Водосбросы береговые закрытые 670
25—2. Расчеты водосбросов 670
1. Гидравлические расчеты 670
2. Фильтрационные расчеты 670
3. Статические расчеты 671
25—3. Конструкции водосбросов 671
25—4. Выбор типа водосбросов 674

25—Б. ВОДОСПУСКИ

25—5. Типы водоспусков 675
1. Классификация 675
2. Трубчатые водоспуски 676
3. Туннельные водоспуски 679
4. Открытые водоспуски 679
25—6. Расчеты водоспусков 679
1. Гидравлические расчеты 679
2. Фильтрационные расчеты 680
3. Статические расчеты 680
25—7. Конструкции водоспусков 681
25—8. Выбор типа водоспусков 682
Литература 682

Глава двадцать шестая

Затворы

Д-р техн. наук Березинский А. Р.

26— 1. Общие сведения 683
1. Понятие о затворе 683
2. Классификация затворов 683
3. Указания по проектированию 683

26—А. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАТВОРЫ

26— 2. Плоские затворы 684
1. Область применения 684
2. Типы затворов 685
3. Конструкция затворов 686
4. Определение собственного веса и подъемного усилия 688
5. Подъемный механизм 688
26— 3. Сегментные затворы 689
1. Область применения 689
2. Типы затворов 689
3. Конструкция затворов 689
4. Определение собственного веса и подъемного усилия 690
5. Подъемный механизм 691

Стр.

26— 4. Вальцовые затворы 692
1. Область применения 692
2. Типы затворов 692
3. Конструкция затворов 692
4. Определение собственного веса и подъемного усилия 693
5. Подъемный механизм 694
26— 5. Крышевидные затворы 694
1. Область применения 694
2. Типы затворов 694
3. Условия подъема и опускания затворов . 694
4. Конструкция затворов 696
5. Управление движением 696
26— 6. Секторные затворы 696
1. Область применения 696
2. Типы затворов 696
3. Условия подъема и опускания затворов . 697
4. Конструкция затворов 698
5. Управление движением 699
26— 7. Клапанные затворы 699
1. Область применения 699
2. Клапанные затворы с механическим приводом 699
3. Клапанные автоматические уравновешенные затворы 700
26— 8. Стоечно-плоские затворы 700
26— 9. Поворотные фермы со щитками и спицами 701
26—10. Аварийные, ремонтные и строительные затворы 702

26—Б. ГЛУБИННЫЕ ЗАТВОРЫ

26—11. Условия работы затворов глубинных отверстий 703
26—12. Плоские глубинные затворы 703
26—13. Сегментные затворы 704
26—14. Вертикальные цилиндрические затворы . . 705
26—15. Дисковые затворы 707
26—16. Игольчатые затворы 707
26—17. Выбор типа глубинного затвора 708
Литература 708

Глава двадцать седьмая

Каналы

Канд. техн. наук Хрусталев Н. Я.

27—1. Назначение и условия работы каналов . . 709
27—2. Форма и размеры поперечного сечения каналов 709
1. Форма поперечного сечения каналов . . . 709
2. Выбор заложения откосов 710
27—3. Выбор расчетных скоростей 710
1. Общие указания 710
2. Незаиляющие скорости 710
3. Ограничение скорости течения по условиям зимнего режима 711
4. Выбор скоростей в энергетических каналах 712
5. Скорости в оросительных каналах 713
6. Скорости в судоходных каналах 713
27—4. Расчет каналов на фильтрацию 713
27—5. Одежды и облицовки каналов 715
1. Основные типы одежд и облицовок . . . 715
2. Каменная наброска и каменные мостовые . 715
3. Бетонные и железобетонные одежды . . . 715
4. Торкретирование 717
5. Облицовки из асфальтовых и битумных материалов 717

Стр.

6. Глиняное уплотнение 718
7. Кольматаж 718
8. Нефтяные одежды 718
9. Способ искусственного солонцевания грунтов 718
10. Биологические способы уменьшения водопроницаемости грунтов 718
11. Механическое уплотнение 718
12. Дренаж облицовки 719
27—6. Условия применения облицовок разного типа 719
27—7. Основные требования к трассе каналов . . 720
Литература 720

Глава двадцать восьмая

Сооружения на каналах

Канд. техн. наук Розанов Н. П.

28—1. Классификация сооружений на каналах . 721
28—2. Мосты-водоводы и селепроводы 721
1. Типы мостов-водоводов (акведуков) и селепроводов 721
2. Конструктивные особенности мосто-водоводов 722
3. Конструктивные особенности селепроводов 724
4. Сборные железобетонные конструкции . . 725
5. Указания по статическому расчету 725
6. Указания по гидравлическому расчету . . 725
28—3. Дюкеры 726
1. Типы дюкеров 726
2. Применение сборных конструкций 727
3. Элементы конструкций дюкеров 728
4. Указания по статическому расчету . . . 729
5. Указания по гидравлическому расчету . . 729
28—4. Трубы под насыпями 730
1. Типы труб 730
2. Применение сборных железобетонных конструкций 731
3. Элементы конструкций труб 732
4. Указания по статическому расчету 734
5. Указания по гидравлическому расчету . . 735
28—5. Выбор типа водопроводящих сооружений . 736
Литература 736

Глава двадцать девятая

Напорные трубопроводы

Канд. техн. наук Киракосов В. П.

29—1. Типы и конструкции трубопроводов . . . 737
1. Типы трубопроводов и пределы их применения 737
2. Наивыгоднейший диаметр трубопровода . 737
3. Устройства на трубопроводах 737
4. Конструкции трубопроводов и их опор . . 738
29—2. Гидравлические расчеты трубопроводов . . 741
1. Потери напора на трение 741
2. Местные потери напора 742
3. Гидравлический удар 742
29—3. Статические расчеты металлического трубопровода и его опор 745
1. Силы, действующие на трубопровод и его опоры 745
2. Расчет трубопровода 748
3. Расчет опор 748
29—4. Статические расчеты деревянного трубопровода и его опор 751

Стр.
1. Силы, действующие на трубопровод и его опоры . . . 751
2. Расчет трубопровода . . . 752
3. Расчет опор . . . 753
29—5. Статические расчеты железобетонного трубопровода . . . 753
1. Силы, действующие на трубопровод . . . 753
2. Расчет трубопровода . . . 753
29—6. Расчет температурного режима трубопроводов . . . 756
1. Теплопередача через стенки трубопровода, теплоизоляцию и грунт . . . 756
2. Теплоотдача от наружной поверхности надземного трубопровода или теплоизоляции — воздуху . . . 756
3. Расчет температуры воды, текущей в трубопроводе . . . 756
4. Замерзание воды в трубопроводе при отсутствии течения . . . 756
5. Термические константы теплоизоляционных материалов и грунтов . . . 756
Литература . . . 757

Глава тридцатая

Водоприемники

Инж. Саверин Н. А.

30—А. ВОДОПРИЕМНИКИ С ОТКРЫТЫМ ВОДОЗАБОРОМ

30—1. Общие требования к водоприемнику с открытым водозабором . . . 758
1. Классификация открытых водоприемников 758
2. Требования к водоприемнику . . . 758
3. Выбор типа водоприемника . . . 759
4. Компоновка водоприемника в составе головного узла . . . 759
30—2. Мероприятия по борьбе с наносами, шугой и плавающими телами . . . 761
1. Общие указания . . . 761
2. Бесплотинные водоприемники . . . 761
3. Плотинные водоприемники . . . 762
4. Мероприятия по борьбе с шугой . . . 763
5. Мероприятия по борьбе с сором и плавающими телами . . . 763
30—3. Конструкции открытых водоприемников . . 764
1. Влияние условий работы водоприемников на их конструкцию . . . 764
2. Материал конструкции открытых водоприемников . . . 764
3. Оптимальные конструкции открытых водоприемников с точки зрения статической работы их в различных условиях . . . 764
4. Элементы открытых водоприемников . . . 764
30—4. Особые конструкции водоприемников . . 767
1. Горный водозабор . . . 767
2. Водоприемники в быках и устоях плотины 769
30—5. Расчеты открытых водоприемников . . . 770
1. Общие соображения . . . 770
2. Расчет отверстий открытых водоприемников 770
3. Расчет гашения энергии в нижнем бьефе водоприемника . . . 772
4. Расчет промывных галерей . . . 772
5. Расчет горного водозабора . . . 774

30—Б. ВОДОПРИЕМНИКИ С ГЛУБИННЫМ ВОДОЗАБОРОМ

30—6. Общие требования к глубинным водоприемникам и условия их работы . . . 774
30—7. Конструкции глубинных водоприемников . 775
Стр.
1. Шахтный береговой водоприемник . . . 775
2. Башенный водоприемник . . . 775
30—8. Расчеты глубинных водоприемников . . . 776
1. Состав расчетов глубинных водоприемников 776
2. Расчет береговых водоприемников . . . 776
3. Расчет башенных водоприемников . . . 779
Литература . . . 779

Глава тридцать первая

Отстойники

Инж. Саверин Н. А.

31—1. Общие требования к отстойникам . . . 780
1. Назначение отстойников и условия их применения . . . 780
2. Элементы отстойников . . . 780
3. Классификация отстойников . . . 781
31—2. Выбор типа и местоположения отстойника 781
1. Условия эффективности работы отстойников 781
2. Выбор типа отстойника . . . 781
3. Выбор местоположения отстойника . . . 783
31—3. Конструкции отстойников . . . 784
1. Многокамерные отстойники . . . 784
2. Конструкции элементов многокамерных отстойников . . . 784
3. Однокамерные отстойники с непрерывным промывом . . . 785
4. Отстойники с механической очисткой наносов . . . 785
5. Мероприятия по созданию равномерных скоростей в камерах отстойников . . . 786
6. Гидромеханическое оборудование отстойников . . . 786
31—4. Расчет отстойников . . . 788
1. Определение основных размеров отстойников 788
2. Расчет времени заиления аккумулирующего объема отстойников . . . 789
31—5. Промыв наносов и пропуск шуги в отстойниках . . . 792
1. Промыв наносов в отстойниках периодического действия . . . 792
2. Промыв наносов в отстойниках непрерывного действия . . . 793
3. Пропуск шуги в отстойниках . . . 793
Литература . . . 794

Глава тридцать вторая

Судоходные шлюзы как элемент гидроузлов

Д-р техн. наук Джунковский Н. Н.

32—1. Определения основных элементов . . . 795
1. Элементы шлюза . . . 795
2. Процесс шлюзования . . . 795
32—2. Классификация и типы судоходных шлюзов 796
1. Число и расположение камер . . . 796
2. Типы камер . . . 797
3. Способы питания водой и типы водопроводных устройств . . . 799
4. Классификация по основному материалу . 801
5. Классификация по основным конструктивным признакам . . . 801
32—3. Определение основных габаритов шлюзов . 802
1. Полезная длина камеры . . . 803
2. Ширина камеры . . . 803

Стр.

3. Полезная глубина на короле h_k 803
4. Размеры верхней и нижней голов . . . 803
5. Внешние габаритные размеры шлюза . . 804
32—4. Продолжительность шлюзования и пропускная способность шлюзов 804
1. Продолжительность шлюзования 804
2. Пропускная способность шлюза 805
32—5. Размещение судоходных шлюзов в гидроузле 806
1. Требования по расположению шлюзов в плане 806
2. Устройство подходов к шлюзам 806
3. Пересечение шлюза дорогами 806
4. Схема расположения шлюза по отношению к водосливной плотине и ГЭС 807
32—6. Возможность использования шлюза для пропуска паводков 809
1. Пропуск расходов воды через шлюз в период строительства 809
2. Пропуск расходов воды через шлюз в период эксплуатации 809
Литература 810

Глава тридцать третья

Лесопропускные сооружения

Канд. техн. наук Латышенков А. М.

33—1. Типы лесопропускных сооружений 811
33—2. Бревноспуски 811
1. Типы бревноспусков 811
2. Устройство головной части бревноспусков . 811
3. Типы усиленной шероховатости на бревноспусках 812
4. Сплавопропускная способность бревноспусков 813
33—3. Плотоходы 813
1. Плотоходы с наклонными лотками 813
2. Плотоходы со шлюзовой камерой 814
3. Размеры поперечного сечения плотоходов . 814
33—4. Бревнотаски 815
1. Продольные бревнотаски 815
2. Поперечные транспортеры (элеваторы) . . 816
33—5. Особые типы лесопропускных сооружений 816
1. Шлюз-плотоход 816
2. Плотошлюз 817
3. Механические плототаски 817
4. Бревноперегружатели 818
Литература 818

Глава тридцать четвертая

Ячеистые конструкции гидротехнических сооружений с применением металлического шпунта

Канд. техн. наук Федоров И. В.

34—1. Типы ячеистых конструкций 819
34—2. Область применения и долговечность ячеистых конструкций 820
1. Область применения 820
2. Долговечность ячеистых конструкций . . . 820
34—3. Основные требования к организации производства работ 822
34—4. Конструирование и расчет ячеистых конструкций 823
1. Общие соображения 823
2. Основные расчетные схемы 823
3. Расчет устойчивости на сдвиг в вертикальной плоскости 823
4. Расчет замковых соединений на разрыв . 826
5. Поверка устойчивости 827
34—5. Основные данные по фильтрации в ячеистых конструкциях 827
Литература 828

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное выполнение плана гидротехнического строительства в СССР, намеченного в решениях XIX съезда КПСС, сопровождается дальнейшим широким развитием научно-исследовательских, изыскательских и проектных работ.

Советская гидротехническая литература систематически пополняется материалами, отражающими передовой опыт научных исследований, проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Настоящее издание, подготовленное Всесоюзным научно-исследовательским институтом водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии (Водгео), имеет целью систематизировать в сжатой форме справочника материалы по основным вопросам гидротехники, общим для ее различных отраслей.

Ввиду обширности и многообразия вопросов гидротехники и ограниченности объема справочника, в нем не освещаются методы производства работ и не приведены данные по специальным сооружениям, относящимся к использованию водной энергии, инженерным мелиорациям, рыбохозяйственной гидротехнике, морской гидротехнике, водоснабжению и канализации, а также данные по некоторым отдельным сооружениям (арочным плотинам, туннелям выправительным сооружениям и др.).

Сооружения речного транспорта и лесосплава освещены весьма кратко (шлюзы, лесопропускные сооружения).

При составлении справочника учтены весьма ценные замечания рецензентов: Управления проектирования, изысканий и исследований для строительства гидротехнических сооружений (Гидропроект) и Всесоюзного государственного проектного института Гидроэнергопроект Министерства электростанций СССР.

Научное редактирование справочника выполнено д-ром техн. наук проф. А. Н. Ахутиным (гл. 2), засл. деят. науки и техники РСФСР

Зак. 125

д-ром техн. наук проф. Е. В. Близняком (главы 1, 6—8 и 11—15), д-ром техн. наук. проф. М. М. Гришиным (главы 5, 9, 10 и 16—34) и лауреатом Сталинской премии д-ром техн. наук проф. Б. Н. Жемочкиным (главы 3 и 4).

При сложности и обширности вопросов, освещенных в настоящем справочнике, в нем возможны недочеты, которые могут выявиться при пользовании им. В связи с этим Институт Водгео просит читателей сообщить о своих замечаниях и пожеланиях, чтобы учесть их в следующем издании, по адресу: Москва, Г. 131, Б. Кочки, д. 17а, ВНИИ Водгео.

Институт Водгео

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОБЩИЙ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МАТЕМАТИКА

1—А. ТАБЛИЦЫ

1—1. ЧАСТО ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ ВЕЛИЧИНЫ

Таблица 1—1

Величины	n	$\lg n$	Величины	n	$\lg n$	Величины	n	$\lg n$
π	3,14159	0,49715	π^2	9,86960	0,99430	$\sqrt{1:e}$	0,60653	$\bar{1}$,78285
2π	6,28319	0,79818	$2\pi^2$	19,73921	1,29533			
3π	9,42478	0,97427	$\sqrt{\pi}$	1,77245	0,24857	$\sqrt[3]{1:e}$	0,71653	$\bar{1}$,85524
$4\pi:3$	4,18879	0,62209	$\sqrt[3]{\pi}$	1,46459	0,16572	$\lg e$	0,43429	$\bar{1}$,63778
$\pi:2$	1,57080	0,19612	$1:\pi^2$	0,10132	$\bar{1}$,00570	$\ln 10$	2,30258	0,36222
$\pi:3$	1,04720	0,02003				$\ln\pi$	1,14473	0,05870
$\pi:180$	0,01745	$\bar{2}$,24188	$1:\sqrt{\pi}$	0,56419	$\bar{1}$,76143	g	9,81	0,99167
$2:\pi$	0,63662	$\bar{1}$,80388	$\sqrt{2\pi}$	2,50663	0,39909	g^2	96,2361	1,98334
$180:\pi$	57,29578	1,75812	$\pi:2$	1,57080	0,19612	$\sqrt{g}$	3,13209	0,49583
$10\,800:\pi$	3437,747	3,53627	e	2,71828	0,43429	$\sqrt{2g}$	4,42945	0,64635
$648\,000:\pi$	206264,81	5,31443	e^2	7,38906	0,86859	$1:g$	0,10194	$\bar{1}$,00833
$1:\pi$	0,31831	$\bar{1}$,50825	$\sqrt{e}$	1,64872	0,21715	$1:2g$	0,05097	$\bar{2}$,70830
$1:2\pi$	0,15916	$\bar{1}$,20182	$\sqrt[3]{e}$	1,39561	0,14476	$\pi\sqrt{g}$	9,83976	0,99298
$1:3\pi$	0,10610	$\bar{1}$,02573	$1:e$	0,36788	$\bar{1}$,56571	$\pi\sqrt{2g}$	13,91536	1,14350
			$1:e^2$	0,13533	$\bar{1}$,13141	$\pi:\sqrt{g}$	1,00303	0,00132

1—2. СТЕПЕНИ, КОРНИ, ЛОГАРИФМЫ, ОБРАТНЫЕ ЧИСЛА, ДЛИНЫ ОКРУЖНОСТЕЙ И ПЛОЩАДИ КРУГОВ

Таблица 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
1	1	1	1,0000	1,0000	0,00000	1000,000	3,142	0,7854	1
2	4	8	1,4142	1,2599	0,30103	500,000	6,283	3,1416	2
3	9	27	1,7321	1,4422	0,47712	333,333	9,425	7,0686	3
4	16	64	2,0000	1,5874	0,60206	250,000	12,566	12,5664	4
5	25	125	2,2361	1,7100	0,69897	200,000	15,708	19,6850	5
6	36	216	2,4495	1,8171	0,77815	166,667	18,850	28,2743	6
7	49	343	2,6458	1,9129	0,84510	142,857	21,991	38,4845	7
8	64	512	2,8284	2,0000	0,90309	125,000	25,133	50,2655	8
9	81	729	3,0000	2,0801	0,95424	111,111	28,274	63,6173	9
10	100	1 000	3,1623	2,1544	1,00000	100,000	31,416	78,5398	10

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
11	121	1 331	3,3166	2,2240	1,04139	90,9091	34,558	95,0332	11
12	144	1 728	3,4641	2,2894	1,07918	83,3333	37,699	113,097	12
13	169	2 197	3,6056	2,3513	1,11394	76,9231	40,841	132,732	13
14	196	2 744	3,7417	2,4101	1,14613	71,4286	43,982	153,938	14
15	225	3 375	3,8730	2,4662	1,17609	66,6667	47,124	176,715	15
16	256	4 096	4,0000	2,5198	1,20412	62,5000	50,265	201,062	16
17	289	4 913	4,1231	2,5713	1,23045	58,8235	53,407	226,980	17
18	324	5 832	4,2426	2,6027	1,25527	55,5556	56,549	254,469	18
19	361	6 859	4,3589	2,6684	1,27875	52,6316	59,690	283,529	19
20	400	8 000	4,4721	2,7144	1,30103	50,0000	62,832	314,159	20
21	441	9 261	4,5826	2,7859	1,32222	47,6190	65,973	346,361	21
22	484	10 648	4,6904	2,8020	1,34242	45,4545	69,115	380,133	22
23	529	12 167	4,7958	2,8439	1,36173	43,4783	72,257	415,476	23
24	576	13 824	4,8990	2,8845	1,38021	41,6667	75,398	452,389	24
25	625	15 625	5,0000	2,9240	1,39794	40,0000	78,540	490,874	25
26	676	17 576	5,0990	2,9625	1,41497	38,4615	81,681	530,929	26
27	729	19 683	5,1962	3,0000	1,43136	37,0370	84,823	572,555	27
28	784	21 952	5,2915	3,0366	1,44716	35,7143	87,965	615,752	28
29	841	24 389	5,3852	3,0723	1,46240	34,4828	91,106	660,520	29
30	900	27 000	5,4772	3,1072	1,47712	33,3333	94,248	706,858	30
31	961	29 791	5,5678	3,1414	1,49136	32,2581	97,389	754,768	31
32	1 024	32 768	5,6569	3,1748	1,50515	31,2500	100,531	804,248	32
33	1 089	35 937	5,7446	3,2075	1,51851	30,3030	103,673	855,299	33
34	1 156	39 304	5,8310	3,2396	1,53148	29,4118	106,814	907,920	34
35	1 225	42 875	5,9161	3,2711	1,54407	28,5714	109,956	962,113	35
36	1 296	46 656	6,0000	3,3019	1,55630	27,7778	113,097	1 017,88	36
37	1 369	50 653	6,0828	3,3322	1,56820	27,0270	116,239	1 075,21	37
38	1 444	54 872	6,1644	3,3620	1,57978	26,3158	119,381	1 134,11	38
39	1 521	59 319	6,2450	3,3912	1,59106	25,6410	122,522	1 194,59	39
40	1 600	64 000	6,3246	3,4200	1,60206	25,0000	125,66	1 256,64	40
41	1 681	68 921	6,4031	3,4482	1,61278	24,3902	128,81	1 320,25	41
42	1 764	74 088	6,4807	3,4760	1,62325	23,8095	131,95	1 385,44	42
43	1 849	79 507	6,5574	3,5034	1,63347	23,2558	135,09	1 452,20	43
44	1 936	85 184	6,6332	3,5303	1,64345	22,7273	138,23	1 520,53	44
45	2 025	91 125	6,7082	3,5569	1,65321	22,2222	141,37	1 590,43	45
46	2 116	97 336	6,7823	3,5830	1,66276	21,7391	144,51	1 661,90	46
47	2 209	103 823	6,8557	3,6088	1,67210	21,2766	147,65	1 734,94	47
48	2 304	110 592	6,9282	3,6342	1,68124	20,8333	150,80	1 809,56	48
49	2 401	117 649	7,0000	3,6593	1,69020	20,4082	153,94	1 885,74	49
50	2 500	125 000	7,0711	3,6840	1,69897	20,0000	157,08	1 963,50	50

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
51	2 601	132 651	7,1414	3,7084	1,70757	19,6078	160,22	2 042,82	51
52	2 704	140 608	7,2111	3,7325	1,71600	19,2308	163,36	2 123,72	52
53	2 809	148 877	7,2801	3,7563	1,72428	18,8679	166,50	2 206,18	53
54	2 916	157 464	7,3485	3,7798	1,73239	18,5185	169,65	2 290,22	54
55	3 025	166 375	7,4162	3,8030	1,74036	18,1818	172,79	2 375,83	55
56	3 136	175 616	7,4833	3,8259	1,74819	17,8571	175,93	2 463,01	56
57	3 249	185 143	7,5498	3,8485	1,75587	17,5439	179,07	2 551,76	57
58	3 364	195 112	7,6158	3,8700	1,76343	17,2414	182,21	2 642,08	58
59	3 481	205 379	7,6811	3,8980	1,77085	16,9492	185,35	2 733,97	59
60	3 600	216 000	7,7460	3,9149	1,77815	16,6667	188,50	2 827,48	60
61	3 721	226 981	7,8102	3,9365	1,78533	16,3964	191,64	2 922,47	61
62	3 844	238 328	7,8740	3,9579	1,79239	16,1290	194,78	3 019,07	62
63	3 969	250 047	7,9373	3,9791	1,79934	15,8730	197,92	3 117,25	63
64	4 096	262 144	8,0000	4,0000	1,80618	15,6250	201,06	3 216,99	64
65	4 225	274 625	8,0623	4,0207	1,81291	15,3846	204,20	3 318,31	65
66	4 356	287 496	8,1240	4,0412	1,81954	15,1515	207,35	3 421,19	66
67	4 489	300 763	8,1854	4,0615	1,82607	14,9254	210,49	3 525,65	67
68	4 624	314 432	8,2462	4,0817	1,83251	14,7059	213,63	3 631,68	68
69	4 761	328 509	8,3066	4,1016	1,83885	14,4928	216,77	3 739,28	69
70	4 900	343 000	8,3666	4,1213	1,84510	14,2857	219,91	3 848,45	70
71	5 041	357 911	8,4261	4,1408	1,85126	14,0845	223,05	3 959,19	71
72	5 184	373 248	8,4853	4,1602	1,85733	13,8889	226,19	4 071,50	72
73	5 329	389 017	8,5440	4,1793	1,86332	13,6986	229,34	4 185,39	73
74	5 476	405 224	8,6023	4,1983	1,86923	13,5135	232,48	4 300,84	74
75	5 625	421 875	8,6603	4,2172	1,87506	13,3333	235,62	4 427,86	75
76	5 776	438 976	8,7178	4,2358	1,88081	13,1579	238,76	4 536,46	76
77	5 929	456 533	8,7750	4,2543	1,88619	12,9870	241,90	4 656,63	77
78	6 084	474 552	8,8318	4,2727	1,89209	12,8205	245,04	4 778,36	78
79	6 241	493 039	8,8882	4,2903	1,89763	12,6582	248,19	4 901,67	79
80	6 400	512 000	8,9443	4,3080	1,90309	12,5000	251,33	5 026,55	80
81	6 561	531,441	9,0000	4,3267	1,90849	12,3457	254,47	5 153,00	81
82	6 724	551,368	9,0554	4,3445	1,91381	12,1951	257,61	5 281,02	82
83	6 889	571,787	9,1104	4,3621	1,91908	12,0482	260,75	5 410,61	83
84	7 056	592,704	9,1652	4,3795	1,92428	11,9048	263,89	5 541,77	84
85	7 225	614,125	9,2195	4,3968	1,92942	11,7647	267,04	5 674,50	85
86	7 396	636,056	9,2736	4,4140	1,93450	11,6279	270,18	5 808,80	86
87	7 569	658,503	9,3274	4,4310	1,93952	11,4943	273,32	5 944,68	87
88	7 744	681,472	9,3808	4,4480	1,94448	11,3636	276,46	6 082,12	88
89	7 921	704,969	9,4340	4,4647	1,94939	11,2360	279,60	6 221,14	89
90	8 100	769 000	9,4868	4,4814	1,95424	11,1111	282,74	6 361,73	90

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
91	8 281	753 571	9,5394	4,4979	1,95904	10,9890	285,88	6 503,88	91
92	8 464	778 688	9,5917	4,5144	1,96379	10,8696	289,03	6 647,61	92
93	8 649	804 357	9,6137	4,5307	1,96848	10,7527	292,17	6 792,91	93
94	8 836	830 584	9,6954	4,5468	1,97313	10,6383	295,31	6 939,78	94
95	9 025	857 375	9,7468	4,5629	1,97772	10,5263	298,45	7 088,22	95
96	9 216	884 736	9,7980	4,5789	1,98227	10,4167	301,59	7 238,23	96
97	9 409	912 673	9,8489	4,5947	1,98677	10,3093	304,73	7 389,81	97
98	9 604	941 192	9,8995	4,6104	1,99123	10,2041	307,88	7 542,96	98
99	9 801	970 299	9,9499	4,6261	1,99564	10,1010	311,02	7 697,69	99
100	10 000	1 000 000	10,0000	4,6416	20,0000	10,000	314,16	7 853,98	100
101	10 201	1 030 301	10,0499	4,6570	2,00432	9,90099	317,30	8 011,85	101
102	10 404	1 061 208	10,0995	4,6723	2,00860	9,80392	320,44	8 171,28	102
103	10 609	1 092 727	10,1489	4,6875	2,01284	9,70874	323,58	8 332,29	103
104	10 816	1 124 864	10,1980	4,7027	2,01703	9,61538	326,73	8 494,87	104
105	11 025	1 157 625	10,2470	4,7177	2,02119	9,52381	329,87	8 659,01	105
106	11 236	1 191 016	10,2956	4,7326	2,02531	9,43396	333,01	8 824,73	106
107	11 449	1 225 043	10,3441	4,7475	2,02938	9,34579	336,15	8 992,02	107
108	11 664	1 259 712	10,3923	4,7622	2,03342	9,25926	339,29	9 160,88	108
109	11 881	1 295 029	10,4403	4,7769	2,03743	9,17431	342,43	9 331,32	109
110	12 100	1 331 000	10,4881	4,7914	2,04139	9,09091	345,58	9 503,32	110
111	12 321	1 367 631	10,5357	4,8059	2,04532	9,00901	348,72	9 676,89	111
112	12 544	1 404 928	10,5830	4,8203	2,04922	8,92857	351,86	9 852,03	112
113	12 769	1 442 897	10,6301	4,8346	2,05308	8,84956	355,00	10 028,7	113
114	12 996	1 481 544	10,6771	4,8488	2,05690	8,77193	358,14	10 207,0	114
115	13 225	1 520 875	10,7238	4,8629	2,06070	8,69565	361,28	10 386,9	115
116	13 456	1 560 896	10,7703	4,8770	2,06446	8,62069	364,42	10 568,3	116
117	13 689	1 601 613	10,8167	4,8910	2,06819	8,54701	367,57	10 751,3	117
118	13 924	1 643 032	10,8628	4,9049	2,07188	8,47458	370,71	10 935,9	118
119	14 161	1 685 159	10,9087	4,9187	2,07555	8,40336	373,85	11 122,0	119
120	14 400	1 728 000	10,9545	4,9324	2,07918	8,33333	376,99	11 309,7	120
121	14 641	1 771 561	11,0000	4,9461	2,08279	8,26446	380,13	11 499,0	121
122	14 884	1 815 848	11,0454	4,9597	2,08636	8,19672	383,27	11 689,9	122
123	15 129	1 860 867	11,0905	4,9732	2,08991	8,13008	386,42	11 882,3	123
124	15 376	1 906 624	11,1355	4,9866	2,09342	8,06452	389,56	12 076,3	124
125	15 625	1 953 125	11,1803	5,0000	2,09691	8,00000	392,70	12 271,8	125
126	15 876	2 000 376	11,2250	5,0133	2,10037	7,93651	395,84	12 469,0	126
127	16 129	2 048 383	11,2694	5,0265	2,10380	7,87402	398,98	12 667,7	127
128	16 384	2 097 152	11,3137	5,0397	2,10721	7,81250	402,12	12 868,0	128
129	16 641	2 146 689	11,3578	5,0528	2,11059	7,75194	405,27	13 069,8	129
130	16 900	2 197 000	11,4018	5,0658	2,11394	7,69231	408,41	13 273,2	130

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
131	17 161	2 248 091	11,4455	5,0788	2,11727	7,63359	411,55	13 478,2	131
132	17 424	2 299 968	11,4891	5,0916	2,12057	7,57576	414,69	13 684,8	132
133	17 689	2 352 637	11,5326	5,1045	2,12385	7,51880	417,83	13 892,9	133
134	17 956	2 406 104	11,5758	5,1172	2,12710	7,46269	420,97	14 102,6	134
135	18 225	2 460 375	11,6190	5,1299	2,13033	7,40741	424,12	14 313,9	135
136	18 496	2 515 456	11,6619	5,1426	2,13354	7,35294	427,26	14 526,7	136
137	18 769	2 571 353	11,7047	5,1551	2,13672	7,29927	430,40	14 741,1	137
138	19 044	2 628 072	11,7473	5,1676	2,13988	7,24638	433,54	14 957,1	138
139	19 321	2 685 619	11,7898	5,1801	2,14301	7,19424	436,68	15 174,7	139
140	19 600	2 744 000	11,8322	5,1925	2,14613	7,14286	439,82	15 393,8	140
141	19 881	2 803 221	11,8743	5,2048	2,14922	7,09220	442,96	15 614,5	141
142	20 164	2 863 288	11,9164	5,2171	2,15229	7,04225	446,11	15 836,8	142
143	20 449	2 924 207	11,9583	5,2293	2,15534	6,99301	449,25	16 060,6	143
144	20 736	2 985 984	12,0000	5,2415	2,15836	6,94444	452,39	16 286,0	144
145	21 025	3 048 625	12,0416	5,2536	2,16137	6,89655	455,53	16 513,0	145
146	21 316	3 112 136	12,0830	5,2656	2,16433	6,84932	458,67	16 741,5	146
147	21 609	3 176 523	12,1244	5,2776	2,16732	6,80272	461,81	16 971,7	147
148	21 904	3 241 792	12,1655	5,2896	2,17026	6,75676	464,96	17 203,4	148
149	22 201	3 307 949	12,2066	5,3015	2,17319	6,71141	468,10	17 436,6	149
150	22 500	3 375 000	12,2474	5,3133	2,17609	6,66667	471,24	17 671,5	150
151	22 801	3 442 951	12,2882	5,3251	2,17898	6,62252	474,38	17 907,9	151
152	23 104	3 511 808	12,3288	5,3368	2,18184	6,57895	477,52	18 145,8	152
153	23 409	3 581 577	12,3693	5,3485	2,18469	6,53595	480,66	18 835,4	153
154	23 716	3 652 264	12,4097	5,3601	2,18752	6,49351	483,81	18 626,5	154
155	24 025	3 723 875	12,4499	5,3717	2,19038	6,45161	486,95	18 869,2	155
156	24 336	3 796 416	12,4900	5,3832	2,19312	6,41026	490,09	19 113,4	156
157	24 649	3 869 893	12,5300	5,3947	2,19590	6,36943	493,23	19 359,3	157
158	24 964	3 944 312	12,5698	5,4061	2,19866	6,32911	496,37	19 606,7	158
159	25 281	4 019 679	12,6095	5,4175	2,20140	6,28931	499,51	19 855,7	159
160	25 600	4 096 000	12,6491	5,4288	2,20412	6,25000	502,65	20 106,2	160
161	25 921	4 173 281	12,6886	5,4401	2,20683	6,21118	505,80	20 358,3	161
162	26 214	4 251 528	12,7279	5,4514	2,20952	6,17284	508,94	20 612,0	162
163	26 569	4 330 747	12,7671	5,4626	2,21219	6,13497	512,08	20 867,2	163
164	26 896	4 410 944	12,8062	5,4737	2,21484	6,09756	515,22	21 124,1	164
165	27 225	4 492 125	12,8452	5,4848	2,21748	6,06061	518,36	21 382,5	165
166	27 556	4 564 296	12,8841	5,4959	2,22011	6,02410	521,50	21 642,4	166
167	27 889	4 657 463	12,9228	5,5069	2,22272	5,98802	524,65	21 904,0	167
168	28 224	4 741 632	12,9615	5,5178	2,22531	5,95238	527,79	22 167,1	168
169	28 561	4 826 809	13,0000	5,5288	2,22789	5,91716	530,93	22 431,8	169
170	28 900	4 913 000	13,0384	5,5397	2,23045	5,88235	534,07	22 698,0	170

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
171	29 241	5 000 211	13,0767	5,5505	2,23300	5,84795	537,21	23 965,8	171
172	29 584	5 088 448	13,1149	5,5613	2,23558	5,81395	540,35	23 235,2	172
173	29 929	5 177 717	13,1529	5,5721	2,23805	5,78035	543,50	23 506,2	173
174	30 276	5 268 024	13,1909	5,5828	2,24055	5,74713	546,64	23 778,7	174
175	30 625	5 359 375	13,2288	5,5934	2,24304	5,71429	549,78	24 052,8	175
176	30 976	5 451 776	13,2665	5,6041	2,24551	5,68182	552,92	24 328,5	176
177	31 329	5 545 233	13,3041	5,6147	2,24797	5,64972	556,06	24 605,7	177
178	31 684	5 639 752	13,3417	5,6252	2,25042	5,61798	559,20	24 884,6	178
179	32 041	5 735 339	13,3791	5,6357	2,25285	5,58659	562,35	25 164,9	179
180	32 400	5 832 000	13,4164	5,6452	2,25527	5,55556	565,49	25 446,9	180
181	32 761	5 929 741	13,4536	5,6567	2,25768	5,52486	568,63	25 730,4	181
182	33 124	6 028 568	13,4907	5,6671	2,26007	5,49451	571,77	26 015,5	182
183	33 489	6 128 487	13,5277	5,6774	2,26245	5,46448	574,91	26 302,2	183
184	33 856	6 229 504	13,5647	5,6877	2,26482	5,43478	578,05	26 590,4	184
185	34 225	6 331 625	13,6015	5,6980	2,26717	5,40541	581,19	26 880,3	185
186	34 596	6 434 856	13,6382	5,7083	2,26951	5,37634	584,34	27 171,6	186
187	34 969	6 569 203	13,6748	5,7185	2,27184	5,34759	587,48	27 464,6	187
188	35 344	6 644 672	13,7113	5,7287	2,27416	5,31915	590,62	27 759,1	188
189	35 721	6 751 269	13,7477	5,7388	2,27646	5,29101	593,76	28 055,2	189
190	36 100	6 859 000	13,7840	5,7489	2,27875	5,26316	596,90	28 352,9	190
191	36 481	6 967 871	13,8203	5,7590	2,28103	5,23560	600,04	28 652,1	191
192	36 864	7 077 888	13,8564	5,7690	2,28330	5,20833	603,19	28 952,9	192
193	37 249	7 189 057	13,8924	5,7790	2,28556	5,18135	606,33	29 256,3	193
194	37 636	7 301 384	13,9284	5,7890	2,28780	5,15464	609,47	29 559,2	194
195	38 025	7 414 875	13,9642	5,7989	2,29003	5,12821	612,61	29 864,8	195
196	38 416	7 529 536	14,0000	5,8088	2,29226	5,10204	615,75	30 171,9	196
197	38 809	7 645 373	14,0357	5,8186	2,29447	5,07614	618,89	30 480,5	197
198	39 204	7 762 392	14,0712	5,8285	2,29667	5,05051	622,04	30 790,7	198
199	39 601	7 880 599	14,1067	5,8383	2,29885	5,02513	625,18	31 102,6	199
200	40 000	8 000 000	14,1421	5,8480	2,30103	5,00000	628,32	31 415,9	200
201	40 401	8 120 601	14,1774	5,8578	2,30320	4,97512	631,46	31 730,9	201
202	40 804	8 242 408	14,2127	5,8675	2,30535	4,95050	634,60	32 047,4	202
203	41 209	8 365 427	14,2478	5,8771	2,30759	4,92611	637,74	32 365,5	203
204	41 616	8 489 664	14,2829	5,8868	2,30963	4,90196	640,88	32 685,1	204
205	42 025	8 615 125	14,3178	5,8964	2,31175	4,87805	644,03	33 006,4	205
206	42 436	8 741 816	14,3527	5,9059	2,31387	4,85437	647,17	33 329,2	206
207	42 849	8 869 743	14,3875	5,9155	2,31597	4,83092	650,31	33 653,5	207
208	43 264	8 998 912	14,4222	5,9250	2,31806	4,80769	653,45	33 979,5	208
209	43 681	9 129 329	14,4568	5,9345	2,32015	4,78469	656,59	34 307,0	209
210	44 100	9 261 000	14,4914	5,9439	2,32222	4,76190	659,73	34 636,1	210

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
211	44 521	9 393 931	14,5258	5,9533	2,32428	4,73934	662,88	34 966,7	211
212	44 944	9 528 128	14,5602	5,9627	2,32634	4,71698	666,02	35 298,9	212
213	45 369	9 663 597	14,5945	5,9721	2,32838	4,69484	669,16	35 832,7	213
214	45 796	9 800 344	14,6287	5,9814	2,33041	4,67290	672,30	35 968,1	214
215	46 225	9 938 375	14,6629	5,9907	2,33244	4,65116	675,44	36 305,0	215
216	46 656	10 077 696	14,6969	6,0000	2,33445	4,62963	678,58	36 643,5	216
217	47 089	10 218 313	14,7309	6,0092	2,33646	4,60829	681,73	36 973,6	217
218	47 524	10 360 232	14,7648	6,0185	2,33846	4,58716	684,87	37 325,3	218
219	47 961	10 503 459	14,7986	6,0277	2,34044	4,56621	688,01	37 668,5	219
220	48 400	10 648 000	14,8324	6,0368	2,34242	4,54545	691,15	38 013,3	220
221	48 841	10 793 861	14,8661	6,0459	2,34439	4,52489	694,29	38 359,6	221
222	49 284	10 941 048	14,8997	6,0550	2,34635	4,50450	697,43	38 707,6	222
223	49 729	11 089 567	14,9332	6,0641	2,34830	4,48430	700,58	39 057,1	223
224	50 176	11 239 424	14,9666	6,0732	2,35025	4,46429	703,72	39 408,1	224
225	50 625	11 390 625	15,0000	6,0822	2,35218	4,44444	706,86	39 760,8	225
226	51 076	11 543 176	15,0333	6,0912	2,35411	4,42478	710,00	40 115,0	226
227	51 529	11 697 083	15,0665	6,1002	2,35603	4,40529	713,14	40 470,8	227
228	51 984	11 852 352	15,0997	6,1091	2,35793	4,38596	716,28	40 828,1	228
229	52 441	12 008 989	15,1327	6,1180	2,35984	4,36681	719,42	41 187,1	229
230	52 900	12 167 000	15,1658	6,1269	2,36173	4,34783	722,57	41 547,6	230
231	53 361	12 326 391	15,1987	6,1358	2,36361	4,32900	725,71	41 909,6	231
232	53 824	12 487 168	15,2315	6,1446	2,36549	4,31034	728,85	42 273,3	232
233	54 289	12 649 337	15,2643	6,1534	2,36736	4,29185	731,99	42 638,5	233
234	54 756	12 812 904	15,2971	6,1622	2,36922	4,27350	735,13	43 005,3	234
235	55 225	12 977 875	15,3297	6,1710	2,37107	4,25532	738,27	43 373,6	235
236	55 696	13 144 256	15,3623	6,1797	2,37291	4,23729	741,42	43 743,5	236
237	56 169	13 312 013	15,3948	6,1885	2,37475	4,21941	744,56	44 115,0	237
238	56 644	13 481 272	15,4272	6,1972	2,37658	4,20168	747,70	44 388,1	238
239	57 121	13 651 919	15,4596	6,2058	2,37840	4,18410	750,84	44 862,7	239
240	57 600	13 824 000	15,4919	6,2145	2,38021	4,16667	753,98	45 238,9	240
241	58 081	13 997 521	15,5242	6,2231	2,38202	4,14938	757,12	45 616,7	241
242	58 564	14 172 488	15,5563	6,2317	2,38382	4,13223	760,27	45 996,1	242
243	59 049	14 348 907	15,5885	6,2403	2,38561	4,11523	763,41	46 377,0	243
244	59 536	14 526 784	15,6205	6,2488	2,38739	4,09836	766,55	46 759,5	244
245	60 025	14 706 125	15,6525	6,2573	2,38917	4,08163	769,69	47 143,5	245
246	60 516	14 886 936	15,6844	6,2658	2,39094	4,06504	772,83	47 529,2	246
247	61 009	15 069 223	15,7162	6,2743	2,39270	4,04858	775,97	47 916,4	247
248	61 504	15 252 992	15,7480	6,2828	2,39445	4,03226	779,11	48 305,1	248
249	62 001	15 438 249	15,7797	6,2912	2,39620	4,01606	782,26	48 695,5	249
250	62 500	15 625 000	15,8114	6,2996	2,39794	4,00000	785,40	49 087,4	250

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
251	63 001	15 813 251	15,8430	6,3080	2,39967	3,98406	788,54	49 480,9	251
252	63 504	16 003 008	15,8745	6,3164	2,40140	3,96825	791,68	49 875,9	252
253	64 009	16 194 277	15,9060	6,3247	2,40312	3,95257	794,82	50 272,6	253
254	64 516	16 387 064	15,9374	6,3330	2,40483	3,93701	797,96	50 670,7	254
255	65 025	16 581 375	15,9687	6,3413	2,40654	3,92157	801,11	51 070,5	255
256	65 536	16 777 216	16,0000	6,3496	2,40824	3,90625	804,25	51 471,9	256
257	66 049	16 974 593	16,0312	6,3579	2,40993	3,89105	807,39	51 874,8	257
258	66 564	17 173 512	16,0624	6,3661	2,41162	3,87597	810,53	52 279,2	258
259	67 081	17 373 979	16,0935	6,3743	2,41330	3,86100	813,67	52 685,3	259
260	67 600	17 576 000	16,1245	6,3825	2,41497	3,84615	816,81	53 092,9	260
261	68 121	17 779 581	16,1555	6,3907	2,41664	3,83142	819,96	53 502,1	261
262	68 644	17 984 728	16,1864	6,3988	2,41830	3,81679	823,10	53 912,9	262
263	69 169	18 191 447	16,2173	6,4070	2,41996	3,80228	826,24	54 325,2	263
264	69 696	18 399 744	16,2481	6,4151	2,42160	3,78788	829,38	54 739,1	264
265	70 225	18 609 625	16,2788	6,4232	2,42325	3,77358	832,52	55 154,6	265
266	70 756	18 821 096	16,3095	6,4312	2,42488	3,75940	835,66	55 571,6	266
267	71 289	19 034 163	16,3401	6,4393	2,42651	3,74532	838,81	55 990,2	267
268	71 824	19 248 832	16,3707	6,4473	2,42813	3,73134	841,95	56 410,4	268
269	72 361	19 465 109	16,4012	6,4553	2,42975	3,71747	845,09	56 832,2	269
270	72 900	19 683 000	16,4317	6,4633	2,43136	3,70370	848,23	57 255,5	270
271	73 441	19 902 511	16,4621	6,4713	2,43297	3,69004	851,37	57 680,4	271
272	73 984	20 123 648	16,4924	6,4792	2,43457	3,67647	854,51	58 106,9	272
273	74 529	20 346 417	16,5227	6,4872	2,43616	3,66300	857,65	58 534,9	273
274	75 076	20 570 824	16,5529	6,4951	2,43775	3,64964	860,80	58 964,6	274
275	75 625	20 796 875	16,5831	6,5030	2,43933	3,63636	863,94	59 395,7	275
276	76 176	21 024 576	16,6132	6,5108	2,44091	3,62319	867,08	59 828,5	276
277	76 729	21 253 933	16,6433	6,5187	2,44248	3,61011	870,22	60 262,8	277
278	77 284	21 484 952	16,6733	6,5265	2,44404	3,59712	873,36	60 698,7	278
279	77 841	21 717 639	16,7033	6,5343	2,44560	3,58423	876,50	61 136,2	279
280	78 400	21 952 000	16,7362	6,5421	2,44716	3,57143	879,65	61 575,2	280
281	79 961	22 188 041	16,7631	6,5499	2,44871	3,55872	882,79	62 015,8	281
282	79 524	22 425 768	16,7929	6,5577	2,45025	3,54610	885,93	62 458,0	282
283	80 089	22 665 187	16,8226	6,5654	2,45179	3,53357	889,07	62 901,8	283
284	80 656	22 906 304	16,8523	6,5731	2,45332	3,52113	892,21	63 347,1	284
285	81 225	23 149 125	16,8819	6,5808	2,45484	3,50877	895,35	63 794,0	285
286	81 796	23 393 656	16,9115	6,5885	2,45637	3,49650	898,50	64 242,4	286
287	82 369	23 639 903	16,9411	6,5962	2,45788	3,48432	901,64	64 692,5	287
288	82 944	23 887 872	16,9706	6,6039	2,45939	3,47222	904,78	65 144,4	288
289	83 521	24 137 569	17,0000	6,6115	2,46090	3,46021	907,92	65 597,2	289
290	84 100	24 389 000	17,0294	6,6191	2,46240	3,44828	911,06	66 052,0	290

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
291	84 681	24 642 171	17,0587	6,6267	2,46389	3,43643	914,20	66 508,3	291
292	85 264	24 897 088	17,0880	6,6343	2,46538	3,42466	917,35	66 966,2	292
293	85 849	25 153 757	17,1172	6,6419	2,46687	3,41297	920,49	67 425,6	293
294	86 436	25 412 184	17,1464	6,6494	2,46835	3,40136	923,63	67 886,7	294
295	87 025	25 672 375	17,1756	6,6569	2,46982	3,38983	926,77	68 349,3	295
296	87 616	25 934 336	17,2047	6,6644	2,47129	3,37838	929,91	68 813,4	296
297	88 209	26 198 073	17,2337	6,6719	2,47276	3,36700	933,05	69 279,2	297
298	88 804	26 463 592	17,2627	6,6794	2,47422	3,35570	936,19	69 746,5	298
299	89 401	26 730 899	17,2916	6,6869	2,47567	3,34448	939,34	70 215,4	299
300	90 000	27 000 000	17,3205	6,6943	2,47712	3,33333	942,48	70 685,8	300
301	90 601	27 270 901	17,3494	6,7018	2,47857	3,32226	945,62	71 157,9	301
302	91 204	27 543 608	17,3781	6,7092	2,48001	3,31126	948,76	71 631,5	302
303	91 809	27 818 127	17,4069	6,7166	2,48144	3,30033	951,90	72 106,6	303
304	92 416	28 094 464	17,4356	6,7240	2,48287	3,28947	955,04	72 583,4	304
305	93 025	28 372 625	17,4642	6,7313	2,48430	3,27869	958,19	72 061,7	305
306	93 636	28 652 616	17,4929	6,7387	2,48572	3,26797	961,33	73 541,5	306
307	94 249	28 934 443	17,5214	6,7460	2,48714	3,25733	964,47	74 023,0	307
308	94 864	29 218 112	17,5499	6,7533	2,48855	3,24675	967,61	74 506,0	308
309	95 481	29 503 629	17,5784	6,7606	2,48996	3,23625	970,75	74 990,6	309
310	96 100	29 791 000	17,6068	6,7679	2,49136	3,22581	973,89	75 476,8	310
311	96 721	30 080 231	17,6352	6,7752	2,49276	3,21543	977,04	75 964,5	311
312	97 344	30 371 328	17,6635	6,7824	2,49415	3,20513	980,18	76 453,8	312
313	97 969	30 664 297	17,6918	6,7897	2,49554	3,19489	983,32	76 944,7	313
314	98 596	30 959 144	17,7200	6,7969	2,49693	3,18471	986,46	77 437,1	314
315	99 225	31 255 875	17,7482	6,8041	2,49831	3,17460	989,60	77 931,1	315
316	99 856	31 554 496	17,7764	6,8113	2,49969	3,16456	992,74	78 426,7	316
317	100 489	31 855 013	17,8045	6,8185	2,50106	3,15457	995,88	78 923,9	317
318	101 124	32 157 432	17,8326	6,8256	2,50243	3,14465	999,03	79 422,6	318
319	101 761	32 461 759	17,8606	6,8328	2,50379	3,13480	1 002,20	79 922,9	319
320	102 400	32 768 000	17,8885	6,8399	2,50515	3,12500	1 005,3	80 424,8	320
321	103 041	33 076 161	17,9165	6,8470	2,50651	3,11526	1 008,5	80 928,2	321
322	103 684	33 386 248	17,9444	6,8541	2,50786	3,10559	1 011,6	81 433,2	322
323	104 329	33 698 267	17,9722	6,8612	2,50320	3,09598	1 014,7	81 939,8	323
324	104 976	34 012 224	18,0000	6,8683	2,51055	3,08642	1 017,9	82 448,0	324
325	105 625	34 328 125	18,0278	6,8753	2,51188	3,07692	1 021,0	82 957,7	325
326	106 276	34 645 976	18,0555	6,8824	2,51322	3,06748	1 024,2	83 460,0	326
327	106 929	34 965 783	18,0831	6,8894	2,51455	3,05810	1 027,3	83 981,8	327
328	107 584	35 287 552	18,1106	6,8964	2,51587	3,04878	1 030,4	84 496,3	328
329	108 241	35 611 289	18,1384	6,9034	2,51720	3,03951	1 033,6	85 012,3	329
330	108 900	35 937 000	18,1659	6,9104	2,51351	3,03030	1 036,7	85 529,9	330

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
331	109 561	36 264 691	18,1934	6,9174	2,51983	3,02115	1 039,9	86 049,9	331
332	110 224	36 594 368	18,2209	6,9244	2,52114	3,01205	1 043,0	86 569,7	332
333	110 889	36 926 037	18,2483	6,9313	2,52244	3,00300	1 046,2	87 002,0	333
334	111 556	37 259 704	18,2757	6,9382	2,52375	2,99401	1 049,3	87 615,9	334
335	112 225	37 595 375	18,3030	6,9451	2,52504	2,98507	1 052,4	88 141,3	335
336	112 896	37 983 056	18,3303	6,9521	2,52634	2,97619	1 055,6	88 063,3	336
337	113 569	38 272 753	18,3576	6,9589	2,52763	2,96736	1 058,7	89 196,9	337
338	114 244	38 614 472	18,3848	6,9658	2,52892	2,95858	1 061,9	89 727,0	338
339	114 921	38 958 921	18,4120	6,9727	2,53020	2,94985	1 065,0	90 258,7	339
340	115 600	39 304 000	18,4391	6,9795	2,53148	2,94118	1 068,1	90 792,0	340
341	116 281	39 651 821	18,4662	6,9864	2,53275	2,93255	1 071,3	91 326,9	341
342	116 964	40 001 688	18,4932	6,9932	2,53403	2,92398	1 074,4	91 863,3	342
343	117 649	40 353 607	18,5203	7,0000	2,53529	2,91545	1 077,6	92 401,3	343
344	118 336	40 707 584	18,5472	7,0068	2,53656	2,90698	1 080,7	92 240,9	344
345	119 025	41 063 625	18,5742	7,0136	2,53782	2,89855	1 083,8	93 482,0	345
346	119 716	41 421 736	18,6011	7,0203	2,53908	2,89017	1 087,0	94 024,7	346
347	120 409	41 781 923	18,6279	7,0271	2,54033	2,88184	1 090,1	94 559,0	347
348	121 104	42 144 192	18,6548	7,0338	2,54158	2,87356	1 093,3	95 114,9	348
349	121 801	42 508 549	18,6815	7,0406	2,54283	2,86533	1 096,4	95 662,3	349
350	122 500	42 875 000	18,7083	7,0473	2,54407	2,85714	1 099,6	96 211,3	350
351	123 201	43 243 551	18,7350	7,0540	2,54531	2,84900	1 102,7	96 761,8	351
352	123 904	43 614 208	18,7617	7,0607	2,54654	2,84091	1 105,8	97 314,0	352
353	124 609	43 986 977	18,7883	7,0674	2,54777	2,83286	1 109,0	97 867,7	353
354	125 316	44 361 864	18,8149	7,0740	2,54900	2,82486	1 112,1	98 423,0	354
355	126 025	44 738 875	18,8414	7,0807	2,55023	2,81690	1 115,3	98 979,8	355
356	126 736	45 118 016	18,8680	7,0873	2,55145	2,80899	1 118,4	99 538,2	356
357	127 449	45 499 293	18,8944	7,0940	2,55267	2,80112	1 121,5	100 098	357
358	128 164	45 882 712	18,9209	7,1006	2,55388	2,79330	1 124,7	100 660	358
359	128 881	46 268 279	18,9473	7,1072	2,55509	2,78552	1 127,8	101 223	359
360	129 600	46 656 000	18,9737	7,1138	2,55630	2,77778	1 131,0	101 788	360
361	130 321	47 045 881	19,0000	7,1204	2,55751	2,77008	1 134,1	102 354	361
362	131 044	47 437 928	19,0263	7,1269	2,55871	2,76243	1 137,3	102 922	362
363	131 769	47 832 147	19,0526	7,1335	2,55991	2,75482	1 140,4	103 491	363
364	132 496	48 228 544	19,0788	7,1400	2,56110	2,74725	1 143,5	104 062	364
365	133 225	48 627 125	19,1050	7,1466	2,56229	2,73973	1 146,7	104 635	365
366	133 956	49 027 896	19,1311	7,1531	2,56348	2,73224	1 149,8	105 209	366
367	134 689	49 430 863	19,1572	7,1596	2,56467	2,72480	1 153,0	105 785	367
368	135 424	49 836 032	19,1833	7,1661	2,56585	2,71739	1 156,1	106 362	368
369	136 161	50 243 409	19,2094	7,1726	2,56703	2,71003	1 159,2	106 941	369
370	136 900	50 653 000	19,2354	7,1791	2,56820	2,70270	1 162,4	107 521	370

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
371	137 641	51 064 811	19,2614	7,1855	2,56937	2,69542	1 165,5	108 103	371
372	138 384	51 478 848	19,2873	7,1920	2,57054	2,68817	1 168,7	108 687	372
373	139 129	51 895 117	19,3132	7,1984	2,57171	2,68097	1 171,8	109 272	373
374	139 876	52 313 624	19,3391	7,2048	2,57287	2,67380	1 175,0	109 858	374
375	140 625	52 734 375	19,3649	7,2112	2,57403	2,66667	1 178,1	110 447	375
376	141 376	53 157 376	19,3907	7,2177	2,57519	2,65957	1 181,2	111 036	376
377	142 129	53 582 633	19,4165	7,2240	2,57634	2,65252	1 184,2	111 628	377
378	142 884	54 010 152	19,4422	7,2304	2,57749	2,64550	1 187,5	112 221	378
379	143 641	54 439 939	19,4679	7,2368	2,57864	2,63852	1 190,7	112 815	379
380	144 400	54 872 000	19,4936	7,2432	2,57978	2,63158	1 193,8	113 411	380
381	145 161	55 306 341	19,5192	7,2495	2,58092	2,62467	1 196,9	114 009	381
382	145 924	55 742 968	19,5448	7,2558	2,58206	2,61780	1 200,1	114 608	382
383	146 689	56 181 887	19,5704	7,2622	2,58320	2,61097	1 203,2	115 209	383
384	147 456	56 623 104	19,5959	7,2685	2,58433	2,60417	1 206,4	115 812	384
385	148 225	57 066 625	19,6214	7,2748	2,58546	2,59740	1 209,5	116 416	385
386	148 996	57 512 456	19,6469	7,2811	2,58659	2,59067	1 212,7	117 021	386
387	149 769	57 960 603	19,6723	7,2874	2,58771	2,58398	1 215,5	117 628	387
388	150 544	58 411 072	19,6977	7,2936	2,58883	2,57732	1 218,9	118 237	388
389	151 321	58 863 869	19,7231	7,2999	2,58995	2,57069	1 222,1	118 847	389
390	152 100	59 319 000	19,7484	7,3061	2,59106	2,56410	1 225,2	119 459	390
391	152 881	59 776 471	19,7737	7,3124	2,59218	2,55754	1 228,4	120 072	391
392	153 664	60 236 288	19,7990	7,3186	2,59329	2,55102	1 231,5	120 687	392
393	154 449	60 698 457	19,8242	7,3248	2,59439	2,54453	1 234,6	121 304	393
394	155 236	61 162 984	19,8494	7,3310	2,59550	2,53807	1 237,8	121 922	394
395	156 025	61 629 875	19,8746	7,3372	2,59660	2,53165	1 240,9	122 542	395
396	156 816	62 099 136	19,8997	7,3434	2,59770	2,52525	1 244,1	123 163	396
397	157 609	62 570 773	19,9249	7,3496	2,59879	2,51889	1 247,2	123 786	397
398	158 404	63 044 792	19,9499	7,3658	2,59988	2,51256	1 250,4	124 410	398
399	159 201	63 521 199	19,9750	7,3619	2,60097	2,50627	1 253,5	125 036	399
400	160 000	64 000 000	20,0000	7,3681	2,60206	2,50000	1 256,6	125 664	400
401	160 801	64 481 201	20,0250	7,3742	2,60314	2,49377	1 259,8	126 293	401
402	161 604	64 964 808	20,0499	7,3803	2,60423	2,48756	1 262,9	126 923	402
403	162 409	65 450 827	20,0749	7,3864	2,60531	2,48139	1 266,1	127 556	403
404	163 216	65 939 264	20,0998	7,3925	2,60638	2,47525	1 269,2	128 190	404
405	164 025	66 430 125	20,1246	7,3986	2,60746	2,46914	1 272,3	128 825	405
406	164 836	66 923 416	20,1494	7,4047	2,60853	2,46305	1 275,5	129 462	406
407	165 649	67 419 143	20,1742	7,4108	2,60959	2,45700	1 278,6	130 100	407
408	166 464	67 917 312	20,1990	7,4169	2,61066	2,45098	1 281,8	130 741	408
409	167 281	68 417 929	20,2237	7,4229	2,61172	2,44499	1 284,9	131 382	409
410	168 100	68 921 000	20,2485	7,4290	2,61278	2,43902	1 288,1	132 025	410

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
411	168 921	69 426 531	20,2731	7,4350	2,61384	2,43309	1 291,2	132 670	411
412	169 744	69 934 528	20,2978	7,4410	2,61490	2,42718	1 294,3	133 317	412
413	170 569	70 444 997	20,3224	7,4470	2,61595	2,42131	1 297,5	133 965	413
414	171 396	70 957 944	20,3470	7,4530	2,61700	2,41546	1 300,6	134 614	414
415	172 225	71 473 375	20,3715	7,4590	2,61805	2,40964	1 303,8	135 265	415
416	173 056	71 991 296	20,3961	7,4650	2,61909	2,40385	1 306,9	135 918	416
417	173 889	72 511 713	20,4206	7,4710	2,62014	2,39808	1 310,0	136 572	417
418	174 724	73 034 632	20,4450	7,4770	2,62118	2,39234	1 313,2	137 228	418
419	175 561	73 560 059	20,4695	7,4829	2,62221	2,38663	1 316,3	137 885	419
420	176 400	74 088 000	20,4939	7,4889	2,62325	2,37895	1 319,5	138 544	420
421	177 241	74 618 461	20,5183	7,4948	2,62428	2,37530	1 322,6	139 205	421
422	178 084	75 151 448	20,5426	7,5007	2,62531	2,36967	1 325,8	139 867	422
423	178 929	75 686 967	20,5670	7,5067	2,62634	2,36407	1 328,9	140 531	423
424	179 776	76 225 024	20,5913	7,5126	2,62737	2,35849	1 332,0	141 196	424
425	180 625	76 765 625	20,6155	7,5185	2,62839	2,35294	1 335,2	141 863	425
426	181 476	77 308 776	20,6398	7,5244	2,62941	2,34742	1 338,3	142 531	426
427	182 329	77 854 483	20,6640	7,5302	2,63043	2,34192	1 341,5	143 201	427
428	183 184	78 402 752	20,6882	7,5361	2,63144	2,33645	1 344,6	143 872	428
429	184 041	78 953 589	20,7123	7,5420	2,63246	2,33100	1 347,7	144 545	429
430	184 900	79 507 000	20,7364	7,5478	2,63347	2,31558	1 350,9	145 220	430
431	185 761	80 062 991	20,7605	7,5537	2,63448	2,32019	1 354,0	145 896	431
432	186 624	80 621 568	20,7846	7,5595	2,63548	2,31481	1 357,2	146 574	432
433	187 489	81 182 737	20,8087	7,5654	2,63649	2,30947	1 360,3	147 254	433
434	188 356	81 746 504	20,8327	7,5712	2,63749	2,30415	1 363,5	147 934	434
435	189 225	82 312 875	20,8567	7,5770	2,63849	2,29885	1 366,5	148 617	435
436	190 096	82 881 856	20,8806	7,5828	2,63949	2,29358	1 369,7	149 301	436
437	190 969	83 453 453	20,9045	7,5886	2,64048	2,28833	1 372,9	149 987	437
438	191 844	84 027 672	20,9284	7,5944	2,64147	2,28811	1 376,0	150 674	438
439	192 721	84 604 519	20,9523	7,6001	2,64246	2,27790	1 379,2	151 363	439
440	193 600	85 184 000	20,9762	7,6059	2,64345	2,27273	1 382,3	152 053	440
441	194 481	85 766 121	21,0000	7,6117	2,64444	2,26757	1 385,4	152 745	441
442	195 364	86 350 886	21,0238	7,6174	2,64542	2,26244	1 388,6	153 439	442
443	196 249	86 938 307	21,0476	7,6232	2,64640	2,25734	1 391,7	154 134	443
444	197 136	87 528 384	21,0713	7,6289	2,64738	2,25225	1 394,9	154 830	444
445	198 025	88 121 125	21,0950	7,6346	2,64836	2,24719	1 398,0	155 528	445
446	198 916	88 716 536	21,1187	7,6403	2,64933	2,24215	1 401,2	156 228	446
447	199 809	89 314 623	21,1424	7,6460	2,65031	2,23714	1 404,3	156 930	447
448	200 704	89 915 392	21,1660	7,6517	2,65128	2,23214	1 407,4	157 633	448
449	201 601	90 518 849	21,1896	7,6574	2,65225	2,22717	1 410,6	158 337	449
450	202 500	91 125 000	21,2132	7,6631	2,65321	2,22222	1 413,7	159 043	450

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
451	203 401	91 733 851	21,2368	7,6688	2,65418	2,21729	1 416,9	159 751	451
452	204 304	92 345 408	21,2603	7,6744	2,65514	2,21239	1 420,0	160 460	452
453	205 209	92 959 677	21,2838	7,6801	2,65610	2,20751	1 423,1	161 171	453
454	206 116	93 576 664	21,3073	7,6857	2,65706	2,22064	1 426,3	161 883	454
455	207 025	94 196 375	21,3307	7,6914	2,65801	2,19780	1 429,4	162 597	455
456	207 936	94 818 816	21,3542	7,6970	2,65896	2,19298	1 432,6	163 313	456
457	208 849	95 443 993	21,3776	7,7026	2,65992	2,18818	1 435,7	164 030	457
458	209 764	96 071 912	21,4009	7,7082	2,66087	2,18341	1 438,8	164 748	458
459	210 681	96 702 579	21,4243	7,7138	2,66181	2,17865	1 442,0	165 468	459
460	211 600	97 336 000	21,4476	7,7194	2,66276	2,17391	1 445,1	166 190	460
461	212 521	97 972 181	21,4709	7,7250	2,66370	2,16920	1 448,3	166 914	461
462	213 444	98 611 128	21,4942	7,7306	2,66464	2,16450	1 451,4	167 639	462
463	214 369	99 252 847	21,5174	7,7362	2,66558	2,15983	1 454,6	168 365	463
464	215 296	99 897 344	21,5407	7,7418	2,66652	2,15517	1 456,6	169 093	464
465	216 225	100 544 625	21,5639	7,7473	2,66745	2,15054	1 460,8	169 823	465
466	217 156	101 194 696	21,5870	7,7529	2,66839	2,14592	1 464,0	170 554	466
467	218 089	101 847 563	21,6102	7,7584	2,66932	2,14133	1 467,1	171 287	467
468	219 024	102 503 232	21,6333	7,7639	2,67025	2,13675	1 470,3	172 021	468
469	219 961	103 161 709	21,6564	7,7695	2,67117	2,13220	1 473,4	172 757	469
470	220 900	103 823 000	21,6795	7,7750	2,67210	2,12766	1 476,5	173 494	470
471	221 841	104 487 111	21,7025	7,7805	2,67302	2,12314	1 479,7	174 284	471
472	222 784	105 154 048	21,7256	7,7860	2,67394	2,11864	1 482,8	174 974	472
473	223 729	105 823 817	21,7486	7,7915	2,67486	2,11416	1 486,0	175 716	473
474	224 676	106 496 424	21,7715	7,7970	2,67578	2,10970	1 489,1	176 460	474
475	225 625	107 171 875	21,7945	7,8025	2,67669	2,10526	1 492,3	177 205	475
476	226 576	107 850 176	21,8174	7,8079	2,67761	2,10084	1 495,4	177 952	476
477	227 529	108 531 333	21,8403	7,8134	2,67852	2,09644	1 498,5	178 701	477
478	228 484	109 215 352	21,8632	7,8188	2,67943	2,09205	1 501,7	179 451	478
479	229 441	109 902 239	21,8861	7,8243	2,68034	2,08768	1 504,8	180 203	479
480	230 400	110 592 000	21,9089	7,8297	2,68124	2,08333	1 508,0	180 956	480
481	231 361	111 284 641	21,9317	7,8352	2,68215	2,07900	1 511,1	181 711	481
482	232 324	111 980 168	21,9545	7,8406	2,68305	2,07469	1 514,2	182 467	482
483	233 289	112 678 587	21,9773	7,8460	2,68395	2,07039	1 517,4	183 225	483
484	234 256	113 379 904	22,0000	7,8514	2,68485	2,06612	1 520,5	183 984	484
485	235 225	114 084 125	22,0227	7,8568	2,68574	2,06186	1 523,7	184 745	485
486	236 196	114 791 256	22,0454	7,8622	2,68664	2,05761	1 526,8	185 508	486
487	237 169	115 501 303	22,0681	7,8676	2,68753	2,05339	1 530,0	186 272	487
488	238 144	116 214 272	22,0907	7,8730	2,68842	2,04918	1 533,1	187 038	488
489	239 121	116 930 169	22,1133	7,8784	2,68931	2,04499	1 536,2	187 805	489
490	240 100	117 649 000	22,1359	7,8837	2,69020	2,04082	1 539,4	188 574	490

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
491	241 081	118 370 771	22,1585	7,8891	2,69108	2,03666	1 542,5	189 345	491
492	242 064	119 095 488	22,1811	7,8944	2,69197	2,03252	1 545,7	190 117	492
493	243 049	119 823 157	22,2036	7,8998	2,69285	2,02840	1 548,8	190 890	493
494	244 036	120 553 784	22,2261	7,9051	2,69373	2,02429	1 551,9	191 665	494
495	245 025	121 287 375	22,2486	7,9105	2,69461	2,02020	1 555,1	192 442	495
496	246 016	122 023 936	22,2711	7,9158	2,69548	2,01613	1 558,2	193 221	496
497	247 009	122 763 473	22,2935	7,9211	2,69636	2,01207	1 561,4	194 000	497
498	248 004	123 505 992	22,3159	7,9264	2,69723	2,00803	1 564,5	194 782	498
499	249 001	124 251 499	22,3383	7,9317	2,69810	2,00401	1 567,7	195 565	499
500	250 000	125 000 000	22,3607	7,9370	2,69897	2,00000	1 570,8	196 350	500
501	251 001	125 751 501	22,3830	7,9423	2,69984	1,99601	1 573,9	197 136	501
502	252 004	126 506 008	22,4054	7,9476	2,70070	1,99203	1 577,1	197 923	502
503	253 009	127 263 527	22,4277	7,9528	2,70157	1,98807	1 580,2	198 713	503
504	254 016	128 024 064	22,4499	7,9581	2,70243	1,98413	1 583,4	199 504	504
505	255 025	128 787 625	22,4722	7,9634	2,70329	1,98020	1 586,5	200 296	505
506	256 036	129 554 216	22,4944	7,9686	2,70415	1,97628	1 589,6	201 090	506
507	257 049	130 323 843	22,5167	7,9739	2,70501	1,97239	1 592,8	201 886	507
508	258 064	131 096 512	22,5389	7,9791	2,70586	1,96850	1 595,9	202 683	508
509	259 081	131 872 229	22,5610	7,9843	2,70672	1,96464	1 599,1	203 482	509
510	260 100	132 651 000	22,5832	7,9896	2,70757	1,96078	1 602,2	204 282	510
511	261 121	133 432 831	22,6053	7,9948	2,70842	1,95695	1 605,4	205 084	511
512	262 144	134 217 728	22,6274	8,0000	2,70927	1,95312	1 608,5	205 887	512
513	263 169	135 005 697	22,6495	8,0052	2,71012	1,94939	1 611,6	206 692	513
514	264 196	135 796 744	22,6716	8,0104	2,71096	1,94553	1 614,8	207 499	514
515	265 225	136 590 875	22,6936	8,0156	2,71181	1,94175	1 617,9	208 307	515
516	266 256	137 388 096	22,7156	8,0208	2,71265	1,93798	1 621,1	209 117	516
517	267 289	138 188 413	22,7376	8,0260	2,71349	1,93424	1 624,2	209 928	517
518	268 324	138 991 832	22,7596	8,0311	2,71433	1,93050	1 627,3	210 741	518
519	269 361	139 798 359	22,7816	8,0363	2,71517	1,92678	1 630,5	211 556	519
520	270 400	140 608 000	22,8035	8,0415	2,71600	1,92308	1 633,6	212 372	520
521	271 441	141 420 761	22,8254	8,0466	2,71684	1,91939	1 636,8	213 189	521
522	272 484	142 236 648	22,8473	8,0517	2,71767	1,91571	1 639,9	214 008	522
523	273 529	143 055 667	22,8692	8,0569	2,71850	1,91205	1 643,1	214 829	523
524	274 576	143 877 824	22,8910	8,0620	2,71933	1,90840	1 646,2	215 651	524
525	275 625	144 703 125	22,9129	8,0671	2,72016	1,90476	1 649,3	216 475	525
526	276 676	145 531 576	22,9347	8,0723	2,72099	1,90114	1 652,5	217 301	526
527	277 729	146 363 183	22,9565	8,0774	2,72181	1,89753	1 655,6	218 128	527
528	278 784	147 197 952	22,9783	8,0825	2,72263	1,89394	1 658,8	218 956	528
529	279 841	148 035 889	23,0000	8,0876	2,72346	1,89036	1 661,9	219 787	529
530	280 900	148 877 000	23,0217	8,0927	2,72428	1,88679	1 665,0	220 618	530

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
531	281 961	149 721 291	23,0434	8,0978	2,72509	1,88324	1 668,2	221 452	531
532	283 024	150 568 768	23,0651	8,1028	2,72591	1,87970	1 671,3	222 287	532
533	284 089	151 419 487	23,0868	8,1079	2,72673	1,87617	1 674,5	223 123	533
534	285 156	152 273 304	23,1084	8,1130	2,72754	1,87266	1 677,6	223 961	534
535	286 225	153 130 375	23,1301	8,1180	2,72835	1,86916	1 680,8	224 801	535
536	287 296	153 990 656	23,1517	8,1231	2,72916	1,86567	1 683,9	225 642	536
537	288 369	154 854 153	23,1733	8,1281	2,72997	1,86220	1 687,0	226 484	537
538	289 444	155 720 872	23,1948	8,1332	2,73078	1,85874	1 690,2	227 329	538
539	290 521	156 590 819	23,2164	8,1382	2,73159	1,85529	1 693,3	228 175	539
540	291 600	157 464 000	23,2379	8,1433	2,73239	1,85185	1 696,5	229 022	540
541	292 681	158 340 421	23,2594	8,1483	2,73320	1,84843	1 699,6	229 871	541
542	293 764	159 220 088	23,2809	8,1533	2,73400	1,84502	1 702,7	230 722	542
543	294 849	160 103 007	23,3024	8,1583	2,73480	1,84162	1 705,9	231 574	543
544	295 936	160 989 184	23,3238	8,1633	2,73560	1,83824	1 709,0	232 428	544
545	297 025	161 878 625	23,3452	8,1683	2,73640	1,83486	1 712,2	233 283	545
546	298 116	162 771 336	23,3666	8,1733	2,73719	1,83150	1 715,3	234 140	546
547	299 209	163 667 323	23,3880	8,1783	2,73799	1,82815	1 718,5	234 998	547
548	300 304	164 566 592	23,4094	8,1833	2,73878	1,82482	1 721,6	235 858	548
549	301 401	165 469 149	23,4307	8,1882	2,73957	1,82149	1 724,7	236 720	549
550	302 500	166 375 000	23,4521	8,1932	2,74036	1,81818	1 727,9	237 583	550
551	303 601	167 284 151	23,4734	8,1982	2,74115	1,81488	1 731,0	238 448	551
552	304 704	168 196 608	23,4947	8,2031	2,74194	1,81159	1 734,2	239 314	552
553	305 809	169 112 377	23,5160	8,2081	2,74273	1,80832	1 737,3	240 182	553
554	306 916	170 031 464	23,5372	8,2130	2,74351	1,80505	1 740,4	241 051	554
555	308 025	170 953 875	23,5584	8,2180	2,74429	1,80180	1 743,6	241 922	555
556	309 136	171 879 616	23,5797	8,2229	2,74507	1,79856	1 746,7	242 795	556
557	310 249	172 808 693	23,6008	8,2278	2,74586	1,79533	1 749,9	243 669	557
558	311 364	173 741 112	23,6220	8,2327	2,74663	1,79211	1 753,0	244 545	558
559	312 481	174 676 879	23,6432	8,2377	2,74741	1,78891	1 756,2	245 422	559
560	313 600	175 616 000	23,6643	8,2426	2,74819	1,78571	1 759,3	246 301	560
561	314 721	176 558 481	23,6854	8,2475	2,74896	1,78253	1 762,4	247 181	561
562	315 844	177 504 328	23,7065	8,2524	2,74974	1,77936	1 765,6	248 063	562
563	316 969	178 453 547	23,7276	8,2573	2,75051	1,77620	1 768,7	248 947	563
564	318 096	179 406 144	23,7487	8,2621	2,75128	1,77305	1 771,9	249 832	564
565	319 225	180 362 125	23,7697	8,2670	2,75205	1,76991	1 775,0	250 719	565
566	320 356	181 321 496	23,7908	8,2719	2,75282	1,76678	1 778,1	251 607	566
567	321 489	182 284 263	23,8118	8,2768	2,75358	1,76367	1 781,3	252 497	567
568	322 624	183 250 432	23,8328	8,2816	2,75435	1,76056	1 784,4	253 388	568
569	323 761	184 220 009	23,8537	8,2865	2,75511	1,75747	1 787,6	254 281	569
570	324 900	185 193 000	23,8747	8,2913	2,75587	1,75439	1 790,7	255 176	570

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
571	326 041	186 169 411	23,8956	8,2962	2,75664	1,75131	1 793,8	256 072	571
572	327 184	187 149 248	23,9165	8,3010	2,75740	1,74825	1 797,0	256 970	572
573	328 329	188 132 517	23,9374	8,3059	2,75815	1,74520	1 800,1	257 869	573
574	329 476	189 119 224	23,9583	8,3107	2,75891	1,74216	1 803,3	258 770	574
575	330 625	190 109 375	23,9792	8,3155	2,75967	1,73913	1 806,4	259 672	575
576	331 776	191 102 976	24,0000	8,3203	2,76042	1,73611	1 809,6	260 576	576
577	332 929	192 100 033	24,0208	8,3251	2,76118	1,73310	1 812,7	261 482	577
578	334 084	193 100 552	24,0416	8,3300	2,76193	1,73010	1 815,8	262 389	578
579	335 241	194 104 539	24,0624	8,3348	2,76268	1,72712	1 819,0	263 293	579
580	336 400	195 112 000	24,0832	8,3396	2,76343	1,72414	1 822,1	264 208	580
581	337 561	196 122 941	24,1039	8,3443	2,76418	1,72117	1 825,3	265 120	581
582	338 724	197 137 368	24,1247	8,3491	2,76492	1,71821	1 828,4	266 033	582
583	339 839	198 155 287	24,1454	8,3539	2,76567	1,71527	1 831,6	266 948	583
584	341 056	199 176 704	24,1661	8,3587	2,76641	1,71233	1 834,7	267 865	584
585	342 225	200 201 625	24,1868	8,3634	2,76716	1,70940	1 837,8	268 783	585
586	343 396	201 230 056	24,2074	8,3682	2,76790	1,70648	1 841,0	269 703	586
587	344 569	202 262 003	24,2281	8,3730	2,76864	1,70358	1 844,1	270 624	587
588	345 744	203 297 472	24,2487	8,3777	2,76938	1,70068	1 847,3	271 547	588
589	346 921	204 336 469	24,2693	8,3825	2,77012	1,69779	1 850,4	272 471	589
590	348 100	205 379 000	24,2899	8,3872	2,77085	1,69492	1 853,5	273 397	590
591	349 281	206 425 071	24,3105	8,3919	2,77159	1,69205	1 856,7	274 325	591
592	350 464	207 474 688	24,3311	8,3967	2,77232	1,68919	1 859,8	275 254	592
593	351 649	208 527 857	24,3516	8,4014	2,77305	1,68634	1 863,0	276 184	593
594	352 836	209 584 584	24,3721	8,4061	2,77379	1,68350	1 866,1	277 117	594
595	354 025	210 644 875	24,3926	8,4108	2,77452	1,68067	1 869,2	278 051	595
596	355 216	211 708 736	24,4131	8,4155	2,77525	1,67785	1 872,4	278 986	596
597	356 409	212 776 173	24,4336	8,4202	2,77597	1,67504	1 875,5	279 923	597
598	357 604	213 847 192	24,4540	8,4249	2,77670	1,67224	1 878,7	280 862	598
599	358 801	214 921 799	24,4745	8,4296	2,77743	1,66945	1 881,8	281 802	599
600	360 000	216 000 000	24,4949	8,4343	2,77815	1,66667	1 885,0	282 743	600
601	361 201	217 081 801	24,5153	8,4390	2,77887	1,66389	1 888,1	283 687	601
602	362 404	218 167 208	24,5357	8,4437	2,77960	1,66113	1 891,2	284 631	602
603	363 609	219 256 227	24,5561	8,4484	2,78032	1,65837	1 894,4	285 578	603
604	364 816	220 348 864	24,5764	8,4530	2,78104	1,65563	1 897,5	286 526	604
605	366 025	221 445 125	24,5967	8,4577	2,78176	1,65289	1 900,7	287 475	605
606	367 236	222 545 016	24,6171	8,4623	2,78424	1,65017	1 903,8	288 426	606
607	368 449	223 648 543	24,6374	8,4670	2,78319	1,64745	1 906,9	289 379	607
608	369 664	224 755 712	24,6577	8,4716	2,78390	1,64474	1 910 1	290 333	608
609	370 881	225 866 529	24,6779	8,4763	2,78462	1,64204	1 913,2	291 289	609
610	372 100	226 981 000	24,6982	8,4809	2,78533	1,63934	1 916,4	292 247	610

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
611	373 321	228 099 131	24,7184	8,4856	2,78604	1,63666	1 919,5	293 206	611
612	374 544	229 220 928	24,7386	8,4902	2,78675	1,63399	1 922,7	294 166	612
613	375 769	230 346 397	24,7588	8,4948	2,78746	1,63132	1 925,8	295 128	613
614	376 996	231 475 544	24,7790	8,4994	2,78817	1,62866	1 928,9	296 092	614
615	378 225	232 608 375	24,7992	8,5040	2,78888	1,62602	1 932,1	297 057	615
616	379 456	233 744 896	24,8193	8,5086	2,78958	1,62338	1 935,2	298 024	616
617	380 689	234 885 113	24,8395	8,5132	2,79029	1,62075	1 938,4	298 992	617
618	381 924	236 029 032	24,8596	8,5178	2,79099	1,61812	1 941,5	299 962	618
619	383 161	237 176 659	24,8797	8,5224	2,79169	1,61551	1 944,6	300 934	619
620	384 400	238 328 000	24,8998	8,5270	2,79239	1,61290	1 947,8	301 907	620
621	385 641	239 483 061	24,9199	8,5316	2,79309	1,61031	1 950,9	302 882	621
622	386 884	240 641 848	24,9399	8,5362	2,79379	1,60772	1 954,1	303 858	622
623	388 129	241 804 367	24,9600	8,5408	2,79449	1,60514	1 957,2	304 836	623
624	389 376	242 970 624	24,9800	8,5453	2,79518	1,60256	1 960,4	305 815	624
625	390 625	244 140 625	25,0000	8,5499	2,79588	1,60000	1 963,5	306 796	625
626	391 876	245 314 376	25,0200	8,5544	2,79657	1,59744	1 966,6	307 779	626
627	393 129	246 491 883	25,0400	8,5590	2,79727	1,59490	1 969,8	308 763	627
628	394 384	247 673 152	25,0599	8,5635	2,79796	1,59236	1 972,9	309 748	628
629	395 641	248 858 189	25,0799	8,5681	2,79865	1,58983	1 976,1	310 736	629
630	396 900	250 047 000	25,0998	8,5726	2,79934	1,58730	1 979,2	311 725	630
631	398 161	251 239 591	25,1197	8,5772	2,80003	1,58479	1 982,3	312 715	631
632	399 424	252 435 968	25,1396	8,5817	2,80072	1,58228	1 985,5	313 707	632
633	400 689	253 636 137	25,1596	8,5862	2,80140	1,57978	1 988,6	314 700	633
634	401 956	254 840 104	25,1794	8,5907	2,80209	1,57729	1 991,8	315 696	634
635	403 225	256 047 875	25,1992	8,5952	2,80277	1,57480	1 994,9	316 692	635
636	404 496	257 259 456	25,2190	8,5997	2,80345	1,57233	1 998,1	317 690	636
637	405 769	258 474 853	25,2389	8,6043	2,80414	1,56986	2 001,2	318 690	637
638	407 044	259 694 072	25,2587	8,6088	2,80482	1,56740	2 004,3	319 692	638
639	408 321	260 917 119	25,2784	8,6132	2,80550	1,56495	2 007,5	320 695	639
640	409 600	262 144 000	25,2982	8,6177	2,80618	1,56250	2 010,6	321 699	640
641	410 881	263 374 721	25,3180	8,6222	2,80686	1,56006	2 013,6	322 705	641
642	412 164	264 609 288	25,3377	8,6267	2,80754	1,55763	2 016,9	323 713	642
643	413 449	265 847 707	25,3574	8,6312	2,80821	1,55521	2 020,0	324 722	643
644	414 736	267 089 984	25,3772	8,6357	2,80389	1,55280	2 023,2	325 733	644
645	416 025	268 336 125	25,3969	8,6401	2,80956	1,55039	2 026,3	326 745	645
646	417 316	269 586 136	25,4165	8,6446	2,81023	1,54799	2 029,5	327 759	646
647	418 609	270 840 023	25,4362	8,6490	2,81090	1,54560	2 032,6	328 775	647
648	419 904	272 097 792	25,4558	8,6535	2,81158	1,54321	2 035,8	329 792	648
649	421 201	273 359 449	25,4755	8,6579	2,81224	1,54083	2 038,9	330 810	649
650	422 500	274 625 000	25,4951	8,6624	2,81291	1,53846	2 042,0	331 631	650

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
651	423 801	275 894 451	25,5147	8,6668	2,81358	1,53610	2 045,2	332 853	651
652	425 104	277 167 808	25,5343	8,6713	2,81425	1,53374	2 048,3	333 876	652
653	426 409	278 445 077	25,5539	8,6757	2,81419	1,53139	2 051,5	334 901	653
654	427 716	279 726 264	25,5734	8,6801	2,81558	1,52905	2 054,6	335 927	654
655	429 025	281 011 375	25,5930	8,6845	2,81624	1,52672	2 057,7	336 955	655
656	430 336	282 300 416	25,6125	8,6890	2,81690	1,52439	2 060,9	337 985	656
657	431 649	283 593 393	25,6320	8,6934	2,81757	1,52207	2 064,0	339 016	657
658	432 964	284 890 312	25,6515	8,6978	2,81823	1,51976	2 067,0	340 049	658
659	434 281	286 191 179	25,6710	8,7022	2,81889	1,51745	2 070,3	341 084	659
660	435 600	287 496 000	25,6905	8,7066	2,81954	1,51515	2 073,5	342 119	660
661	436 921	288 804 781	25,7099	8,7110	2,82020	1,51286	2 076,6	343 157	661
662	438 244	290 117 528	25,7294	8,7154	2,82086	1,51057	2 079,7	344 196	662
663	439 569	291 434 247	25,7488	8,7198	2,82151	1,50830	2 082,9	345 237	663
664	440 896	292 754 944	25,7682	8,7241	2,82217	1,50602	2 086,0	346 279	664
665	442 225	294 079 625	25,7876	8,7285	2,82282	1,50376	2 089,2	347 323	665
666	443 556	295 408 296	25,8070	8,7329	2,82347	1,50150	2 092,3	348 368	666
667	444 889	296 740 963	25,8263	8,7373	2,82413	1,49925	2 095,4	349 415	667
668	446 224	298 077 632	25,8457	8,7416	2,82478	1,49701	2 098,6	350 464	668
669	447 561	299 418 309	25,8650	8,7460	2,82543	1,49477	2 101,7	351 514	669
670	448 900	300 763 000	25,8844	8,7503	2,82607	1,49254	2 104,9	352 565	670
671	450 241	302 171 711	25,9027	8,7547	2,82672	1,49031	2 108,0	353 618	671
672	451 584	303 464 448	25,9230	8,7590	2,82737	1,48810	2 111,2	354 673	672
673	452 929	304 821 217	25,9422	8,7634	2,82802	1,48588	2 114,3	355 780	673
674	454 276	306 182 024	25,9615	8,7677	2,82866	1,48368	2 117,4	356 788	674
675	455 625	307 546 875	25,9808	8,7721	2,82930	1,48148	2 120,6	357 847	675
676	456 970	308 915 776	26,0000	8,7764	2,82995	1,47929	2 123,7	358 908	676
677	458 329	310 288 733	26,0192	8,7807	2,83059	1,47710	2 126,9	359 971	677
678	459 684	311 665 752	26,0384	8,7850	2,83123	1,47493	2 130,0	361 035	678
679	461 041	313 046 839	26,0576	8,7893	2,83187	1,47275	2 133,1	362 101	679
680	462 400	314 432 000	26,0768	8,7937	2,83251	1,47059	2 136,3	363 168	680
681	463 761	315 821 241	26,0960	8,7980	2,83315	1,46843	2 139,4	364 237	681
682	465 124	317 214 568	26,1151	8,8023	2,83373	1,46628	2 142,6	365 308	682
683	466 489	318 611 987	26,1343	8,8066	2,83442	1,46413	2 145,7	366 380	683
684	467 856	320 013 504	26,1534	8,8109	2,83506	1,46199	2 148,8	367 453	684
685	469 225	321 419 125	26,1725	8,8152	2,83569	1,45985	2 152,0	368 528	685
686	470 596	322 828 856	26,1916	8,8194	2,83632	1,45773	2 155,1	369 605	686
687	471 969	324 242 703	26,2107	8,8237	2,83996	1,45560	2 158,3	370 684	687
688	473 344	325 660 672	26,2298	8,8280	2,83759	1,45349	2 161,4	371 764	688
689	474 721	327 082 769	26,2488	8,8323	2,83822	1,45138	2 164,6	372 845	689
690	476 100	328 509 000	26,2679	8,8366	2,83885	1,44928	2 167,7	373 928	690

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
691	477 481	329 939 371	26,2869	8,8408	2,83948	1,44718	2 170,8	375 013	691
692	478 864	331 373 888	26,3059	8,8451	2,84011	1,44509	2 174,0	376 099	692
693	480 249	332 812 557	26,3249	8,8493	2,84073	1,44300	2 177,1	377 187	693
694	481 636	334 255 384	26,3439	8,8536	2,84136	1,44092	2 180,3	378 276	694
695	483 025	335 702 375	26,3629	8,8578	2,84198	1,43885	2 183,4	379 367	695
696	484 416	337 153 536	26,3818	8,8621	2,84261	1,43678	2 186,5	380 459	696
697	485 809	338 608 873	26,4008	8,8663	2,84323	1,43472	2 189,7	381 553	697
698	487 204	340 068 392	26,4197	8,8706	2,84386	1,43266	2 192,8	382 645	698
699	488 601	341 532 099	26,4386	8,8748	2,84448	1,43062	2 196,0	383 746	699
700	490 000	343 000 000	26,4575	8,8790	2,84510	1,42857	2 199,1	384 845	700
701	491 401	344 472 101	26,4764	8,8833	2,84572	1,42653	2 202,3	385 945	701
702	492 804	345 948 408	26,4953	8,8875	2,84634	1,42450	2 205,4	387 047	702
703	494 209	347 428 927	26,5141	8,8917	2,84696	1,42248	2 208,5	388 151	703
704	495 616	348 913 664	26,5330	8,8959	2,84757	1,42045	2 211,7	389 256	704
705	497 025	350 402 625	26,5518	8,9001	2,84819	1,41844	2 214,8	390 363	705
706	498 436	351 895 816	26,5707	8,9043	2,84880	1,41643	2 218,0	391 471	706
707	499 849	353 393 243	26,5895	8,9085	2,84942	1,41443	2 221,1	392 580	707
708	501 264	354 894 912	26,6083	8,9127	2,85003	1,41243	2 224,2	393 692	708
709	502 681	356 400 829	26,6271	8,9169	2,85065	1,41044	2 227,4	394 805	709
710	504 100	357 911 000	26,6458	8,9211	2,85126	1,40845	2 230,5	395 919	710
711	505 521	359 425 431	26,6646	8,9253	2,85187	1,40647	2 233,7	397 035	711
712	506 944	360 944 128	26,6833	8,9295	2,85248	1,40449	2 236,8	398 153	712
713	508 369	362 467 097	26,7021	8,9337	2,85309	1,40252	2 240,0	399 272	713
714	509 796	363 994 344	26,7208	8,9378	2,85370	1,40056	2 243,1	400 393	714
715	511 225	365 525 875	26,7395	8,9420	2,85431	1,39860	2 246,2	401 515	715
716	512 656	367 061 696	26,7582	8,9462	2,85491	1,39665	2 249,4	402 639	716
717	514 089	368 601 813	26,7769	8,9503	2,85552	1,39470	2 252,5	403 765	717
718	515 524	370 146 232	26,7955	8,9545	2,85612	1,39276	2 255,7	404 892	718
719	516 961	371 694 959	26,8142	8,9587	2,85673	1,39082	2 258,8	406 020	719
720	518 400	373 248 000	26,8328	8,9628	2,85733	1,38889	2 261,9	407 150	720
721	519 841	374 805 361	26,8514	8,9670	2,85794	1,38696	2 265,1	408 282	721
722	521 284	376 367 048	26,8701	8,9711	2,85854	1,38504	2 268,2	409 415	722
723	522 729	377 933 067	26,8887	8,9752	2,85914	1,38313	2 271,4	410 550	723
724	524 176	379 503 424	26,9072	8,9794	2,85974	1,38122	2 274,5	411 687	724
725	525 625	381 078 125	26,9258	8,9835	2,86034	1,37931	2 277,7	412 825	725
726	527 076	382 657 176	26,9444	8,9876	2,86094	1,37741	2 280,8	413 965	726
727	528 529	384 240 583	26,9629	8,9918	2,86153	1,37552	2 283,9	415 106	727
728	529 984	385 828 352	26,9815	8,9959	2,86213	1,37363	2 287,1	416 248	728
729	531 441	387 420 489	27,0000	9,0000	2,86273	1,37174	2 290,2	417 393	729
730	532 900	389 017 000	27,0185	9,0941	2,86332	1,36986	2 293,4	418 539	730

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
731	534 361	390 617 891	27,0370	9,0082	2,86392	1,36799	2 296,5	419 686	731
732	535 824	392 223 168	27,0555	9,0123	2,86451	1,36612	2 299,6	420 835	732
733	537 289	393 832 837	27,0740	9,0164	2,86510	1,36426	2 302,8	421 986	733
734	538 756	395 446 904	27,0924	9,0205	2,86570	1,36240	2 305,9	423 138	734
735	540 225	397 065 375	27,1109	9,0246	2,86629	1,36054	2 309,1	424 293	735
736	541 696	398 688 256	27,1293	9,0287	2,86688	1,35870	2 312,2	425 447	736
737	543 169	400 315 553	27,1477	9,0328	2,86747	1,35685	2 315,4	426 604	737
738	544 644	401 947 272	27,1662	9,0369	2,86806	1,35501	2 318,5	427 762	738
739	546 121	403 583 419	27,1846	9,0410	2,86864	1,35318	2 321,6	428 922	739
740	547 600	405 224 000	27,2029	9,0450	2,86923	1,35135	2 324,8	430 084	740
741	549 081	406 869 021	27,2213	9,0491	2,86982	1,34953	2 327,9	431 247	741
742	550 564	408 518 488	27,2397	9,0532	2,87040	1,34771	2 331,1	432 412	742
743	552 049	410 172 407	27,2580	9,0572	2,87099	1,34590	2 334,2	433 578	743
744	553 536	411 830 784	27,2764	9,0613	2,87157	1,34409	2 337,3	434 746	744
745	555 025	413 493 625	27,2947	9,0654	2,87216	1,34228	2 340,5	435 916	745
746	556 516	415 160 936	27,3130	9,0694	2,87274	1,34048	2 343,6	437 087	746
747	558 009	416 832 723	27,3313	9,0735	2,87322	1,33869	2 346,8	438 259	747
748	559 504	418 508 992	27,3496	9,0775	2,87390	1,33690	2 349,9	439 433	748
749	561 001	420 189 749	27,3679	9,0818	2,87448	1,33511	2 353,1	440 609	749
750	562 500	421 875 000	27,3861	9,0856	2,87506	1,33333	2 356,2	441 786	750
751	564 001	423 564 751	27,4044	9,0896	2,87564	1,33156	2 359,3	442 965	751
752	565 504	425 259 008	27,4226	9,0937	2,87622	1,32979	2 362,5	444 146	752
753	567 009	426 957 777	27,4408	9,0977	2,87679	1,32802	2 365,6	445 328	753
754	568 516	428 661 064	27,4591	9,1017	2,87737	1,32626	2 368,8	446 511	754
755	570 025	430 368 875	27,4773	9,1057	2,87795	1,32450	2 371,9	447 697	755
756	571 536	432 081 216	27,4955	9,1098	2,87852	1,32275	2 375,0	448 883	756
757	573 049	433 798 093	27,5136	9,1138	2,87910	1,32100	2 378,2	450 072	757
758	574 564	435 519 512	27,5318	9,1178	2,87967	1,31926	2 381,3	451 262	758
759	576 081	437 245 479	27,5500	9,1218	2,88024	1,31752	2 384,5	452 453	759
760	577 600	438 976 000	27,5681	9,1258	2,88081	1,31579	2 387,6	453 646	760
761	579 121	440 711 081	27,5862	9,1298	2,88138	1,31406	2 390,8	454 841	761
762	580 644	442 450 728	27,6043	9,1338	2,88195	1,31234	2 393,9	456 037	762
763	582 169	444 194 947	27,6225	9,1378	2,88252	1,31062	2 397,0	457 234	763
764	583 696	445 943 744	27,6405	9,1418	2,88309	1,30890	2 400,0	458 434	764
765	585 225	447 697 125	27,6586	9,1458	2,88366	1,30719	2 403,3	459 635	765
766	586 756	449 455 096	27,6767	9,1498	2,88423	1,30548	2 406,5	460 837	766
767	588 289	451 217 663	27,6948	9,1537	2,88480	1,30378	2 409,6	462 041	767
768	589 824	452 984 832	27,7128	9,1577	2,88536	1,30208	2 412,7	463 247	768
769	591 361	454 756 609	27,7308	9,1617	2,88593	1,30039	2 415,9	464 454	769
770	592 900	456 533 000	27,7489	9,1657	2,88649	1,29870	2 419,0	465 663	770

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
771	594 441	458 314 011	27,7669	9,1696	2,88705	1,29702	2 422,2	466 873	771
772	595 984	460 099 648	27,7849	9,1736	2,88762	1,29534	2 425,3	468 085	772
773	597 529	461 889 917	27,8029	9,1775	2,88818	1,29366	2 428,5	469 298	773
774	599 076	463 684 824	27,8209	9,1815	2,88874	1,29199	2 431,6	470 513	774
775	600 625	465 484 375	27,8388	9,1855	2,88930	1,29032	2 434,7	471 730	775
776	602 176	467 288 576	27,8568	9,1894	2,88986	1,28866	2 437,9	472 948	776
777	603 729	469 097 433	27,8747	9,1933	2,89042	1,28700	2 441,0	474 168	777
778	605 284	470 910 952	27,8927	9,1973	2,89098	1,28535	2 444,2	475 389	778
779	606 841	472 729 139	27,9106	9,2012	2,89154	1,28370	2 447,3	476 612	779
780	608 400	474 552 000	27,9285	9,2052	2,89209	1,28205	2 450,4	477 836	780
781	609 961	476 379 541	27,9464	9,2091	2,89265	1,28041	2 453,6	479 062	781
782	611 524	478 211 768	27,9643	9,2130	2,89321	1,27877	2 456,7	480 290	782
783	613 089	480 048 687	27,9821	9,2170	2,89376	1,27714	2 459,9	481 519	783
784	614 656	481 890 304	28,0000	9,2209	2,89432	1,27551	2 463,0	482 750	784
785	616 225	483 736 625	28,0179	9,2248	2,89487	1,27389	2 466,2	483 982	785
786	617 796	485 587 656	28,0357	9,2287	2,89542	1,27226	2 469,3	485 216	786
787	619 369	487 443 403	28,0535	9,2326	2,89597	1,27065	2 472,4	486 451	787
788	620 944	489 303 872	28,0713	9,2365	2,89653	1,26904	2 475,6	487 688	788
789	622 521	491 169 069	28,0891	9,2404	2,89708	1,26743	2 478,7	488 927	789
790	624 100	493 039 000	28,1069	9,2443	2,89763	1,26582	2 481,9	490 167	790
791	625 681	494 913 671	28,1247	9,2482	2,89818	1,26422	2 485,0	491 409	791
792	627 264	496 793 088	28,1425	9,2521	2,89873	1,26263	2 488,1	492 652	792
793	628 849	498 677 257	28,1603	9,2560	2,89927	1,26103	2 491,3	493 897	793
794	630 436	500 566 184	28,1780	9,2599	2,89982	1,25945	2 494,4	495 143	794
795	632 025	502 459 875	28,1957	9,2638	2,90037	1,25786	2 497,6	496 391	795
796	633 616	504 358 336	28,2135	9,2677	2,90091	1,25628	2 500,7	497 641	796
797	635 209	506 261 573	28,2312	9,2716	2,90146	1,25471	2 503,8	498 892	797
798	636 804	508 169 592	28,2489	9,2754	2,90200	1,25313	2 507,0	500 145	798
799	638 401	510 082 399	28,2666	9,2793	2,90255	1,25156	2 510,1	501 399	799
800	640 000	512 000 000	28,2843	9,2832	2,90309	1,25000	2 513,3	502 655	800
801	641 601	513 922 401	28,3019	9,2870	2,90363	1,24844	2 516,4	503 912	801
802	643 204	515 849 608	28,3196	9,2909	2,90417	1,24688	2 519,6	505 171	802
803	644 809	517 781 627	28,3373	9,2948	2,90472	1,24533	2 522,7	506 432	803
804	646 416	519 718 464	28,3549	9,2986	2,90526	1,24378	2 525,8	507 694	804
805	648 025	521 660 125	28,3725	9,3025	2,90580	1,24224	2 529,0	508 958	805
806	649 636	523 606 616	28,3901	9,3063	2,90634	1,24069	2 532,1	510 223	806
807	651 249	525 557 943	28,4077	9,3102	2,90687	1,23916	2 535,3	511 490	807
808	652 864	527 514 112	28,4253	9,3140	2,90741	1,23762	2 538,4	512 758	808
809	654 481	529 475 129	28,4429	9,3179	2,90795	1,23609	2 541,5	514 028	809
810	656 100	531 441 000	28,4605	9,3217	2,90849	1,23457	2 544,7	515 300	810

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
811	657 721	533 411 731	28,4781	9,3255	2,90902	1,23305	2 547,8	516 573	811
812	659 344	535 387 328	28,4956	9,3294	2,90956	1,23153	2 551,0	517 848	812
813	660 969	537 367 797	28,5132	9,3332	2,91009	1,23001	2 554,1	519 124	813
814	662 596	539 353 144	28,5307	9,3370	2,91062	1,22850	2 557,3	520 402	814
815	664 225	541 343 375	28,5482	9,3408	2,91116	1,22699	2 560,4	521 681	815
816	665 856	543 338 496	28,5657	9,3447	2,91169	1,22549	2 563,5	522 962	816
817	667 489	545 338 513	28,5832	9,3485	2,91222	1,22399	2 566,7	524 245	817
818	669 124	547 343 432	28,6007	9,3523	2,91275	1,22249	2 569,8	525 529	818
819	670 761	549 353 259	28,6182	9,3561	2,91328	1,22100	2 573,0	526 814	819
820	672 400	551 368 000	28,6356	9,3599	2,91381	1,21951	2 576,1	528 102	820
821	674 041	553 387 661	28,6531	9,3637	2,91434	1,21803	2 579,2	529 391	821
822	675 684	555 412 248	28,6705	9,3675	2,91487	1,21655	2 582,4	530 681	822
823	677 329	557 441 767	28,6880	9,3713	2,91540	1,21507	2 585,5	531 973	823
824	678 976	559 476 224	28,7054	9,3751	2,91593	1,21359	2 588,7	533 267	824
825	680 625	561 515 625	28,7228	9,3789	2,91645	1,21212	2 591,8	534 562	825
826	682 276	563 559 976	28,7402	9,3827	2,91698	1,21065	2 595,0	535 858	826
827	683 929	565 609 283	28,7576	9,3865	2,91751	1,20919	2 598,1	537 157	827
828	685 584	567 663 552	28,7750	9,3902	2,91803	1,20773	2 601,2	538 456	828
829	687 241	569 722 780	28,7924	9,3940	2,81855	1,20627	2 604,4	539 758	829
830	688 900	571 787 000	28,8097	9,3978	2,91908	1,20482	2 607,5	541 061	830
831	690 561	573 856 191	28,8271	9,4016	2,91960	1,20337	2 610,7	542 365	831
832	692 224	575 930 368	28,8444	9,4053	2,92012	1,20192	2 613,8	543 671	832
833	693 889	578 009 537	28,8617	9,4091	2,92065	1,20048	2 616,9	544 979	833
834	695 556	580 093 704	28,8791	9,4129	2,92117	1,19904	2 620,1	546 288	834
835	697 225	582 182 875	28,8964	9,4166	2,92169	1,19760	2 623,2	547 599	835
836	698 896	584 277 056	28,9137	9,4204	2,92221	1,19617	2 626,4	548 912	836
837	700 569	586 376 253	28,9310	9,4241	2,92273	1,19474	2 629,5	550 226	837
838	702 244	588 480 472	28,9482	9,4279	2,92324	1,19332	2 632,7	551 541	838
839	703 921	590 589 719	28,9655	9,4316	2,92376	1,19190	2 635,8	552 858	839
840	705 600	592 704 000	28,9828	9,4354	2,92428	1,19048	2 638,9	554 177	840
841	707 281	594 823 321	29,0000	9,4391	2,92480	1,18906	2 642,1	555 497	841
842	708 964	596 947 688	29,0172	9,4429	2,92531	1,18765	2 645,2	556 819	842
843	710 649	599 077 107	29,0345	9,4466	2,92583	1,18624	2 648,4	558 142	843
844	712 336	601 211 584	29,0517	9,4503	2,92634	1,18483	2 651,5	559 467	844
845	714 025	603 351 125	29,0689	9,4541	2,92686	1,18343	2 654,6	560 794	845
846	715 716	605 495 736	29,0861	9,4578	2,92737	1,18203	2 657,8	562 122	846
847	717 409	607 645 423	29,1033	9,4615	2,92788	1,18064	2 660,9	563 452	847
848	719 104	609 800 192	29,1204	9,4652	2,92840	1,17925	2 664,1	564 783	848
849	720 801	611 960 049	29,1376	9,4690	2,92891	1,17786	2 667,2	566 116	849
850	722 500	614 125 000	29,1548	9,4727	2,92942	1,17647	2 670,4	567 450	850

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
851	724 201	616 295 051	29,1719	9,4764	2,92993	1,17509	2 673,5	568 786	851
852	725 904	618 470 208	29,1890	9,4801	2,93044	1,17371	2 676,6	570 124	852
853	727 609	620 650 477	29,2062	9,4838	2,93095	1,17233	2 679,8	571 463	853
854	729 316	622 835 864	29,2233	9,4875	2,93146	1,17096	2 682,9	572 803	854
855	731 025	625 026 375	29,2404	9,4912	2,93197	1,16959	2 686,1	574 146	855
856	732 736	627 222 016	29,2575	9,4949	2,93247	1,16822	2 689,2	575 490	856
857	734 449	629 422 793	29,2746	9,4986	2,93298	1,16686	2 692,3	576 835	857
858	736 164	631 628 712	29,2916	9,5023	2,93349	1,16550	2 695,5	578 182	858
859	737 881	633 839 779	29,3087	9,5060	2,93399	1,16414	2 698,6	579 530	859
860	739 600	636 056 000	29,3258	9,5097	2,93450	1,16279	2 701,8	580 880	860
861	741 321	638 277 381	29,3428	9,5134	2,93500	1,16144	2 704,9	582 232	861
862	743 044	640 503 928	29,3598	9,5171	2,93551	1,16009	2 708,1	583 585	862
863	744 769	642 735 647	29,3769	9,5207	2,93601	1,15875	2 711,2	584 940	863
864	746 496	644 972 544	29,3939	9,5244	2,93651	1,15741	2 714,3	586 297	864
865	748 225	647 214 625	29,4109	9,5281	2,93702	1,15607	2 717,5	587 655	865
866	749 956	649 461 896	29,4279	9,5317	2,93752	1,15473	2 720,6	589 014	866
867	751 689	651 714 363	29,4449	9,5354	2,93802	1,15340	2 723,8	590 375	867
868	753 424	653 972 032	29,4618	9,5391	2,93852	1,15207	2 726,9	591 738	868
869	755 161	656 234 909	29,4788	9,5427	2,93902	1,15075	2 730,0	593 102	869
870	756 900	658 503 000	29,4958	9,5464	2,93952	1,14943	2 733,2	594 468	870
871	758 641	660 776 311	29,5127	9,5501	2,94002	1,14911	2 736,3	595 835	871
872	760 384	663 054 848	29,5296	9,5537	2,94052	1,14679	2 739,5	597 204	872
873	762 129	665 338 617	29,5466	9,5574	2,94101	1,14548	2 742,6	598 575	873
874	763 876	667 627 624	29,5635	9,5610	2,94151	1,14416	2 745,8	599 947	874
875	765 625	669 221 875	29,5804	9,5647	2,94201	1,14286	2 748,9	601 320	875
876	767 376	672 221 376	29,5973	9,5683	2,94250	1,14155	2 752,0	602 696	876
877	769 129	674 526 133	29,6142	9,5719	2,94300	1,14025	2 755,2	604 073	877
878	770 884	676 836 152	29,6311	9,5756	2,94349	1,13895	2 758,3	605 451	878
879	772 641	679 151 439	29,6479	9,5792	2,94399	1,13766	2 761,5	606 831	879
880	774 400	681 472 000	29,6648	9,5828	2,94448	1,13636	2 764,6	608 212	880
881	776 161	683 797 841	29,6816	9,5865	2,94498	1,13507	2 767,7	609 595	881
882	777 924	686 128 968	29,6985	9,5901	2,94547	1,13379	2 770,9	610 980	882
883	779 689	688 465 387	29,7153	9,5937	2,94596	1,13250	2 774,0	612 366	883
884	781 456	690 807 104	29,7321	9,5973	2,94645	1,13122	2 777,2	613 754	884
885	783 225	693 154 125	29,7489	9,6010	2,94694	1,12994	2 780,3	615 143	885
886	784 996	695 506 456	29,7658	9,6046	2,94743	1,12867	2 783,5	616 534	886
887	786 769	697 864 103	29,7825	9,6082	2,94792	1,12740	2 786,6	617 927	887
888	788 544	700 227 072	29,7993	9,6118	2,94841	1,12613	2 789,7	619 321	888
889	790 321	702 595 369	29,8161	9,6154	2,94890	1,12486	2 792,9	620 717	889
890	792 100	704 969 000	29,8329	9,6190	2,94939	1,12360	2 796,0	622 114	890

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
891	793 881	707 347 971	29,8496	9,6226	2,94988	1,12233	2 799,2	623 513	891
892	795 664	709 732 288	29,8664	9,6262	2,95036	1,12108	2 802,3	624 913	892
893	797 449	712 121 957	29,8831	9,6298	2,95085	1,11982	2 805,4	626 315	893
894	799 236	714 516 984	29,8998	9,6334	2,95134	1,11857	2 808,6	627 718	894
895	801 025	716 917 375	29,9166	9,6370	2,95182	1,11732	2 811,7	629 124	895
896	802 816	719 323 136	29,9333	9,6406	2,95231	1,11607	2 814,9	630 530	896
897	804 609	721 734 273	29,9500	9,6442	2,95279	1,11483	2 818,0	631 938	897
898	806 404	724 150 792	29,9666	9,6477	2,95328	1,11359	2 821,2	633 348	898
899	808 201	726 572 699	29,9833	9,6513	2,95376	1,11235	2 824,3	634 760	899
900	810 000	729 000 000	30,0000	9,6549	2,95424	1,11111	2 827,4	636 173	900
901	811 801	731 432 701	30,0167	9,6585	2,95472	1,10988	2 830,6	637 587	901
902	813 604	733 870 808	30,0333	9,6620	2,95521	1,10865	2 833,7	639 003	902
903	815 409	736 314 327	30,0500	9,6656	2,95569	1,10742	2 836,9	640 421	903
904	817 216	738 763 264	30,0666	9,6692	2,95617	1,10619	2 840,0	641 840	904
905	819 025	741 217 625	30,0832	9,6727	2,95665	1,10497	2 843,1	643 261	905
906	820 836	743 677 416	30,0998	9,6763	2,95713	1,10375	2 846,3	644 683	906
907	822 649	746 142 643	30,1164	9,6799	2,95761	1,10254	2 849,4	646 107	907
908	824 464	748 613 312	30,1330	9,6834	2,95809	1,10132	2 852,6	647 533	908
909	826 281	751 089 429	30,1496	9,6870	2,95856	1,10011	2 855,7	648 960	909
910	828 100	753 571 000	30,1662	9,6905	2,95904	1,09890	2 858,8	650 388	910
911	829 921	756 058 031	30,1828	9,6941	2,95952	1,09796	2 862,0	651 818	911
912	831 744	758 550 528	30,1993	9,6976	2,95999	1,09649	2 865,1	653 250	912
913	833 569	761 048 497	30,2159	9,7012	2,96047	1,09529	2 868,3	654 684	913
914	835 396	763 551 944	30,2324	9,7047	2,96095	1,09409	2 871,4	656 118	914
915	837 225	766 060 875	30,2490	9,7082	2,96142	1,09290	2 874,6	657 555	915
916	839 056	768 575 296	30,2655	9,7118	2,96190	1,09170	2 877,7	658 993	916
917	840 889	771 095 213	30,2820	9,7153	2,96237	1,09051	2 880,8	660 433	917
918	842 724	773 620 632	30,2985	9,7188	2,96284	1,08932	2 884,0	661 874	918
919	844 561	776 151 559	30,3150	9,7224	2,96332	1,08814	2 887,1	663 317	919
920	846 400	778 688 000	30,3315	9,7259	2,96379	1,08696	2 890,3	664 761	920
921	848 241	781 229 961	30,3480	9,7294	2,96426	1,08578	2 893,4	666 207	921
922	850 084	783 777 448	30,3645	9,7329	2,96473	1,08460	2 896,5	667 654	922
923	851 929	786 330 467	30,3809	9,7364	2,96520	1,08342	2 899,7	669 103	923
924	853 776	788 889 024	30,3974	9,7400	2,96567	1,08225	2 902,8	670 554	924
925	855 625	791 453 125	30,4138	9,7435	2,96614	1,08108	2 906,0	672 006	925
926	857 476	794 022 776	30,4302	9,7470	2,96661	1,07991	2 909,1	673 460	926
927	859 329	796 597 983	30,4467	9,7505	2,96708	1,07875	2 912,3	674 915	927
928	861 184	799 178 752	30,4631	9,7540	2,96755	1,07759	2 915,4	676 372	928
929	863 041	801 765 089	30,4795	9,7575	2,96802	1,07643	2 918,5	677 831	929
930	864 900	804 357 000	30,4959	9,7610	2,96848	1,07527	2 921,7	679 291	930

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	lg n	$\frac{1\,000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
931	866 761	806 954 491	30,5123	9,7645	2,96895	1,07411	2 924,8	680 752	931
932	868 624	809 557 568	30,5287	9,7680	2,96942	1,07296	2 928,0	682 216	932
933	870 489	812 166 237	30,5450	9,7715	2,96988	1,07181	2 931,1	683 680	933
934	872 356	814 780 504	30 5614	9,7750	2,97035	1,07066	2 934,2	685 147	934
935	874 225	817 400 375	30,5778	9,7785	2,97081	1,06952	2 937,4	686 615	935
936	876 096	820 025 856	30,5941	9,7819	2,97128	1,06838	2 940,5	688 084	936
937	877 969	822 656 953	30,6105	9,7854	2,97174	1,06724	2 943,7	689 555	937
938	879 844	825 293 672	30,6268	9,7889	2,97220	1,06610	2 946,8	691 028	938
939	881 721	827 936 019	30,6431	9,7924	2,97267	1,06496	2 950,0	692 502	939
940	883 600	830 584 000	30,6594	9,7959	2,97313	1,06383	2 953,1	693 978	940
941	885 481	833 237 621	30,6757	9,7993	2,97359	1,06270	2 956,2	6 95 455	941
942	887 364	835 896 888	30,6920	9,8028	2,97405	1,06157	2 959,4	6 96 934	942
943	889 249	838 561 807	30,7083	9,8063	2,97451	1,06045	2 962,5	698 415	943
944	891 136	841 232 384	30,7246	9,8097	2,97497	1,05932	2 965,7	699 897	944
945	893 025	843 908 625	30,7409	9,8132	2,97543	1,05820	2 968,8	701 380	945
946	894 916	846 590 536	30,7571	9,8167	2,97589	1,05708	2 971,9	702 865	946
947	896 809	849 278 123	30,7734	9,8201	2,97635	1,05597	2 975,1	704 352	947
948	898 704	851 971 392	30,7896	9,8236	2,97681	1,05485	2 978,2	705 840	948
949	900 601	854 670 349	30,8058	9,8270	2,97727	1,05374	2 981,4	707 330	949
950	902 500	857 375 000	30,8221	9,8305	2,97772	1,05263	2 984,5	708 822	950
951	904 401	860 085 351	30,8383	9,8339	2,97818	1,05152	2 987,7	710 315	951
952	906 304	862 801 408	30,8545	9,8374	2,97864	1,05042	2 990,8	711 809	952
953	908 209	865 523 177	30,8707	9,8408	2,97909	1,04932	2 993,9	713 306	953
954	910 116	868 250 664	30,8869	9,8443	2,97955	1,04822	2 997,1	714 803	954
955	912 025	870 983 875	30,9031	9,8477	2,98000	1,04712	3 000,2	716 303	955
956	913 936	873 722 816	30,9192	9,8511	2,98046	1,04603	3 003,4	717 804	956
957	915 849	876 467 493	30,9354	9,8546	2,98091	1,04493	3 006,5	719 306	957
958	917 764	879 217 912	30,9516	9,8580	2,98137	1,04384	3 009,6	720 810	958
959	919 681	881 974 079	30,9677	9,8614	2,98182	1,04275	3 012,8	722 316	959
960	921 600	884 736 000	30,9839	9,8648	2,98227	1,04167	3 015,9	723 823	960
961	923 521	887 503 681	31,0000	9,8683	2,98272	1,04167	3 019,1	725 332	961
962	925 444	890 277 128	31,0161	9,8717	2,98318	1,03950	3 022,2	726 842	962
963	927 369	893 056 347	31,0322	9,8751	2,98363	1,03842	3 025,4	728 354	963
964	929 296	895 841 344	31,0483	9,8785	2,98408	1,03734	3 028,5	729 867	964
965	931 225	898 632 125	31,0644	9,8819	2,98453	1,03627	3 031,6	731 382	965
966	933 156	901 428 696	31,0805	9,8854	2,98498	1,03520	3 034,8	732 899	966
967	935 089	904 231 063	31,0966	9,8888	2,98543	1,03413	3 037,9	734 417	967
968	937 024	907 039 232	31,1127	9,8922	2,98588	1,03306	3 041,1	735 937	968
969	938 961	909 853 209	31,1288	9,8956	2,98632	1,03199	3 044,2	737 458	969
970	940 900	912 673 000	31,1448	9,8990	2,98677	1,03093	3 047,3	738 981	970

Продолжение табл. 1—2

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\frac{1000}{n}$	πn	$\frac{\pi n^2}{4}$	n
971	942 841	915 498 611	31,1609	9,9024	2,98722	1,02987	3 050,5	740 506	971
972	944 784	918 330 048	31,1769	9,9058	2,98767	1,02881	3 053,6	742 032	972
973	946 729	921 167 317	31,1929	9,9092	2,98811	1,02775	3 056,8	743 559	973
974	948 676	924 010 424	31,2090	9,9126	2,98856	1,02669	3 059,9	745 088	974
975	950 625	926 859 375	31,2250	9,9160	2,98900	1,02564	3 063,1	746 619	975
976	952 576	929 714 176	31,2410	9,9194	2,98945	1,02459	3 066,2	748 151	976
977	954 529	932 574 833	31,2570	9,9227	2,98989	1,02354	3 069,3	749 685	977
978	956 484	935 441 352	31,2730	9,9261	2,99034	1,02249	3 072,5	751 221	978
979	958 441	938 313 739	31,2890	9,9295	2,99078	1,02145	3 075,6	752 758	979
980	960 400	941 192 000	31,3050	9,9329	2,99123	1,02041	3 078,8	754 296	980
981	962 361	944 076 141	31,3200	9,9363	2,99167	1,01937	3 081,9	755 837	981
982	964 324	946 966 168	31,3369	9,9396	2,99211	1,01833	3 085,0	757 378	982
983	966 289	949 862 087	31,3528	9,9430	2,99255	1,01729	3 088,2	758 922	983
984	968 256	952 763 904	31,3688	9,9464	2,99300	1,01626	3 091,3	760 466	984
985	970 225	955 671 625	31,3847	9,9497	2,99344	1,01523	3 094,5	762 013	985
986	972 196	958 585 256	31,4006	9,9531	2,99388	1,01420	3 097,6	763 561	986
987	974 169	961 504 803	31,4166	9,9565	2,99432	1,01317	3 100,8	765 111	987
988	976 144	964 430 272	31,4325	9,9598	2,99476	1,01215	3 103,9	766 662	988
989	978 121	967 361 669	31,4484	9,9632	2,99520	1,01112	3 107,9	768 214	989
990	980 100	970 299 000	31,4643	9,9666	2,99564	1,01010	3 110,2	769 769	990
991	982 081	973 242 271	31,4802	9,9699	2,99607	1,00908	3 113,3	771 325	991
992	984 064	976 191 488	31,4960	9,9733	2,99651	1,00806	3 116,5	772 882	992
993	986 049	979 146 657	31,5119	9,9766	2,99695	1,00705	3 119,6	774 441	993
994	988 036	982 107 754	31,5278	9,9800	2,99739	1,00604	3 122,7	776 002	994
995	990 025	985 074 875	31,5436	9,9833	2,99782	1,00503	3 125,9	777 564	995
996	992 016	988 047 936	31,5595	9,9866	2,99826	1,00402	3 129,0	779 128	996
997	994 009	991 026 973	31,5753	9,9900	2,99870	1,00301	3 132,2	780 693	997
998	996 004	994 011 992	31,5911	9,9933	2,99913	1,00200	3 135,3	782 260	998
999	998 001	997 002 999	31,6070	9,9967	2,99957	1,00100	3 138,5	783 828	999

1—3. ДЛИНЫ ДУГ, СТРЕЛКИ, ДЛИНЫ ХОРД И ПЛОЩАДИ СЕГМЕНТОВ ДЛЯ РАДИУСА, РАВНОГО 1

Таблица 1—3

Центральный угол φ (в град.)	Длина дуги s	Стрелка f	$\frac{s}{f}$	Длина хорды l	Площадь сегмента F'	Центральный угол φ (в град.)	Длина дуги s	Стрелка f	$\frac{s}{f}$	Длина хорды l	Площадь сегмента F'
2	0,0349	0,0002	229,19	0,0349	0,00000	16	0,2793	0,0097	28,04	0,2783	0,00181
4	0,0698	0,0006	114,60	0,0698	0,00003	18	0,3142	0,0123	25,35	0,3129	0,00257
6	0,1047	0,0014	76,41	0,1047	0,00010	20	0,3491	0,0152	22,98	0,3473	0,00352
8	0,1396	0,0024	56,01	0,1395	0,00023	22	0,3840	0,0184	20,90	0,3816	0,00468
10	0,1745	0,0038	45,87	0,1743	0,00044	24	0,4189	0,0219	19,17	0,4158	0,00607
12	0,2094	0,0055	38,23	0,2091	0,00076	26	0,4538	0,0256	17,71	0,4499	0,00771
14	0,2443	0,0075	32,78	0,2437	0,00121	28	0,4887	0,0297	16,45	0,4838	0,00961

Продолжение табл. 1—3

Центральный (угол φ в град.)	Длина дуги s	Стрелка f	$\frac{s}{f}$	Длина хорды l	Площадь сегмента F'	Центральный угол φ (в град.)	Длина дуги s	Стрелка f	$\frac{s}{f}$	Длина хорды l	Площадь сегмента F'
30	0,5236	0,0341	15,37	0,5176	0,01180	106	1,8500	0,3982	4,65	1,5973	0,44439
32	0,5585	0,0387	14,42	0,5513	0,01429	108	1,8850	0,4122	4,57	1,6180	0,46695
34	0,5934	0,0437	13,58	0,5847	0,01711	110	1,9199	0,4264	4,50	1,6383	0,49008
36	0,6283	0,0489	12,84	0,6180	0,02027	112	1,9548	0,4408	4,43	1,6581	0,51379
38	0,6632	0,0545	12,17	0,6511	0,02378	114	1,9897	0,4554	4,37	1,6773	0,53806
40	0,6981	0,0603	11,58	0,6840	0,02767	116	2,0246	0,4701	4,31	1,6961	0,56289
42	0,7330	0,0664	11,04	0,7167	0,03195	118	2,0595	0,4850	4,25	1,7143	0,58827
44	0,7679	0,0728	10,55	0,7492	0,03664	120	2,0944	0,5000	4,19	1,7321	0,61418
46	0,8029	0,0795	10,10	0,7815	0,04176	122	2,1293	0,5152	4,13	1,7492	0,64063
48	0,8378	0,0865	9,69	0,8135	0,04731	124	2,1642	0,5305	4,08	1,7659	0,66759
50	0,8727	0,0937	9,31	0,8452	0,05331	126	2,1991	0,5460	4,03	1,7820	0,69505
52	0,9076	0,1012	8,97	0,8767	0,05978	128	2,2340	0,5616	3,98	1,7976	0,72301
54	0,9425	0,1090	8,65	0,9080	0,06673	130	2,2689	0,5774	3,93	1,8126	0,75144
56	0,9774	0,1171	8,35	0,9389	0,07417	132	2,3038	0,5933	3,88	1,8271	0,78034
58	1,0123	0,1254	8,07	0,9696	0,08212	134	2,3387	0,6093	3,84	1,8410	0,80970
60	1,0472	0,1340	7,81	1,0000	0,09059	136	2,3736	0,6254	3,80	1,8544	0,83949
62	1,0821	0,1428	7,56	1,0301	0,09958	138	2,4086	0,6416	3,75	1,8672	0,86971
64	1,1170	0,1520	7,35	1,0598	0,10911	140	2,4435	0,6580	3,71	1,8794	0,90034
66	1,1519	0,1613	7,14	1,0893	0,11919	142	2,4784	0,6744	3,67	1,8910	0,93135
68	1,1868	0,1710	6,94	1,1184	0,12982	144	2,5133	0,6910	3,64	1,9021	0,96274
70	1,2217	0,1803	6,76	1,1472	0,14102	146	2,5482	0,7076	3,60	1,9126	0,99449
72	1,2566	0,1910	6,58	1,1756	0,15279	148	2,5831	0,7244	3,57	1,9225	1,02658
74	1,2915	0,2014	6,41	1,2036	0,16514	150	2,6180	0,7412	3,53	1,9319	1,05900
76	1,3265	0,2120	6,26	1,2313	0,17803	152	2,6529	0,7581	3,60	1,9406	1,09171
78	1,3614	0,2229	6,11	1,2586	0,19160	154	2,6878	0,7750	3,47	1,9487	1,12472
80	1,3963	0,2340	5,97	1,2856	0,20573	156	2,7227	0,7921	3,44	1,9563	1,15799
82	1,4312	0,2453	5,83	1,3121	0,22045	158	2,7576	0,8092	3,41	1,9633	1,19151
84	1,4661	0,2559	5,71	1,3383	0,23578	160	2,7925	0,8264	3,38	1,9696	1,22525
86	1,5010	0,2686	5,59	1,3640	0,25171	162	2,8274	0,8436	3,35	1,9754	1,25921
88	1,5359	0,2807	5,47	1,3893	0,26825	164	2,8629	0,8608	3,33	1,9805	1,29335
90	1,5708	0,2929	5,36	1,4142	0,28540	166	2,8972	0,8781	3,30	1,9851	1,32766
92	1,6057	0,3053	5,26	1,4387	0,30316	168	2,9322	0,8955	3,27	1,9890	1,36212
94	1,6406	0,3180	5,16	1,4627	0,32152	170	2,9671	0,9128	3,25	1,9924	1,39671
96	1,6755	0,3309	5,06	1,4863	0,34050	172	3,0020	0,9302	3,23	1,9951	1,43140
98	1,7104	0,3439	4,97	1,5094	0,36003	174	3,0369	0,9477	3,20	1,9973	1,46617
100	1,7453	0,3572	4,89	1,5321	0,38026	176	3,0718	0,9651	3,18	1,9988	1,50101
102	1,7802	0,3707	4,80	1,5543	0,40104	178	3,1067	0,9825	3,16	1,9997	1,53589
104	1,8151	0,3843	4,72	1,5760	0,42242	180	3,1416	1,0000	3,14	2,0000	1,57080

Примечание к таблице 1—3. Радиус r для данной длины дуги s и стрелки f определяется из отношения $r=\frac{s}{s_0}$, где s_0 — та длина дуги, которая при радиусе $r=1$ соответствует заданному $\frac{s}{f}$, помещенному в таблице. Если r—радиус круга, а φ—центральный угол в град., то:

1) длина хорды $l=2r\sin\frac{\varphi}{2}$;

2) стрелка $f=r\left(1-\cos\frac{\varphi}{2}\right)=\frac{l}{2}\operatorname{tg}\frac{\varphi}{4}=2r\sin^2\frac{\varphi}{4}$;

3) длина дуги $s=\pi r\frac{\varphi^\circ}{180^\circ}=0{,}017453\,r\varphi\approx\sqrt{l^2+\frac{16}{3}f^2}$;

4) площадь сегмента $F'=\frac{r^2}{2}\left(\frac{\pi}{180^\circ}\varphi^\circ-\sin\varphi\right)$;

5) площадь сектора $F''=\frac{\varphi^\circ}{360^\circ}\pi r^2=0{,}00872665\,\varphi^\circ r^2$;

6) $s=r$ при угле $\varphi=57^\circ 17'44{,}806''=57{,}29578^\circ=206\,264{,}806''$;

7) arc $1^\circ=\pi:180=0{,}01745$; lg arc $1^\circ=0{,}24188-2$;

8) arc $1'=\pi:10\,800=0{,}00029$; lg arc $1'=0{,}46373-4$;

9) arc $1''=\pi:648\,000=0{,}000005$; lg arc $1''=0{,}68557-6$.

1—4. НАТУРАЛЬНЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ
Синусы, косинусы, тангенсы и котангенсы

Таблица 1—4

Угол ↓	sin	cos	tg	ctg		Угол ↓	sin	cos	tg	ctg	
0°00′	0,000	1,000	0,000	∞	90°00′	18°00′	0,309	0,951	0,325	3,078	72°00′
20′	0,006	1,000	0,006	171,9	40′	20′	0,315	0,949	0,331	3,018	40′
40′	0,012	1,000	0,012	85,94	20′	40′	0,320	0,947	0,338	2,960	20′
1°00′	0,017	1,000	0,017	57,29	89°00′	19°00′	0,326	0,946	0,344	2,904	71°00′
20′	0,023	1,000	0,023	42,96	40′	20′	0,331	0,944	0,351	2,850	40′
40′	0,029	1,000	0,029	34,37	20′	40′	0,337	0,942	0,357	2,798	20′
2°00′	0,035	0,999	0,035	28,64	88°00′	20°00′	0,342	0,940	0,364	2,747	70°00′
20′	0,041	0,999	0,041	24,54	40′	20′	0,347	0,938	0,371	2,699	40′
40′	0,047	0,999	0,047	21,47	20′	40′	0,353	0,936	0,377	2,651	20′
3°00′	0,052	0,999	0,052	19,08	87°00′	21°00′	0,358	0,934	0,384	2,605	69°00′
20′	0,058	0,998	0,058	17,17	40′	20′	0,364	0,931	0,391	2,560	40′
40′	0,064	0,998	0,064	15,60	20′	40′	0,369	0,929	0,397	2,517	20′
4°00′	0,070	0,998	0,070	14,30	86°00′	22°00′	0,375	0,927	0,404	2,475	68°00′
20′	0,076	0,997	0,076	13,20	40′	20′	0,380	0,925	0,411	2,434	40′
40′	0,081	0,997	0,082	12,25	20′	40′	0,385	0,923	0,418	2,394	20′
5°00′	0,087	0,996	0,087	11,43	85°00′	23°00′	0,391	0,921	0,424	2,356	67°00′
20′	0,093	0,996	0,093	10,71	40′	20′	0,396	0,918	0,431	2,318	40′
40′	0,099	0,995	0,099	10,08	20′	40′	0,401	0,916	0,438	2,282	20′
6°00′	0,105	0,995	0,105	9,514	84°00′	24°00′	0,407	0,914	0,445	2,246	66°00′
20′	0,110	0,994	0,111	9,010	40′	20′	0,412	0,911	0,452	2,211	40′
40′	0,116	0,993	0,117	8,556	20′	40′	0,417	0,909	0,459	2,177	20′
7°00′	0,122	0,993	0,123	8,144	83°00′	25°00′	0,423	0,906	0,466	2,145	65°00′
20′	0,128	0,992	0,129	7,770	40′	20′	0,428	0,904	0,473	2,112	40′
40′	0,133	0,991	0,135	7,429	20′	40′	0,433	0,901	0,481	2,081	20′
8°00′	0,139	0,990	0,141	7,115	82°00′	26°00′	0,438	0,899	0,488	2,050	64°00′
20′	0,145	0,989	0,146	6,827	40′	20′	0,444	0,896	0,495	2,020	40′
40′	0,151	0,989	0,152	6,561	20′	40′	0,449	0,894	0,502	1,991	20′
9°00′	0,156	0,988	0,158	6,314	81°00′	27°00′	0,454	0,891	0,510	1,963	63°00′
20′	0,162	0,987	0,164	6,084	40′	20′	0,459	0,888	0,517	1,935	40′
40′	0,168	0,986	0,170	5,871	20′	40′	0,464	0,886	0,524	1,907	20′
10°00′	0,174	0,985	0,176	5,671	80°00′	28°00′	0,469	0,883	0,532	1,881	62°00′
20′	0,179	0,984	0,182	5,485	40′	20′	0,475	0,880	0,539	1,855	40′
40′	0,185	0,983	0,188	5,309	20′	40′	0,480	0,877	0,547	1,829	20′
11°00′	0,191	0,982	0,194	5,145	79°00′	29°00′	0,485	0,875	0,554	1,804	61°00′
20′	0,197	0,981	0,200	4,989	40′	20′	0,490	0,872	0,562	1,780	40′
40′	0,202	0,979	0,206	4,843	20′	40′	0,495	0,869	0,570	1,756	20′
12°00′	0,208	0,978	0,213	4,705	78°00′	30°00′	0,500	0,866	0,577	1,732	60°00′
20′	0,214	0,977	0,219	4,574	40′	20′	0,505	0,863	0,585	1,709	40′
40′	0,219	0,976	0,225	4,449	20′	40′	0,510	0,860	0,593	1,686	20′
13°00′	0,225	0,974	0,231	4,331	77°00′	31°00′	0,515	0,857	0,601	1,664	59°00′
20′	0,231	0,973	0,237	4,129	40°	20′	0,520	0,854	0,609	1,643	40′
40′	0,236	0,972	0,243	4,113	20′	40′	0,525	0,851	0,617	1,621	20′
14°00′	0,242	0,970	0,249	4,011	76°00′	32°00′	0,530	0,848	0,625	1,600	58°00′
20′	0,248	0,969	0,256	3,914	40′	20′	0,535	0,845	0,633	1,580	40′
40′	0,253	0,967	0,262	3,821	20′	40′	0,540	0,842	0,641	1,560	20′
15°00′	0,259	0,966	0,268	3,732	75°00′	33°00′	0,545	0,839	0,649	1,540	57°00′
20′	0,264	0,964	0,274	3,647	40′	20′	0,550	0,835	0,658	1,520	40′
40′	0,270	0,963	0,280	3,566	20′	40′	0,554	0,832	0,666	1,501	20′
16°00′	0,276	0,961	0,287	3,487	74°00′	34°00′	0,559	0,829	0,675	1,483	56°00′
20′	0,281	0,960	0,293	3,412	40′	20′	0,564	0,826	0,683	1,464	40′
40′	0,287	0,958	0,299	3,340	20′	40′	0,569	0,822	0,692	1,446	20′
17°00′	0,292	0,956	0,306	3,271	73°00′	35°00′	0,574	0,819	0,700	1,428	55°00′
20′	0,298	0,955	0,312	3,204	40′	20′	0,578	0,816	0,709	1,411	40′
40′	0,303	0,953	0,319	3,140	20′	40′	0,583	0,812	0,718	1,393	20′
	cos	sin	ctg	tg	↑ Угол		cos	sin	ctg	tg	↑ Угол

Продолжение табл. 1—4

Угол ↓	sin	cos	tg	ctg		Угол ↓	sin	cos	tg	ctg	
36°00′	0,588	0,809	0,727	1,376	54°00′	41°00′	0,656	0,755	0,869	1,150	49°00′
20′	0,592	0,806	0,735	1,360	40′	20′	0,660	0,751	0,880	1,137	40′
40′	0,597	0,802	0,744	1,343	20′	40′	0,665	0,747	0,890	1,124	20′
37°00′	0,602	0,799	0,754	1,327	53°00′	42°00′	0,669	0,743	0,900	1,111	48°00′
20′	0,606	0,795	0,763	1,311	40′	20′	0,673	0,739	0,911	1,098	40′
40′	0,611	0,792	0,772	1,295	20′	40′	0,678	0,735	0,922	1,085	20′
38°00′	0,616	0,788	0,781	1,280	52°00′	43°00′	0,682	0,731	0,933	1,072	47°00′
20′	0,620	0,784	0,791	1,265	40′	20′	0,686	0,727	0,943	1,060	40′
40′	0,625	0,781	0,800	1,250	20′	40′	0,690	0,723	0,955	1,048	20′
39°00′	0,629	0,777	0,810	1,235	51°00′	44°00′	0,695	0,719	0,966	1,036	46°00′
20′	0,634	0,773	0,819	1,220	40′	20′	0,699	0,715	0,977	1,024	40′
40′	0,638	0,770	0,829	1,206	20′	40′	0,703	0,711	0,988	1,012	20′
40°00′	0,643	0,766	0,839	1,192	50°00′	45°00′	0,707	0,707	1,000	1,000	45°00′
20′	0,647	0,762	0,849	1,178	40′						
40′	0,652	0,759	0,859	1,164	20′						
	cos	sin	ctg	tg	↑ Угол		cos	sin	ctg	tg	↑ Угол

1—5. ПОКАЗАТЕЛЬНЫЕ И ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Гиперболический синус: $\operatorname{sh} x = \dfrac{e^x - e^{-x}}{2}$

Гиперболический косинус: $\operatorname{ch} x = \dfrac{e^x + e^{-x}}{2}$

Гиперболический тангенс: $\operatorname{th} x = \dfrac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$

$$e^x = \operatorname{sh} x + \operatorname{ch} x; e^{-x} = \operatorname{ch} x - \operatorname{sh} x$$

Таблица 1—5

x	e^x	e^{-x}	$\operatorname{sh} x$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{th} x$	x	e^x	e^{-x}	$\operatorname{sh} x$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{th} x$
0	1,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1	2,718	0,368	1,175	1,543	0,762
0,1	1,105	0,905	0,100	1,005	0,100	1,1	3,004	0,333	1,336	1,669	0,800
0,2	1,221	0,819	0,201	1,020	0,197	1,2	3,320	0,301	1,509	1,811	0,834
0,3	1,350	0,741	0,305	1,045	0,291	1,3	3,669	0,273	1,698	1,971	0,862
0,4	1,492	0,670	0,411	1,081	0,380	1,4	4,055	0,247	1,904	2,151	0,885
0,5	1,649	0,607	0,521	1,128	0,462	1,5	4,482	0,223	2,129	2,352	0,905
0,6	1,822	0,549	0,637	1,185	0,537	1,6	4,953	0,202	2,376	2,577	0,922
0,7	2,014	0,497	0,759	1,255	0,604	1,7	5,474	0,183	2,646	2,828	0,935
0,8	2,225	0,449	0,888	1,337	0,664	1,8	6,050	0,165	2,942	3,107	0,947
0,9	2,460	0,407	1,027	1,433	0,716	1,9	6,686	0,150	3,268	3,418	0,956

Продолжение табл. 1—5

x	e^x	e^{-x}	sh x	ch x	th x	x	e^x	e^{-x}	sh x	ch x	th x
2	7,389	0,135	3,627	3,762	0,964	4	54,60	0,0183	27,29	27,31	th x при $x > 3$ очень мало отличается от 1
2,1	8,166	0,122	4,022	4,144	0,970	4,1	60,34	0,0166	30,16	30,18	
2,2	9,025	0,111	4,457	4,568	0,976	4,2	66,69	0,0150	33,34	33,35	
2,3	9,974	0,100	4,937	5,037	0,980	4,3	73,70	0,0136	36,84	36,86	
2,4	11,02	0,0907	5,466	5,557	0,984	4,4	81,45	0,0123	40,72	40,73	
2,5	12,18	0,0821	6,050	6,132	0,987	4,5	90,02	0,0111	45,00	45,01	
2,6	13,46	0,0743	6,695	6,769	0,989	4,6	99,48	0,0101	49,74	49,75	
2,7	14,88	0,0672	7,406	7,473	0,991	4,7	109,9	0,0091	54,97	54,98	
2,8	16,44	0,0608	8,192	8,253	0,993	4,8	121,5	0,0082	60,75	60,76	
2,9	18,17	0,0550	9,060	9,115	0,994	4,9	134,3	0,0074	67,14	67,15	
3	20,09	0,0498	10,02	10,07	0,995	5	148,4	0,0067	74,20	74,21	
3,1	22,20	0,0450	11,08	11,12	th x при $x > 3$ очень мало отличается от 1	5,1	164,0	0,0061	82,01	82,01	
3,2	24,53	0,0408	12,25	12,29		5,2	181,3	0,0055	90,63	90,64	
3,3	27,11	0,0369	13,54	13,57		5,3	200,3	0,0050	100,2	100,2	
3,4	29,96	0,0334	14,97	15,00		5,4	221,4	0,0045	110,7	110,7	
3,5	33,12	0,0302	16,54	16,57		5,5	244,7	0,0041	122,3	122,3	
3,6	36,60	0,0273	18,22	18,31		5,6	270,4	0,0037	135,2	135,2	
3,7	40,45	0,0247	20,21	20,24		5,7	298,9	0,0033	149,4	149,4	
3,8	44,70	0,0224	22,34	22,36		5,8	330,3	0,0030	165,1	165,2	
3,9	49,40	0,0202	24,69	24,71		5,9	365,0	0,0027	182,5	182,5	
						6	403,4	0,0025	201,7	201,7	

1—6. ТАБЛИЦА ПОЛНЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛОВ ПЕРВОГО РОДА

m — модуль эллиптических интегралов

Таблица 1—6

m^2	m	K	K'	m^2	m	K	K'
0,00	0,00	1,570763	∞	0,01	0,100	1,5747456	3,6956374
$0,0^{11}1$	$0,0^{5}1000$	1,570796	15,20174	0,02	0,141	1,5787399	3,3541414
$0,0^{10}1$	$0,0^{5}3162$	1,570796	14,05055	0,03	0,173	1,5827803	3,1558749
$0,0^{9}1$	$0,0^{4}1$	1,570796	13,89925	0,04	0,200	1,5868678	3,0161125
$0,0^{8}1$	$0,0^{4}3162$	1,570796	11,74795	0,05	0,224	1,5910035	2,9083372
$0,0^{7}1$	$0,0^{3}1$	1,570796	10,59666	0,06	0,245	1,5951882	2,8207525
$0,0^{6}1$	$0,0^{3}3162$	1,570796	9,445329	0,07	0,265	1,5994232	2,7470730
$0,0^{5}1$	$0,0^{2}1$	1,570797	8,294068	0,08	0,283	1,6037097	2,6835514
$0,0^{4}1$	$0,0^{2}3162$	1,570800	7,142753	0,09	0,300	1,6080486	2,6277733
$0,0^{3}1$	0,01	1,570836	5,991600	0,10	0,316	1,6124413	2,5780921
$0,0^{2}1$	0,031623	1,571189	4,841133	0,11	0,332	1,6168891	2,5333345

Продолжение табл. 1—6

m^2	m	K	K'	m^2	m	K	K'
0,12	0,346	1,6213931	2,4926353	0,61	0,781	1,9605210	1,7706473
0,13	0,360	1,6259548	2,4553380	0,62	0,787	1,9717832	1,7638984
0,14	0,374	1,6305755	2,4209330	0,63	0,794	1,9833710	1,7572685
0,15	0,387	1,6352567	2,3890165	0,64	0,800	1,9953028	1,7507538
0,16	0,400	1,6399999	2,3592636	0,65	0,806	2,0075984	1,7443506
0,17	0,412	1,6448065	2,3314086	0,66	0,812	2,0202794	1,7380554
0,18	0,424	1,6496782	2,3052317	0,67	0,818	2,0333694	1,7318648
0,19	0,436	1,6546167	2,2805491	0,68	0,825	2,0468941	1,7257756
0,20	0,447	1,6596236	2,2572053	0,69	0,831	2,0608816	1,7197848
0,21	0,458	1,6647008	2,2350678	0,70	0,837	2,0753631	1,7138894
0,22	0,469	1,6698501	2,2140225	0,71	0,843	2,0903727	1,7080867
0,23	0,479	1,6750734	2,1939709	0,72	0,848	2,1059483	1,7023740
0,24	0,490	1,6803728	2,1748271	0,73	0,854	2,1221319	1,6967486
0,25	0,500	1,6857504	2,1565156	0,74	0,860	2,1389702	1,6912082
0,26	0,510	1,6912082	2,1389702	0,75	0,866	2,1565156	1,6857504
0,27	0,520	1,6967486	2,1221319	0,76	0,872	2,1748271	1,6803728
0,28	0,529	1,7023740	2,1059483	0,77	0,877	2,1939709	1,6750734
0,29	0,539	1,7080867	2,0903727	0,78	0,883	2,2140225	1,6698501
0,30	0,548	1,7138894	2,0753631	0,79	0,889	2,2350678	1,6647008
0,31	0,557	1,7197848	2,0608816	0,80	0,894	2,2572053	1,6596236
0,32	0,566	1,7257756	2,0468941	0,81	0,900	2,2805491	1,6546167
0,33	0,574	1,7318648	2,0333694	0,82	0,905	2,3052317	1,6496782
0,34	0,583	1,7380554	2,0202794	0,83	0,911	2,3314086	1,6448065
0,35	0,592	1,7443506	2,0075984	0,84	0,917	2,3592636	1,6399999
0,36	0,600	1,7507538	1,9953028	0,85	0,922	2,3890165	1,6352567
0,37	0,608	1,7572685	1,9833710	0,86	0,927	2,4209330	1,6305755
0,38	0,616	1,7638984	1,9717832	0,87	0,933	2,4553380	1,6259548
0,39	0,624	1,7706473	1,9605210	0,88	0,938	2,4926353	1,6213931
0,40	0,632	1,7775194	1,9495677	0,89	0,943	2,5333345	1,6178891
0,41	0,640	1,7845188	1,9389077	0,90	0,949	2,5780921	1,6124413
0,42	0,648	1,7916501	1,9285263	0,91	0,954	2,6277733	1,6080486
0,43	0,656	1,7989180	1,9184103	0,92	0,959	2,6835514	1,6037097
0,44	0,663	1,8063276	1,9085470	0,93	0,964	2,7470730	1,5994232
0,45	0,676	1,8138839	1,8989249	0,94	0,970	2,8207525	1,5951882
0,46	0,678	1,8215927	1,8895331	0,95	0,975	2,9083372	1,5910035
0,47	0,686	1,8294598	1,8803614	0,96	0,980	3,0161125	1,5868678
0,48	0,693	1,8374914	1,8714002	0,97	0,985	3,1558749	1,5827803
0,49	0,700	1,8456940	1,8626408	0,98	0,990	3,3541414	1,5787399
0,50	0,707	1,8540747	1,8540747	0,99	0,995	3,6956374	1,5747456
0,51	0,714	1,8626408	1,8456940	0,991	0,995490	3,747758	1,5743480
0,52	0,721	1,8714002	1,8374914	0,992	0,995992	3,806076	1,5739520
0,53	0,728	1,8803614	1,8294598	0,993	0,996494	3,872253	1,5735560
0,54	0,735	1,8895331	1,8215927	0,994	0,996995	3,948723	1,5731600
0,55	0,742	1,8989249	1,8138839	0,995	0,997497	4,039257	1,5727650
0,56	0,748	1,9085470	1,8063276	0,996	0,997998	4,150179	1,5723710
0,57	0,755	1,9184103	1,7989180	0,997	0,998499	4,293338	1,5719760
0,58	0,762	1,9285263	1,7916501	0,998	0,998999	4,495347	1,5715820
0,59	0,768	1,9389077	1,7845188	0,999	0,999500	4,841133	1,5708360
0,60	0,775	1,9495677	1,7775194	1,00	1,000	—	1,5707963

1—7. ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЫ ПЕРВОГО РОДА

$$F(\varphi, \theta) = \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - m^2 \sin^2 \varphi}}; \quad m = \sin \theta$$

Таблица 1—7

φ°	θ									
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
1	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
2	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349
3	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524
4	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	0,0699
5	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873
6	0,1047	0,1047	0,1047	0,1047	0,1048	0,1048	0,1048	0,1048	0,1048	0,1048
7	0,1222	0,1222	0,1222	0,1222	0,1222	0,1222	0,1223	0,1223	0,1223	0,1223
8	0,1396	0,1396	0,1397	0,1397	0,1397	0,1397	0,1398	0,1398	0,1399	0,1399
9	0,1571	0,1571	0,1571	0,1572	0,1572	0,1572	0,1573	0,1573	0,1574	0,1575
10	0,1745	0,1746	0,1746	0,1747	0,1747	0,1748	0,1748	0,1749	0,1750	0,1751
11	0,1920	0,1920	0,1921	0,1921	0,1922	0,1923	0,1924	0,1925	0,1926	0,1927
12	0,2095	0,2095	0,2095	0,2096	0,2097	0,2098	0,2099	0,2101	0,2102	0,2103
13	0,2269	0,2270	0,2270	0,2271	0,2272	0,2274	0,2275	0,2277	0,2279	0,2280
14	0,2444	0,2444	0,2445	0,2446	0,2448	0,2450	0,2451	0,2453	0,2456	0,2458
15	0,2618	0,2619	0,2620	0,2621	0,2623	0,2625	0,2628	0,2630	0,2633	0,2636
16	0,2793	0,2794	0,2795	0,2797	0,2799	0,2802	0,2804	0,2808	0,2811	0,2814
17	0,2967	0,2968	0,2970	0,2972	0,2975	0,2978	0,2981	0,2985	0,2989	0,2993
18	0,3142	0,3143	0,3145	0,3148	0,3151	0,3154	0,3159	0,3163	0,3167	0,3172
19	0,3317	0,3318	0,3320	0,3323	0,3327	0,3331	0,3336	0,3341	0,3347	0,3352
20	0,3491	0,3493	0,3495	0,3499	0,3503	0,3508	0,3514	0,3520	0,3526	0,3533
21	0,3666	0,3668	0,3671	0,3675	0,3680	0,3685	0,3692	0,3699	0,3706	0,3714
22	0,3840	0,3842	0,3846	0,3851	0,3856	0,3863	0,3871	0,3879	0,3887	0,3896
23	0,4015	0,4017	0,4021	0,4027	0,4033	0,4041	0,4049	0,4059	0,4068	0,4078
24	0,4190	0,4192	0,4197	0,4203	0,4210	0,4219	0,4229	0,4239	0,4250	0,4261
25	0,4364	0,4367	0,4372	0,4379	0,4387	0,4397	0,4408	0,4420	0,4433	0,4446
26	0,4539	0,4542	0,4548	0,4556	0,4565	0,4576	0,4589	0,4602	0,4616	0,4630
27	0,4714	0,4717	0,4724	0,4732	0,4743	0,4755	0,4769	0,4784	0,4800	0,4816
28	0,4888	0,4893	0,4899	0,4909	0,4921	0,4934	0,4950	0,4967	0,4985	0,5003
29	0,5063	0,5068	0,5075	0,5086	0,5099	0,5114	0,5132	0,5150	0,5170	0,5190
30	0,5238	0,5243	0,5251	0,5263	0,5277	0,5294	0,5312	0,5334	0,5356	0,5379
31	0,5412	0,5418	0,5427	0,5440	0,5456	0,5475	0,5496	0,5519	0,5543	0,5568
32	0,5587	0,5593	0,5603	0,5617	0,5635	0,5656	0,5679	0,5704	0,5731	0,5759
33	0,5762	0,5769	0,5780	0,5795	0,5814	0,5837	0,5862	0,5890	0,5920	0,5950
34	0,5937	0,5944	0,5956	0,5973	0,5994	0,6018	0,6046	0,6077	0,6109	0,6143
35	0,6111	0,6119	0,6133	0,6151	0,6173	0,6200	0,6231	0,6244	0,6300	0,6336
36	0,6286	0,6295	0,6309	0,6329	0,6353	0,6383	0,6416	0,6452	0,6491	0,6531
37	0,6461	0,6470	0,6486	0,6507	0,6534	0,6565	0,6602	0,6641	0,6684	0,6727
38	0,6636	0,6646	0,6662	0,6685	0,6714	0,6749	0,6788	0,6831	0,6877	0,6925
39	0,6810	0,6821	0,6839	0,6864	0,6895	0,6932	0,6975	0,7021	0,7071	0,7123
40	0,6985	0,6997	0,7016	0,7043	0,7076	0,7116	0,7162	0,7213	0,7267	0,7323
41	0,7160	0,7173	0,7193	0,7222	0,7258	0,7301	0,7350	0,7405	0,7463	0,7524
42	0,7335	0,7348	0,7370	0,7401	0,7440	0,7486	0,7539	0,7598	0,7661	0,7727
43	0,7510	0,7524	0,7548	0,7580	0,7622	0,7671	0,7728	0,7791	0,7859	0,7931
44	0,7685	0,7700	0,7725	0,7760	0,7804	0,7857	0,7918	0,7986	0,8059	0,8136
45	0,7859	0,7876	0,7903	0,7940	0,7987	0,8044	0,8109	0,8188	0,8260	0,8343

Продолжение табл. 1—7

φ°	θ									
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
46	0,8034	0,8052	0,8080	0,8120	0,8170	0,8230	0,8300	0,8378	0,8462	0,8552
47	0,8209	0,8227	0,8258	0,8300	0,8353	0,8418	0,8492	0,8575	0,8666	0,8761
48	0,8384	0,8403	0,8436	0,8480	0,8537	0,8606	0,8685	0,8773	0,8870	0,8973
49	0,8559	0,8579	0,8614	0,8661	0,8721	0,8794	0,8878	0,8972	0,9076	0,9186
50	0,8834	0,8756	0,8792	0,8842	0,8905	0,8982	0,9072	0,9173	0,9283	0,9401
51	0,8909	0,8932	0,8970	0,9023	0,9090	0,9172	0,9267	0,9374	0,9491	0,9617
52	0,9084	0,9108	0,9148	0,9204	0,9275	0,9361	0,9462	0,9575	0,9701	0,9835
53	0,9259	0,9284	0,9326	0,9385	0,9460	0,9551	0,9658	0,9778	0,9912	1,0055
54	0,9434	0,9460	0,9505	0,9567	0,9646	0,9742	0,9855	0,9982	1,0124	1,0277
55	0,9609	0,9637	0,9683	0,9748	0,9832	0,9933	1,0052	1,0187	1,0337	1,0500
56	0,9784	0,9813	0,9862	0,9930	1,0018	1,0125	1,0250	1,0393	1,0552	1,0725
57	0,9959	0,9989	1,0041	1,0112	1,0204	1,0317	1,0449	1,0600	1,0768	1,0952
58	1,0134	1,0166	1,0219	1,0295	1,0391	1,0509	1,0648	1,0807	1,0985	1,1180
59	1,0309	1,0342	1,0398	1,0477	1,0578	1,0702	1,0848	1,1016	1,1204	1,1411
60	1,0484	1,0519	1,0577	1,0660	1,0766	1,0896	1,1049	1,1226	1,1424	1,1643
61	1,0659	1,0695	1,0757	1,0843	1,0953	1,1089	1,1250	1,1436	1,1646	1,1877
62	1,0834	1,0872	1,0936	1,1026	1,1141	1,1284	1,1452	1,1648	1,1868	1,2113
63	1,1009	1,1049	1,1115	1,1209	1,1330	1,1478	1,1655	1,8060	1,2093	1,2351
64	1,1184	1,1225	1,1295	1,1392	1,1518	1,1674	1,1859	1,2073	1,2318	1,2591
65	1,1359	1,1402	1,1474	1,1575	1,1707	1,1869	1,2063	1,2288	1,2545	1,2833
66	1,1534	1,1579	1,1654	1,1759	1,1896	1,2065	1,2267	1,2503	1,2773	1,3076
67	1,1709	1,1756	1,1833	1,1943	1,2085	1,2262	1,2472	1,2719	1,3002	1,3321
68	1,1884	1,1932	1,2013	1,2127	1,2275	1,2458	1,2678	1,2936	1,3232	1,3568
69	1,2059	1,2109	1,2193	1,2311	1,2465	1,2655	1,2885	1,3154	1,3464	1,3817
70	1,2234	1,2286	1,2373	1,2495	1,2655	1,2853	1,3092	1,3372	1,3697	1,4068
71	1,2410	1,2463	1,2553	1,2680	1,2845	1,3051	1,3299	1,3592	1,3931	1,4320
72	1,2585	1,2640	1,2733	1,2864	1,3036	1,3249	1,3507	1,3812	1,4167	1,4574
73	1,2760	1,2817	1,2913	1,3049	1,3226	1,3448	1,3715	1,4033	1,4033	1,4830
74	1,2935	1,2994	1,3093	1,3234	1,3417	1,3647	1,3924	1,4254	1,4640	1,5087
75	1,3110	1,3171	1,3273	1,3418	1,3608	1,3846	1,4134	1,4477	1,4879	1,5345
76	1,3285	1,3348	1,3454	1,3603	1,3800	1,4045	1,4344	1,4700	1,5118	1,5606
77	1,3460	1,3525	1,3634	1,3788	1,3991	1,4245	1,4554	1,4923	1,5359	1,5867
78	1,3636	1,3702	1,3814	1,3974	1,4183	1,4445	1,4765	1,5147	1,5600	1,6130
79	1,3811	1,3879	1,3995	1,4159	1,4374	1,4645	1,4976	1,5372	1,5842	1,6394
80	1,3986	1,4056	1,4175	1,4344	1,4566	1,4846	1,5187	1,5597	1,6085	1,6660
81	1,4161	1,4234	1,4356	1,4530	1,4758	1,5046	1,5399	1,5823	1,6328	1,6926
82	1,4336	1,4411	1,4536	1,4715	1,4950	1,5247	1,5611	1,6049	1,6572	1,7193
83	1,4512	1,4588	1,4717	1,4901	1,5143	1,5448	1,5823	1,6276	1,6817	1,7462
84	1,4687	1,4765	1,4897	1,5086	1,5335	1,5649	1,6035	1,6502	1,7062	1,7731
85	1,4862	1,4942	1,5078	1,5272	1,5527	1,5850	1,6248	1,6730	1,7308	1,8001
86	1,5037	1,5120	1,5259	1,5457	1,5720	1,6052	1,6461	1,6857	1,7554	1,8271
87	1,5212	1,5297	1,5439	1,5603	1,5912	1,6253	1,6673	1,7184	1,7801	1,8542
88	1,5388	1,5474	1,5620	1,5829	1,6105	1,6454	1,6886	1,7412	1,8047	1,8813
89	1,5563	1,5651	1,5801	1,6015	1,6297	1,6656	1,7099	1,7640	1,8294	1,9084
90	1,5738	1,5828	1,5981	1,6200	1,6490	1,6858	1,7312	1,7868	1,8541	1,9356

Продолжение табл. 1—

φ°	ψ									
	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	87°	89°	90°
1	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
2	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349	0,0349
3	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524	0,0524
4	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699	0,0699
5	0,0873	0,0873	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874
6	0,1048	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049	0,1049
7	0,1224	0,1224	0,1224	0,1224	0,1225	0,1225	0,1225	0,1225	0,1225	0,1225
8	0,1399	0,1400	0,1400	0,1400	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401
9	0,1575	0,1576	0,1576	0,1577	0,1577	0,1577	0,1577	0,1577	0,1577	0,1577
10	0,1751	0,1752	0,1753	0,1753	0,1754	0,1754	0,1754	0,1754	0,1754	0,1754
11	0,1928	0,1929	0,1930	0,1930	0,1931	0,1931	0,1932	0,1932	0,1932	0,1932
12	0,2105	0,2106	0,2107	0,2108	0,2109	0,2109	0,2110	0,2110	0,2110	0,2110
13	0,2282	0,2284	0,2285	0,2286	0,2287	0,2288	0,2288	0,2289	0,2289	0,2289
14	0,2460	0,2462	0,2464	0,2465	0,2466	0,2467	0,2468	0,2468	0,2468	0,2468
15	0,2638	0,2641	0,2643	0,2645	0,2646	0,2647	0,2648	0,2648	0,2648	0,2648
16	0,2817	0,2820	0,2823	0,2825	0,2827	0,2828	0,2829	0,2829	0,2830	0,2830
17	0,2997	0,3000	0,3003	0,3006	0,3008	0,3010	0,3011	0,3011	0,3012	0,3012
18	0,3177	0,3180	0,3185	0,3188	0,3191	0,3193	0,3194	0,3194	0,3195	0,3195
19	0,3357	0,3362	0,3367	0,3371	0,3374	0,3377	0,3378	0,3378	0,3379	0,3379
20	0,3539	0,3545	0,3550	0,3555	0,3559	0,3561	0,3563	0,3564	0,3564	0,3564
21	0,3721	0,3728	0,3734	0,3740	0,3744	0,3747	0,3749	0,3750	0,3750	0,3750
22	0,3904	0,3912	0,3919	0,3926	0,3931	0,3935	0,3937	0,3937	0,3938	0,3938
23	0,4088	0,4097	0,4105	0,4113	0,4119	0,4123	0,4126	0,4126	0,4127	0,4127
24	0,4272	0,4283	0,4292	0,4301	0,4308	0,4313	0,4316	0,4317	0,4317	0,4317
25	0,4458	0,4470	0,4481	0,4490	0,4498	0,4504	0,4508	0,4508	0,4509	0,4509
26	0,4645	0,4658	0,4670	0,4681	0,4690	0,4697	0,4701	0,4702	0,4702	0,4702
27	0,4832	0,4847	0,4861	0,4873	0,4884	0,4891	0,4896	0,4897	0,4897	0,4897
28	0,5021	0,5038	0,5053	0,5067	0,5079	0,5087	0,5092	0,5093	0,5094	0,5094
29	0,5210	0,5229	0,5247	0,5262	0,5275	0,5285	0,5291	0,5292	0,5292	0,5293
30	0,5401	0,5422	0,5442	0,5459	0,5474	0,5484	0,5491	0,5492	0,5493	0,5493
31	0,5593	0,5617	0,5639	0,5658	0,5674	0,5686	0,5693	0,5695	0,5696	0,5696
32	0,5786	0,5812	0,5837	0,5858	0,5876	0,5889	0,5898	0,5899	0,5900	0,5900
33	0,5980	0,6010	0,6037	0,6060	0,6080	0,6095	0,6104	0,6106	0,6107	0,6107
34	0,6176	0,6208	0,6238	0,6265	0,6287	0,6303	0,6313	0,6315	0,6316	0,6317
35	0,6373	0,6408	0,6441	0,6471	0,6495	0,6513	0,6525	0,6525	0,6528	0,6528
36	0,6571	0,6610	0,6647	0,6679	0,6706	0,6726	0,6739	0,6741	0,6743	0,6743
37	0,6771	0,6814	0,6854	0,6890	0,6913	0,6941	0,6955	0,6958	0,6960	0,6960
38	0,6973	0,7019	0,7063	0,7102	0,7135	0,7159	0,7175	0,7178	0,7180	0,7180
39	0,7176	0,7228	0,7275	0,7318	0,7353	0,7380	0,7397	0,7401	0,7403	0,7403
40	0,7380	0,7436	0,7488	0,7535	0,7575	0,7604	0,7623	0,7627	0,7629	0,7629
41	0,7586	0,7647	0,7704	0,7756	0,7799	0,7831	0,7852	0,7856	0,7858	0,7859
42	0,7794	0,7860	0,7922	0,7979	0,8026	0,8062	0,8084	0,8089	0,8091	0,8092
43	0,8004	0,8075	0,8143	0,8204	0,8256	0,8295	0,8320	0,8325	0,8328	0,8328
44	0,8215	0,8293	0,8367	0,8433	0,8490	0,8533	0,8560	0,8566	0,8569	0,8569
45	0,8428	0,8512	0,8592	0,8665	0,8727	0,8774	0,8804	0,8810	0,8813	0,8814
46	0,8643	0,8734	0,8821	0,8900	0,8968	0,9019	0,9052	0,9059	0,9062	0,9063
47	0,8860	0,8958	0,9053	0,9139	0,9212	0,9269	0,9304	0,9312	0,9316	0,9316
48	0,9079	0,9185	0,9387	0,9381	0,9461	0,9523	0,9561	0,9570	0,9574	0,9575
49	0,9300	0,9415	0,9525	0,9627	0,9714	0,9781	0,9824	0,9824	0,9837	0,9838
50	0,9523	0,9647	0,9766	0,9876	0,9971	1,0044	1,0091	1,0101	1,0106	1,0107
51	0,9748	0,9881	1,0010	1,0130	1,0233	1,0313	1,0364	1,0375	1,0381	1,0381
52	0,9976	1,0118	1,0258	1,0387	1,0499	1,0587	1,0642	1,0655	1,0661	1,0662
53	1,0205	1,0359	1,0509	1,0649	1,0771	1,0866	1,0929	1,0941	1,0947	1,0948
54	1,0437	1,0602	1,0764	1,0915	1,1048	1,1152	1,1217	1,1233	1,1241	1,1242
55	1,0672	1,0848	1,1022	1,1186	1,1331	1,1444	1,1517	1,1533	1,1541	1,1542

Продолжение табл. 1—7

φ°	6									
	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	87°	89°	90°
56	1,0908	1,1097	1,1285	1,1462	1,1619	1,1743	1,1823	1,1840	1,1849	1,1851
57	1,1147	1,1349	1,1551	1,1743	1,1914	1,2049	1,2136	1,2156	1,2166	1,2167
58	1,1389	1,1605	1,1822	1,2030	1,2215	1,2362	1,2458	1,2480	1,2490	1,2492
59	1,1632	1,1864	1,2097	1,2321	1,2522	1,2684	1,2789	1,2812	1,2824	1,2826
60	1,1879	1,2125	1,2376	1,2619	1,2837	1,3014	1,3129	1,3155	1,3168	1,3170
61	1,2128	1,2392	1,2660	1,2922	1,3159	1,3352	1,3480	1,3508	1,3522	1,3524
62	1,2379	1,2661	1,2949	1,3231	1,3490	1,3701	1,3841	1,3872	1,3888	1,3890
63	1,2633	1,2933	1,3242	1,3547	1,3828	1,4059	1,4214	1,4248	1,4266	1,4268
64	1,2890	1,3209	1,3541	1,3870	1,4175	1,4429	1,4599	1,4637	1,4657	1,4659
65	1,3149	1,3489	1,3844	1,4199	1,4532	1,4810	1,4998	1,5040	1,5062	1,5065
66	1,3411	1,3773	1,4153	1,4536	1,4898	1,5203	1,5411	1,5458	1,5482	1,5485
67	1,3675	1,4060	1,4467	1,4880	1,5274	1,5610	1,5840	1,5893	1,5920	1,5923
68	1,3942	1,4351	1,4786	1,5232	1,5661	1,6030	1,6287	1,6346	1,6376	1,6379
69	1,4212	1,4646	1,5111	1,5591	1,6059	1,6466	1,6752	1,6818	1,6851	1,6856
70	1,4484	1,4944	1,5441	1,5959	1,6468	1,6918	1,7237	1,7311	1,7349	1,7354
71	1,4759	1,5246	1,5777	1,6335	1,6891	1,7388	1,7745	1,7829	1,7872	1,7877
72	1,5036	1,5552	1,6118	1,6720	1,7326	1,7876	1,8277	1,8372	1,8421	1,8427
73	1,5315	1,5862	1,6465	1,7113	1,7774	1,8384	1,8837	1,8945	1,9001	1,9008
74	1,5597	1,6175	1,6818	1,7516	1,8237	1,8915	1,9427	1,9550	1,9614	1,9623
75	1,5882	1,6492	1,7176	1,7927	1,8715	1,9468	2,0050	2,0192	2,0266	2,0276
76	1,6168	1,6812	1,7540	1,8347	1,9207	2,0047	2,0711	2,0876	2,0962	2,0973
77	1,6457	1,7136	1,7909	1,8777	1,9716	2,0653	2,1414	2,1607	2,1708	2,1721
78	1,6748	1,7462	1,8284	1,9215	2,0240	2,1288	2,2164	2,2392	2,2513	2,2528
79	1,7040	1,7792	1,8664	1,9663	2,0781	2,1954	2,2969	2,3240	2,3385	2,3404
80	1,7335	1,8125	1,9048	2,0119	2,1339	2,2653	2,3836	2,4162	2,4340	2,4362
81	1,7631	1,8461	1,9438	2,0584	2,1913	2,3387	2,4775	2,5172	2,5392	2,5421
82	1,7929	1,8799	1,9831	2,1057	2,2504	2,4157	2,5795	2,6288	2,6566	2,6603
83	1,8228	1,9140	2,0229	2,1537	2,3110	2,4965	2,6911	2,7531	2,7894	2,7942
84	1,8529	1,9482	2,0630	2,2024	2,3731	2,5811	2,8136	2,8934	2,9421	2,9487
85	1,8830	1,9826	2,1035	2,2518	2,4366	2,6694	2,9487	3,0536	3,1217	3,1313
86	1,9132	2,0172	2,1442	2,3017	2,5013	2,7612	3,0978	3,2391	3,3396	3,3547
87	1,9435	2,0519	2,1852	2,3520	2,5670	2,8561	3,2620	3,4564	3,6161	3,6425
88	1,9739	2,0867	2,2263	2,4026	2,6336	2,9537	3,4412	3,7131	3,9911	4,0481
89	2,0043	2,1216	2,2675	2,4535	2,7007	3,0530	3,6328	4,0109	4,5535	4,7413
90	2,0347	2,1565	2,3088	2,5046	2,7681	3,1534	3,8317	4,3387	5,4345	

1—Б. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ

1—8. ЛОГАРИФМЫ

Определение. Если $a^x=N$, то $x=\lg_a N$ (N — число, a—основание, x—логарифм числа N при основании a).

Основные свойства

$$\lg 0 = -\infty;\ \lg 1 = 0;\ \lg_a a = 1;$$

$$\lg (ab) = \lg a + \lg b;\quad \lg \left(\frac{a}{b}\right) = \lg a - \lg b;$$

$$\lg (a^n) = n \lg a;\ \lg \sqrt[n]{a} = \frac{1}{n} \lg a.$$

Употребительные системы логарифмов

При $a=10$ — обыкновенные (десятичные); обозначение — lg; $\lg N=\lg_{10} N$ (табл. 1—2).

При $a=e$ — натуральные; обозначение — ln:

$$e = \lim_{n\to\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2{,}718281828 \approx 2{,}718;$$

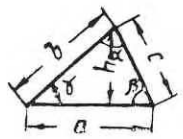
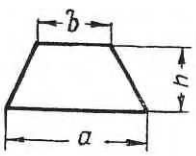
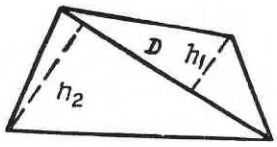
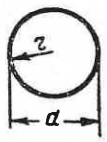
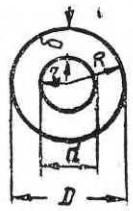
$$\lg e = 0{,}434294\ldots \approx 0{,}434;\ \frac{1}{\lg e} = \ln 10 = 2{,}302586 \approx 2{,}3;$$

$$\ln N = 2{,}3 \lg N;\ \lg N = 0{,}434 \ln N.$$

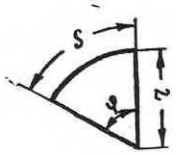
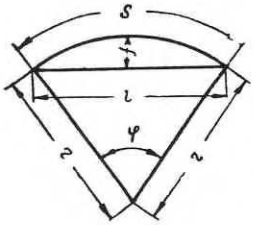
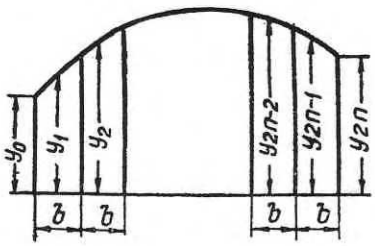
1—9. ПЛОЩАДИ, ОБЪЕМЫ И ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛ

1. Плоские фигуры

Таблица 1—8

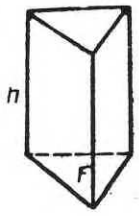
Фигура	Обозначение размеров	F — площадь
Треугольник  *Фиг. 1—1*	a, b, c — стороны h — высота (к стороне a) $p = \frac{1}{2}(a+b+c)$ — полупериметр α, β, γ — углы	$F = \frac{1}{2} ha = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} =$ $= \frac{1}{2} ab \sin \gamma,$ где γ — угол, противолежащий стороне c
Трапеция  *Фиг. 1—2*	a, b — параллельные стороны h — высота	$F = \frac{a+b}{2} h$
Четырехугольник  *Фиг. 1—3*	D — диагональ h_1, h_2 — высоты к диагонали	$F = \frac{h_1 + h_2}{2} D$
Круг  *Фиг. 1—4*	d — диаметр r — радиус	$F = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} = 0{,}7854\, d^2$
Круговое кольцо  *Фиг. 1—5*	R — наружный радиус r — внутренний радиус D — наружный диаметр d — внутренний диаметр ρ — полусумма радиусов R и r δ — ширина кольца	$F = \pi (R^2 - r^2) =$ $= \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) = 2\pi\rho\delta$

Продолжение табл. 1—8

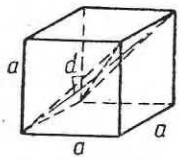
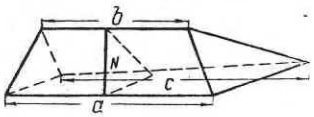
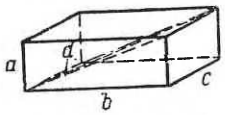
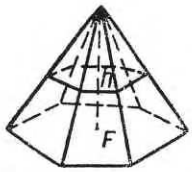
Фигура	Обозначение размеров	F — площадь
Круговой сектор  *Фиг. 1—6*	r — радиус s — длина дуги φ° — центральный угол в град., соответствующий дуге s φ — дуга, соответствующая радиусу, равному 1	$F=\frac{1}{2}sr=\frac{\varphi^\circ}{360^\circ}\pi r^2=\frac{1}{2}\varphi r^2$ $\varphi=\frac{\varphi^\circ\pi}{180^\circ}$
Круговой сегмент  *Фиг. 1—7*	r — радиус φ — центральный угол в град. s — длина дуги l — длина хорды f — высота стрелки	$F=\frac{1}{2}r^2\left(\frac{\varphi\pi}{180}-\sin\varphi\right)=$ $=\frac{r(s-l)+lf}{2}$
Неправильные фигуры  *Фиг. 1—8*	b — ширина участка фигуры y_n — ордината участка фигуры $F=\frac{b}{3}[y_0+y_{2n}+4(y_1+y_3+\cdots+y_{2n-1})+2(y_2+y_4+\cdots+y_{2n-2})]$	Если фигура ограничена с двух сторон кривыми линиями, то она разбивается при помощи прямой линии на 2 части, и площадь каждой части в отдельности вычисляется следующим образом: делят абсциссу на четное число $(2n)$ равных частей, строят и измеряют ординаты $y_0, y_1, y_2, \ldots, y_{2n}$

2. Геометрические тела

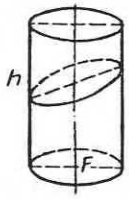
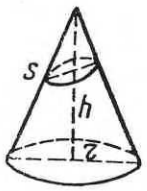
Таблица 1—9

Тело	Обозначение размеров	V — объем M — боковая поверхность A — полная поверхность
1. Призма и призматические тела  *Фиг. 1—9*	F — площадь основания h — высота	$V=Fh$

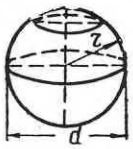
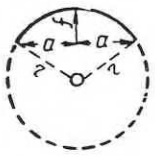
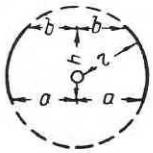
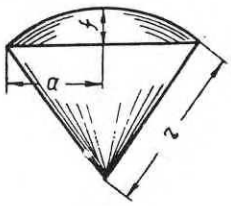
Продолжение табл. 1—9

Тело	Обозначение размеров	V — объем M — боковая поверхность A — полная поверхность
а) Куб  *Фиг. 1—10*	a — ребро d — диагональ $d^2 = 3a^2$	$V = a^3$; $A = 6a^2$
б) Трехгранная призма, усеченная не параллельно основанию  *Фиг. 1—11*	N — сечение, перпендикулярное ребрам a b, c — длины трех параллельных ребер	$V = \frac{1}{3}(a + b + c)N$
в) Усеченная не параллельно основанию n-гранная призма (и цилиндр). Если l — длина линии, соединяющей центры тяжести оснований, N — сечение призмы, перпендикулярное к l, то $V = Nl$		
г) Прямоугольный параллелепипед  *Фиг. 1—12*	a, b, c — длины трех ребер d — диагональ	$V = abc$ $d^2 = a^2 + b^2 + c^2$ $A = 2(ab + ac + bc)$
2 Пирамида.  *Фиг. 1—13*	F — площадь основания h — высота	$V = \frac{1}{3}Fh$
Усеченная пирамида	F, f — площади параллельных оснований h — расстояние между основаниями B и b — две соответственные стороны оснований F и f	$V = \frac{1}{3}h\left(F + f + \sqrt{Ff}\right) =$ $= \frac{1}{3}hF\left[1 + \frac{b}{B} + \left(\frac{b}{B}\right)^2\right]$

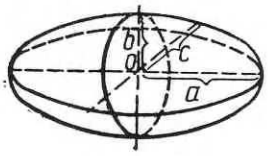
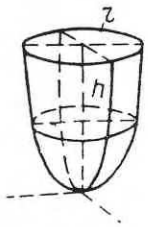
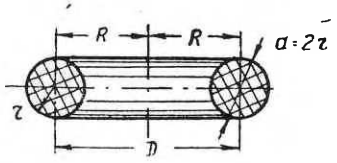
Продолжение табл. 1—9

Тело	Обозначение размеров	V — объем M — боковая поверхность A — полная поверхность
3. Цилиндр  *Фиг. 1—14*	F — площадь основания h — высота	$V = Fh$
а) Круговой цилиндр	r — радиус основания h — высота	$V = \pi r^2 h$ $M = 2\pi rh$ $A = 2\pi r(r + h)$
б) Цилиндр прямой, усеченный не параллельно основанию	h_1 — наименее короткая образующая цилиндра h_2 — наиболее длинная образующая цилиндра r — радиус основания	$V = \pi r^2 \dfrac{h_1 + h_2}{2}$ $M = \pi r(h_1 + h_2)$
в) Полый цилиндр (труба)	R — наружный радиус r — внутренний радиус h — высота $\delta = R - r$ — толщина стенки $\rho = \dfrac{1}{2}(R + r)$ — средний радиус	$V = \pi h(R^2 - r^2) = \pi h\delta(2R - \delta) =$ $= \pi h\delta(2r + \delta) = 2\pi h\delta\rho$
4. Прямой круговой конус  *Фиг. 1—15*	r — радиус основания h — высота S — образующая	$V = \dfrac{1}{3}\pi r^2 h$ $M = \pi r\sqrt{r^2 + h^2} = \pi rS$ $S = \sqrt{r^2 + h^2}$
Усеченный круговой конус	R и r — радиусы большего и меньшего оснований h — высота $\sigma = R + r$ $\delta = R - r$ $s = \sqrt{\delta^2 + h^2}$	$V = \dfrac{1}{3}\pi h(R^2 + Rr + r^2) =$ $= \dfrac{h}{4}\left(\pi\sigma^2 + \dfrac{1}{3}\pi\delta^2\right)$ $M = \pi s\sigma$

Продолжение табл. 1—9

Тело	Обозначение размеров	V — объем M — боковая поверхность A — полная поверхность
5. Шар  *Фиг. 1—16*	r — радиус d — диаметр	$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = 4,1888\, r^3 = \frac{1}{6}\pi d^3 = 0,5236\, d^3$ $A = 4\pi r^2 = \pi d^2 = 4F$, где F — площадь большого круга
а) Полый шар	R — наружный радиус r — внутренний радиус D и d — внешний и внутренний диаметры	$V = \frac{4}{3}\pi (R^3 - r^3) = \frac{1}{6}\pi (D^3 - d^3)$
б) Шаровой сегмент  *Фиг. 1—17*	f — высота сегмента r — радиус шара a — радиус основания	$V = \frac{1}{6}\pi f (3a^2 + f^2) = \pi f^2 \left(r - \frac{f}{3}\right)$ $M = 2\pi r f = \pi (a^2 + f^2)$ $a^2 = f (2r - f)$
в) Шаровой пояс  *Фиг. 1—18*	h — высота пояса r — радиус шара a, b — радиус оснований пояса ($a > b$)	$V = \frac{1}{6}\pi h (3a^2 + 3b^2 + h^2)$ $M = 2\pi r h$ $r^2 = a^2 + \left(\frac{a^2 - b^2 - h^2}{2h}\right)^2$
г) Шаровой сектор  *Фиг. 1—19*	r — радиус шара f — высота стрелки сегмента a — радиус основания	$V = \frac{2}{3}\pi r^2 f = 2,0944\, r^2 f$ $A = \pi r (2f + a)$

Продолжение табл. 1—9

Тело	Обозначение размеров	V — объем M — боковая поверхность A — полная поверхность
6. Эллипсоид  *Фиг. 1—20*	a, b, c — полуоси	$V = \frac{4}{3}\pi abc = 4,1888\,abc$
Эллипсоид вращения	1) если $2a$ — ось вращения 2) если $2b$ — ось вращения	$V = \frac{4}{3}\pi ab^2$ $V = \frac{4}{3}\pi a^2 b$
7. Параболоид вращения  *Фиг. 1—21*	r — радиус основания h — высота параболоида	$V = \frac{1}{2}\pi r^2 h = 1,5708\,r^2 h$
Усеченный параболоид вращения	r и R — радиусы параллельных оснований h — высота	$V = \frac{1}{2}\pi (R^2 + r^2) h$
8. Цилиндрическое кольцо  *Фиг. 1—22*	r — радиус сечения R — радиус оси кольца D — диаметр оси кольца	$V = 2\pi^2 Rr^2 = 19,739\,Rr^2 =$ $= \frac{1}{4}\pi^2 Dd^2 = 2,4674\,Dd^2$ $A = 4\pi^2 Rr = 39,478\,Rr =$ $= \pi^2 Dd = 9,8696\,Dd$

Тела вращения вообще

Поверхность тела, происшедшая вследствие вращения плоской кривой вокруг оси, лежащей в плоскости кривой и ее не пересекающей, равна произведению длины образующей линии на путь ее центра тяжести $M = l\,2\pi r$.

Объем тела, происшедший вследствие вращения плоской фигуры вокруг оси, лежащей в плоскости фигуры и ее не пересекающей, равен произведению площади образующей фигуры на путь ее центра тяжести: $V = F\,2\pi r$.

Положение центра тяжести линий и плоских фигур — см. главу 4.

1—10. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Таблица 1—10

Значения функции некоторых углов

α°	0°	30°	45°	60°	90°	180°	270°	360°
$\sin\alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2} = 0{,}707$	$\frac{1}{2}\sqrt{3} = 0{,}866$	+1	0	−1	0
$\cos\alpha$	+1	$\frac{1}{2}\sqrt{3} = 0{,}866$	$\frac{1}{2}\sqrt{2} = 0{,}707$	$\frac{1}{2}$	0	−1	0	+1
$\operatorname{tg}\alpha$	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3} = 0{,}577$	1	$\sqrt{3} = 1{,}732$	∞	0	∞	0
$\operatorname{ctg}\alpha$	∞	$\sqrt{3} = 1{,}732$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3} = 0{,}577$	0	∞	0	∞

Таблица 1—11

Знаки функций в зависимости от угла φ

φ° между	0° и 90°	90° и 180°	180° и 270°	270° и 360°
$\sin\varphi$	+	+	−	−
$\cos\varphi$	+	−	−	+
$\operatorname{tg}\varphi$	+	−	+	−
$\operatorname{ctg}\varphi$	+	−	+	−

Таблица 1—12

Значения функций дополнительных углов

$\varphi^\circ =$	$\pm\alpha^\circ$	$90^\circ \pm \alpha$	$180^\circ \pm \alpha$	$270^\circ \pm \alpha$
$\sin\varphi$	$\pm\sin\alpha$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$
$\cos\varphi$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$
$\operatorname{tg}\varphi$	$\pm\operatorname{tg}\alpha$	$\mp\operatorname{ctg}\alpha$	$\pm\operatorname{tg}\alpha$	$\mp\operatorname{ctg}\alpha$
$\operatorname{ctg}\varphi$	$\pm\operatorname{ctg}\alpha$	$\mp\operatorname{tg}\alpha$	$\pm\operatorname{ctg}\alpha$	$\mp\operatorname{tg}\alpha$

$\sin(45^\circ \pm \alpha) = \cos(45^\circ \mp \alpha)$; $\operatorname{tg}(45^\circ \pm \alpha) = \operatorname{ctg}(45^\circ \mp \alpha)$

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ТРИГОНОМЕТРИИ

1. Зависимость между функциями одного угла

1) $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$;

2) $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$;

3) $\operatorname{ctg}\alpha = \dfrac{\cos\alpha}{\sin\alpha} = \dfrac{1}{\operatorname{tg}\alpha}$;

4) $1 + \operatorname{tg}^2\alpha = \dfrac{1}{\cos^2\alpha} = \sec^2\alpha$;

5) $1 + \operatorname{ctg}^2\alpha = \dfrac{1}{\sin^2\alpha} = \operatorname{cosec}^2\alpha$;

6) $\sin\alpha = \sqrt{1-\cos^2\alpha} = \dfrac{\operatorname{tg}\alpha}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}} = \dfrac{1}{\sqrt{1+\operatorname{ctg}^2\alpha}}$;

7) $\cos\alpha = \sqrt{1-\sin^2\alpha} = \dfrac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}} = \dfrac{\operatorname{ctg}\alpha}{\sqrt{1+\operatorname{ctg}^2\alpha}}$;

8) $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{\sin\alpha}{\sqrt{1-\sin^2\alpha}} = \dfrac{\sqrt{1-\cos^2\alpha}}{\cos\alpha} = \dfrac{1}{\operatorname{ctg}\alpha}$.

2. Зависимость между функциями двух углов

1) $\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta$;

2) $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$;

3) $\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = (\operatorname{tg}\alpha \pm \operatorname{tg}\beta) : (1 \mp \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta)$;

4) $\operatorname{ctg}(\alpha \pm \beta) = (\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta \mp 1) : (\operatorname{ctg}\beta \pm \operatorname{ctg}\alpha)$;

5) $\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha-\beta)$;

6) $\sin\alpha - \sin\beta = 2\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\sin\frac{1}{2}(\alpha-\beta)$;

7) $\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha-\beta)$;

8) $\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\sin\frac{1}{2}(\alpha-\beta)$;

9) $\operatorname{tg}\alpha \pm \operatorname{tg}\beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$;

10) $\operatorname{ctg}\alpha \pm \operatorname{ctg}\beta = \pm\frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\sin\alpha\sin\beta}$;

11) $\sin(\alpha+\beta)\sin(\alpha-\beta) = \sin^2\alpha - \sin^2\beta = \cos^2\beta - \cos^2\alpha$;

12) $\cos(\alpha+\beta)\cos(\alpha-\beta) = \cos^2\alpha - \sin^2\beta = \cos^2\beta - \sin^2\alpha$;

13) $\sin\alpha\sin\beta = \frac{1}{2}\cos(\alpha-\beta) - \frac{1}{2}\cos(\alpha+\beta)$;

14) $\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}\cos(\alpha-\beta) + \frac{1}{2}\cos(\alpha+\beta)$;

15) $\sin\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}\sin(\alpha+\beta) + \frac{1}{2}\sin(\alpha-\beta)$;

16) $\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta = (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) : (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) = -(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta) : (\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta)$;

17) $\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\beta = (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta) : (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) = -(\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta) : (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta)$.

3. Значения функций при умножении и делении углов на целые числа

1) $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$;

2) $\sin\alpha = 2\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2}$;

3) $\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha = 1 - 2\sin^2\alpha = 2\cos^2\alpha - 1$;

4) $\sin 3\alpha = 3\sin\alpha - 4\sin^3\alpha$;

5) $\cos 3\alpha = 4\cos^3\alpha - 3\cos\alpha$;

6) $\sin 4\alpha = 8\cos^3\alpha\sin\alpha - 4\cos\alpha\sin\alpha$;

7) $\cos 4\alpha = 8\cos^4\alpha - 8\cos^2\alpha + 1$;

8) $\sin\frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{1+\cos\alpha} - \frac{1}{2}\sqrt{1-\sin\alpha}$;

9) $\cos\frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{1+\sin\alpha} + \frac{1}{2}\sqrt{1-\sin\alpha}$;

10) $\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha} = \frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha} = \sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{1+\cos\alpha}}$;

11) $\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2} = \frac{\sin\alpha}{1-\cos\alpha} = \frac{1+\cos\alpha}{\sin\alpha} = \sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{1-\cos\alpha}}$;

12) $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\operatorname{tg}\alpha}{1-\operatorname{tg}^2\alpha} = \frac{2}{\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{tg}\alpha}$;

13) $\operatorname{tg}\alpha = \frac{2\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}{1+\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$;

14) $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2\alpha - 1}{2\operatorname{ctg}\alpha} = \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\alpha - \frac{1}{2}\operatorname{tg}\alpha$;

15) $\operatorname{ctg}\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2\frac{\alpha}{2} - 1}{2\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}}$;

16) $\sin\alpha = \frac{2\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}{1+\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$;

17) $\cos\alpha = \frac{1-\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{2}}{1+\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$.

1—11. ПЛОСКИЕ ТРЕУГОЛЬНИКИ

Обозначения:

a, b, c — стороны треугольника;
α, β, γ — углы, им противолежащие;

$p = \frac{1}{2}(a+b+c)$ — полупериметр.

1. Общие формулы

1) $a = b\cos\gamma + c\cos\beta$; $b = c\cos\alpha + a\cos\gamma$; $c = a\cos\beta + b\cos\alpha$;

2) $\operatorname{tg}\alpha = \frac{a\sin\gamma}{b - a\cos\gamma}$;

3) $\sin\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{(p-b)(p-c)}{bc}}$;

4) $\cos\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{p(p-a)}{bc}}$;

5) $\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{(p-b)(p-c)}{p(p-a)}}$;

6) $(a+b):c=\cos\frac{1}{2}(\alpha-\beta):\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$;

7) $(a-b):c=\sin\frac{1}{2}(\alpha-\beta):\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$.

2. Косоугольные треугольники

Таблица 1—13

Данные	Искомые	Формулы
a, b, c	α	$\cos\alpha=\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}$
a, b, α	β	$\sin\beta=\frac{b\sin\alpha}{a}$
	γ	$\gamma=180^\circ-(\alpha+\beta)$
	c	$c=\frac{a\sin\gamma}{\sin\alpha}=b\cos\alpha\pm\pm\sqrt{a^2-b^2\sin^2\alpha}$
a, α, β	b	$b=\frac{a\sin\beta}{\sin\alpha}$
	c	$c=\frac{a\sin\gamma}{\sin\alpha}=\frac{a\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha}$
a, b, γ	α, β	$\operatorname{tg}\alpha=\frac{a\sin\gamma}{b-a\cos\gamma}$; $\beta=180^\circ-(\alpha+\gamma)$ или $\frac{\alpha+\beta}{2}=90^\circ-\frac{\gamma}{2}$ и $\operatorname{tg}\frac{\alpha-\beta}{2}=\frac{a-b}{a+b}\operatorname{ctg}\frac{\gamma}{2}$
		$\alpha=\frac{\alpha+\beta}{2}+\frac{\alpha-\beta}{2}$; $\beta=\frac{\alpha+\beta}{2}-\frac{\alpha-\beta}{2}$
	c	$c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\gamma}=\frac{a\sin\gamma}{\sin\alpha}$

3. Прямоугольные треугольники

Если a и b катеты, c — гипотенуза и α — угол, противолежащий катету a, то имеем соотношения:

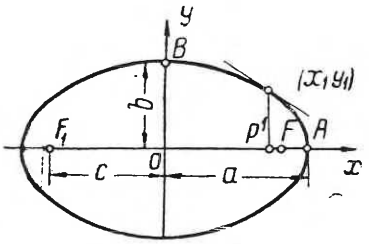
1) $a=c\sin\alpha$; 3) $a=b\operatorname{tg}\alpha$;

2) $b=c\cos\alpha$; 4) $b=a\operatorname{ctg}\alpha$;

5) $a^2+b^2=c^2$.

1—12. КОНИЧЕСКИЕ СЕЧЕНИЯ (КРИВЫЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА)

1. Эллипс



Фиг. 1—23

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1;$$

полуоси $AO=a$, $BO=b$;

расстояние фокуса от центра

$$OF=OF_1=c=\sqrt{a^2-b^2};$$

подупараметр

$$p=\frac{b}{a}\sqrt{a^2-c^2}=\frac{b^2}{a}=a(1-\varepsilon^2);$$

эксцентриситет

$$\varepsilon=\frac{c}{a};$$

уравнение касательной в точке

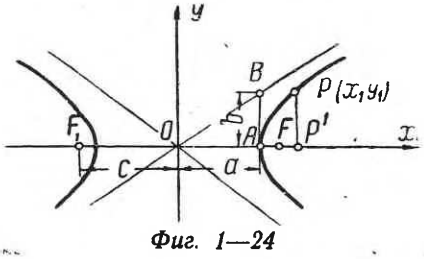
$$P(x_1, y_1): \frac{xx_1}{a^2}+\frac{yy_1}{b^2}=1;$$

площадь

$$OBPP'=\frac{1}{2}xy+\frac{1}{2}ab\arcsin\frac{x}{a};$$

вся площадь эллипса равна πab.

2. Гипербола



Фиг. 1—24

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1;$$

полуоси $AO = a$; $AB = b$;

фокусное расстояние

$$OF = OF_1 = c = \sqrt{a^2+b^2};$$

полупараметр

$$p = \frac{b^2}{a} = a(\varepsilon^2 - 1);$$

эксцентриситет

$$\varepsilon = \frac{c}{a};$$

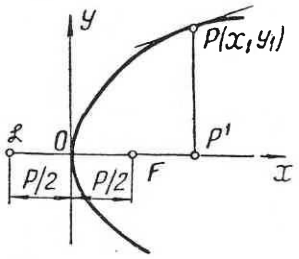
уравнение касательной в точке

$$P(x_1\, y_1): \frac{xx_1}{a^2} - \frac{yy_1}{b^2} = 1.$$

Площадь

$$APP' = \frac{xy}{2} - \frac{ab}{2} \ln\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right).$$

Парабола



Фиг. 1—25

$y^2 = 2px$ (p — параметр); расстояние фокуса F от вершины O

$$OF = \frac{1}{2}p;$$

уравнение касательной к параболе в точке $P(x_1y_1)$

$$yy_1 = p(x+x_1);$$

площадь сегмента

$$OPP' = \frac{2}{3}xy.$$

1—13. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

1. Производная

Если $y = f(x)$ и Δx — бесконечно малое приращение x, то производная y по x:

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right).$$

Производная постоянной величины равна нулю.

2. Дифференциал

Бесконечно малое приращение функции $y = f(x)$ можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\Delta f(x) = \Delta y = f'(x)\Delta x + \varepsilon\Delta x,$$

где ε и Δx — величины бесконечно малые.

Первое слагаемое называется дифференциалом функции и обозначается:

$$df(x) = dy = f'(x)\Delta x.$$

Дифференциалом независимой переменной называется ее бесконечно малое приращение, т. е. $dx = \Delta x$, следовательно:

$$dy = f'(x)\,dx \text{ и } f'(x) = \frac{dy}{dx} = y'.$$

3. Основные формулы дифференцирования

1) $da = 0$;
2) $d(a \pm x) = \pm dx$;
3) $d(u \pm v) = du \pm dv$;
4) $d(ax) = adx$.
5) $d(uv) = udv + vdu$;
6) $d\left(\frac{u}{a}\right) = \frac{du}{a}$;
7) $d\left(\frac{1}{v}\right) = -\frac{1}{v^2}dv$;
8) $d\left(\frac{a}{v}\right) = -\frac{a}{v^2}dv$;
9) $d\left(\frac{u}{a}\right) = \frac{vdu - udv}{v^2}$;
10) $dx^n = nx^{n-1}dx$.
11) $da^x = a^x \ln a dx$, $a > 0$;
12) $de^x = e^x dx$;
13) $d(u^v) = u^{v-1}(vdu + u \ln u dv)$;
14) $d \ln v = \frac{dv}{v}$;
15) $d \lg v = 0{,}434\frac{dv}{v}$;
16) $d\sqrt{x} = \frac{dx}{2\sqrt{x}}$;
17) $d \sin x = \cos x dx$;
18) $d \cos x = -\sin x dx$;
19) $d \operatorname{tg} x = \frac{dx}{\cos^2 x} = \sec^2 x dx$;
20) $d \operatorname{ctg} x = -\frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{cosec}^2 x dx$;

21) $d\sec x = \sec x \operatorname{tg} x dx$;

22) $d\operatorname{cosec} x = -\operatorname{cosec} x \operatorname{ctg} x dx$;

23) $d \arcsin x = \dfrac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$;

24) $d \arccos x = -\dfrac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$;

25) $d \operatorname{arc tg} x = \dfrac{dx}{1+x^2}$;

26) $d \operatorname{arc ctg} x = -\dfrac{dx}{1+x^2}$;

27) $d \operatorname{sh} x = \operatorname{ch} x dx$;

28) $d \operatorname{ch} x = \operatorname{sh} x dx$;

29) $d \operatorname{th} x = \dfrac{dx}{\operatorname{ch}^2 x}$;

30) дифференцирование функции от функции:

$$u = f(y); y = f(x); du = \frac{du}{dy}\frac{dy}{dx}dx;$$

31) полный дифференциал функции $u = f(x, y, z, \ldots)$:

$$du = \frac{\partial u}{\partial x}dx + \frac{\partial u}{\partial y}dy + \frac{\partial u}{\partial z}dz + \ldots$$

32) в случае сложности функции $v = f(u, v, w, \ldots)$, где u, v, w — непрерывные функции от x:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\partial v}{\partial u}\frac{du}{dx} + \frac{\partial v}{\partial v}\frac{dv}{dx} + \frac{\partial v}{\partial w}\frac{dw}{dx} + \ldots$$

33) дифференцирование неявных функций:

$$f(x, y) = 0; y' = \frac{dy}{dx} = -\frac{\partial f}{\partial x} : \frac{\partial f}{\partial y}.$$

1—14. НАХОЖДЕНИЕ МАКСИМУМА И МИНИМУМА

1. Функция одной переменной

Для нахождения максимума (M) и минимума (m) функции $f(x)$, находят ее производную, приравнивают нулю, решают уравнение $f'(x) = 0$ и полученные корни подставляют во вторую производную $f''(x)$.

Если $f''(x_1) < 0$, то при x_1 функция имеет максимум.
Если $f''(x_1) > 0$, то при x_1 функция имеет минимум.
Если $f'''(x_1) = 0$, то подставляют x_1 в третью производную.
Если $f'''(x) \neq 0$, то при x_1 нет ни максимума, ни минимума.
Если $f'''(x) = 0$, то подставляют x в четвертую производную.

Общее правило. Корень x_1 уравнения $f'(x) = 0$ подставляют последовательно в дальнейшие производные и смотрят, какая из производных после этой подстановки первая не будет нулем. Если это k-я производная и k — четное, то функция имеет максимум при $f^{(k)}(x_1) < 0$ и минимум при $f^{(k)}(x_1) > 0$. Если же k — нечетное, то $f(x)$ при $x = x_1$ не имеет ни максимума, ни минимума.

2. Неявная функция $f(x,y) = 0$

Находят $\dfrac{\partial f}{\partial x}$ и решают совместно уравнения

$$f(x, y) = 0 \text{ и } \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = 0;$$

исследуют полученные решения $x_1, x_2, \ldots$ подстановкой в $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ и $\dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}$.

Если $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ и $\dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ разных знаков, то при x_1 функция y имеет максимум.

Если $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ и $\dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ одного знака, то при x_1 функция y имеет минимум.

Если $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ или $\dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ равно 0, то следует, если возможно, перейти просто к исследованию функции при значениях, близких к x, и непосредственно убедиться, имеется ли максимум или минимум.

3. Функция двух переменных $z = f(x,y)$

Находят $\dfrac{\partial f}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ и решают совместно уравнения

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 0.$$

Полученные решения (x_1, y_1), (x_2, y_2) подставляют в $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2}$, $\dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}$, $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x\, \partial y}$. Составляют выражение:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \dfrac{\partial^2 f}{\partial x\, \partial y} \\ \dfrac{\partial^2 f}{\partial y\, \partial x} & \dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{vmatrix}.$$

Если при данных (x_i, y_i) $\Delta > 0$, то $z = f(x, y)$ имеет максимум при $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} < 0$, и минимум при $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} > 0$.

Если $\Delta < 0$, то $z = f(x, y)$ не имеет ни максимума, ни минимума.

Если $\Delta = 0$, то рекомендуется просто исследовать функцию z при значениях, близких к x_i и y_i и непосредственно убедиться, имеется ли максимум или минимум.

4. Неопределенные выражения

1. Если отношение двух функций $\dfrac{f(x)}{\varphi(x)} = \dfrac{0}{0}$ или $\dfrac{\infty}{\infty}$ при $x = a$, то

$$\lim\left[\frac{f(x)}{\varphi(x)}\right] = \frac{f'(x)}{\varphi'(x)},$$

т. е. для раскрытия неопределенности следует взять отношение первых производных.

2. Если $f(x)\,\varphi(x)=0\cdot\infty$ при $x=a$, то полагая $\varphi(x)=1:\psi(x)$, получим

$$\frac{f(x)}{\psi(x)}=\frac{0}{0}.$$

Далее — по предыдущему.

3. Если $f(x)^{\varphi(x)}=0^0$ или 1^∞ или ∞^0, то логарифмируя, найдем:

$$\ln[f(x)^{\varphi(x)}]=\varphi(x)\ln f(x),$$

т. е. приходим к случаю 2.

4. Если $f(x)-\varphi(x)=\infty-\infty$, то пишем:

$$f(x)-\varphi(x)=\frac{1:\varphi(x)-1:f(x)}{1:f(x)\,\varphi(x)}=\frac{0}{0}$$

затем поступаем, как прежде.

1—15. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

1) $\int a\,dx=ax+c;$

2) $\int(u+v)\,dx=\int u\,dx+\int v\,dx;$

3) $u\,dv=uv-\int v\,du$ (интегрирование по частям);

4) $\int f(x)\,dx=\int f[\varphi(z)]\,\varphi'(z)\,dz;\ x=\varphi(z)$ (интегрирование подстановкой);

5) $\int a^x\,dx=\frac{a^x}{\ln a}+c;$

6) $\int e^x\,dx=e^x+c;$

7) $\int\frac{dx}{x}=\ln x+c;$

8) $\int x^n\,dx=\frac{x^{n+1}}{n+1}+c;$

9) $\int\frac{dx}{x^2}=-\frac{1}{x}+c;$

10) $\int\sqrt{x}\,dx=\frac{2}{3}\sqrt{x^3}+c;$

11) $\int\frac{dx}{\sqrt{x}}=2\sqrt{x}+c;$

12) $\int\cos x\,dx=\sin x+c;$

13) $\int\sin x\,dx=-\cos x+c;$

14) $\int\frac{dx}{\cos^2 x}=\operatorname{tg}x+c;$

15) $\int\frac{dx}{\sin^2 x}=-\operatorname{ctg}x+c;$

16) $\int\frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}=\arcsin x+c=-\arccos x+c';$

17) $\int\frac{dx}{1+x^2}=\operatorname{arc\,tg}x+c=-\operatorname{arc\,ctg}x+c';$

18) $\int\operatorname{tg}x\,dx=-\ln\cos x+c;$

19) $\int\operatorname{ctg}x\,dx=\ln\sin x+c;$

20) $\int_a^b f(x)\,dx=F(b)-F(a)=-\int_b^a f(x)\,dx;$

21) $\int_a^d=\int_a^b+\int_b^c+\int_c^d;$

22) $\int_a^c=\int_a^b-\int_c^b=\int_b^c-\int_b^a;$

23) производная интеграла по параметру: $\frac{\partial}{\partial u}\int f(x,u)\,dx=\int\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\,dx;$

24) формула среднего значения. Если $f(x)$ и $\varphi(x)$ непрерывны в промежутке (a, b), а $\varphi(x)$ — знакопостоянная функция в том же промежутке,

то $\int_a^b f(x)\,\varphi(x)\,dx=f(\xi)\int_a^b\varphi(x)\,dx$, где $a<\xi<b$;

если $\varphi(x)=1$, то

$$\int_a^b f(x)\,dx=(b-a)\,f(\xi).$$

1—16. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

1. Уравнения первого порядка

Таблица 1—14

Тип уравнения	Уравнение	Решение
С разделяющимися переменными	$F_1(x)\,F_2(y)\,dx+F_3(x)\,F_4(y)\,dy=0$	$\int\frac{F_1(x)}{F_3(x)}\,dx+\int\frac{F_4(y)}{F_2(y)}\,dy=C$
Однородное	$M(x, y)\,dx+N(x, y)\,dy=0$ [M и N — однородные функции x и y одинакового измерения n: $M(tx, ty)=t^nM(x,y)$ $N(tx, ty)=t^nN(x, y)$]	Подстановка $u=\frac{y}{x}$ в дифференциальное уравнение ($y=ux$, $dy=udx+xdu$) приводит к уравнению относительно функции u с разделяющимися переменными. Находим его решение $u=f(x)$ $y=xf(x)$
Линейное	$y'+P(x)\,y=Q(x)$	$y=e^{-\int Pdx}\left[\int Q\,e^{\int Pdx}dx+C\right]$
Уравнение Бернулли	$y'+P(x)\,y=Q(x)\,y^n$	Подстановка $u=y^{-n+1}$; $\frac{y'}{y^n}+P(x)\frac{1}{y^{n-1}}=Q(x)$; $u'+\frac{-1}{n-1}P(x)\,u=\frac{-1}{n-1}Q(x)$ приводит к линейному уравнению относительно u

2. Уравнения второго порядка

Таблица 1—15

Тип уравнения	Уравнение	Решение
Уравнение, не содержащее y и y'	$y''=f(x)$	$y=\int\left[\int f(x)\,dx\right]dx+C_1x+C_2$
Уравнение, не содержащее y	$y''=f(x, y')$	Подстановка $y'=p$, $y''=p'$ приводит к уравнению первого порядка: $p'=f(x, p)$. Его решение: $p=\varphi(x, C_1)$ $y=\int\varphi(x, C_1)\,dx+C_2$
Уравнение, не содержащее x	$y''=f(y, y')$	Подстановка $y'=p$, $y''=p\frac{dp}{dy}$ приводит к уравнению первого порядка: $p\frac{dp}{dy}=f(y, p)$. Его решение: $p=\varphi(y, C_1)$ $x=\int\frac{dy}{\varphi(y, C_1)}+C_2$

Продолжение табл. 1—15

Тип уравнения	Уравнение	Решение
Линейное уравнение с постоянными коэффициентами, однородное	$y'' + p_1 y' + p_2 y = 0$ (p_1, p_2 — постоянные)	Решается характеристическое уравнение: $r^2 + p_1 r + p_2 = 0.$ Если r_1, r_2 — различные действительные, то $y = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}.$ Если $r_1 = r_2$, то $y = (C_1 + C_2 x) e^{r_1 x}.$ Если r_1 и $r_2 = \alpha \pm \beta e$, то $y = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$
Линейное уравнение с постоянными коэффициентами, неоднородное	$y'' + p_1 y' + p_2 y = F(x)$	Находится общее решение однородного уравнения $y'' + p_1 y' + p_2 y = 0$ (функция $u = \varphi_1 (x_1 C_1 C_2)$ и частное решение данного уравнения (функция $v = \varphi_2 (x)$ Р е ш е н и е: $y = u + v$

ГЛАВА ВТОРАЯ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

2—А. ГИДРОСТАТИКА

2—1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ТОЧКЕ

Давление покоящейся жидкости в точке, находящейся на глубине h под свободной поверхностью, будет равно:

$$p = p_0 + \gamma h, \qquad (2—1)$$

где p_0 — давление на свободной поверхности, или «внешнее» давление;

γ — объемный вес жидкости.

Давление γh сверх имеющегося на свободной поверхности называется избыточным давлением. Если давление на свободной поверхности равно атмосферному ($p_0 = p_a$), избыточное давление γh называется манометрическим давлением.

В большинстве случаев гидротехнической практики бывает необходимо определить силу избыточного гидростатического давления на поверхность твердого тела.

2—2. ДАВЛЕНИЕ НА ПЛОСКИЕ ФИГУРЫ

Сила избыточного давления жидкости на плоскую фигуру площадью F находится по формуле:

$$P = pF = F\gamma h_0, \qquad (2—2)$$

где p — давление в центре тяжести погруженной части фигуры, равное γh_0;

h_0 — глубина погружения центра тяжести фигуры под свободной поверхностью.

Точка приложения силы давления называется центром давления; ее координата находится по формуле:

$$z_c = z_0 + \frac{J_0}{Fz_0}, \qquad (2—3)$$

где z_c — координата центра давления, отсчитываемая в плоскости фигуры от свободной поверхности;

z_0 — координата центра тяжести фигуры, отсчитываемая также в плоскости фигуры: если фигура вертикальна, то $z_c = h_c$ — глубине погружения центра давления, а $z_0 = h_0$ — глубине погружения центра тяжести фигуры;

J_0 — момент инерции фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести фигуры.

Из уравнения (2—3) видно, что центр давления на плоскую фигуру, как правило, находится ниже центра тяжести фигуры на величину $\frac{J_0}{Fz_0}$, и лишь при горизонтальном положении фигуры координаты z_0 и z_c совпадают.

В табл. 2—1 даны формулы для определения сил давления и координат центра давления для некоторых вертикальных плоских фигур.

Сила давления P на прямоугольную фигуру, имеющую постоянную ширину, равна:

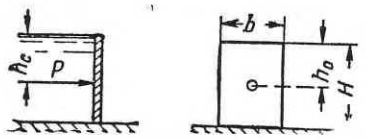
$$P = bS, \qquad (2—4)$$

где S — площадь эпюры давления на рассматриваемую фигуру (треугольник или трапеция); при этом ординаты эпюры выражают величину давления γh и имеют размерность: *кг/см²* или *т/м²*;

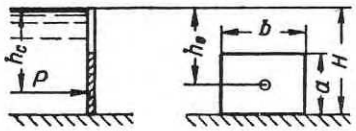
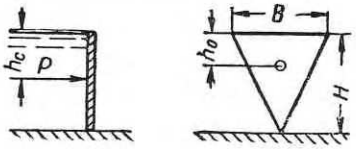
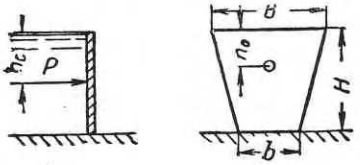
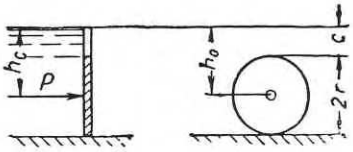
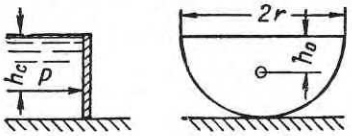
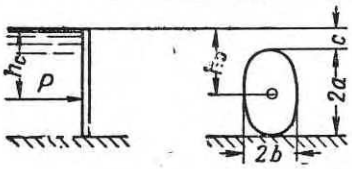
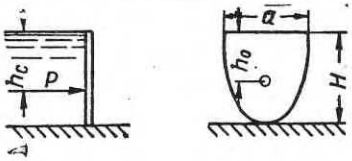
b — ширина фигуры.

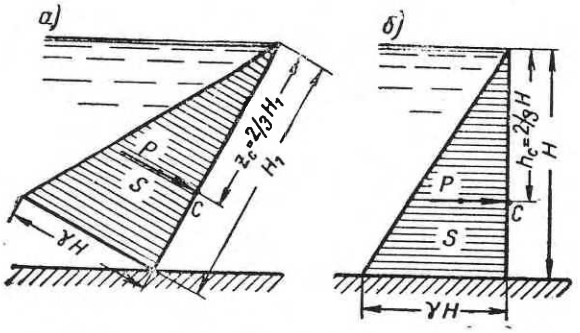
Таблица 2—1

Величины гидростатического давления на правильные фигуры, имеющие вертикальную ось симметрии

Наименование фигуры	Схемы фигуры	Площадь F	Глубина погружения центра тяжести фигуры h_0	Сила давления P на фигуру	Глубина погружения центра давления h_c
Прямоугольник	 *Фиг. 2—1*	bH	$\frac{H}{2}$	$\frac{1}{2}\gamma bH^2$	$\frac{2}{3}H$

Продолжение табл. 2—1

Наименование фигуры	Схемы фигуры	Площадь F	Глубина погружения центра тяжести фигуры h_0	Сила давления P на фигуру	Глубина погружения центра давления h_c
Прямоугольник	 *Фиг. 2—2*	ab	$H-\frac{a}{2}$	$\gamma ab\left(H-\frac{a}{2}\right)$	$H-a+\frac{a\,(3H-a)}{3\,(2H-a)}$
Равнобедренный треугольник	 *Фиг. 2—3*	$\frac{1}{2}BH$	$\frac{H}{3}$	$\frac{1}{6}\gamma BH^2$	$\frac{1}{2}H$
Трапеция	 *Фиг. 2—4*	$\frac{1}{2}H(B+b)$	$\frac{H}{3}\,\frac{B+2b}{B+b}$	$\frac{1}{6}\gamma H^2(B+2b)$	$\frac{H}{2}\,\frac{B+3b}{B+2b}$
Круг	 *Фиг. 2—5*	πr^2	$c+r$	$\gamma\pi r^2(r+c)$	$c+r+\frac{r^2}{4(r+c)}$
Полукруг	 *Фиг. 2—6*	$\frac{1}{2}\pi r^2$	$\frac{4}{3}\,\frac{r}{\pi}$	$\frac{2}{3}\gamma r^3$	$\frac{3}{16}\pi r$
Эллипс	 *Фиг. 2—7*	πab	$a+c$	$\gamma\pi ab\,(a+c)$	$a+c+\frac{a^2}{4(a+c)}$
Парабола	 *Фиг. 2—8*	$\frac{2}{3}aH$	$\frac{2}{5}H$	$\frac{4}{15}\gamma aH^2$	$\frac{4}{7}H$



Фиг. 2—9

Вектор силы давления проходит через центр тяжести эпюры давления (фиг. 2—9,*а*), т. е. $z_c = z_{0,эп}$.

При вертикальном положении фигуры (см. фиг. 2—9,*б*) $h_c = h_{0,эп}$; так для треугольной эпюры $h_{0,эп} = \frac{2}{3} H$.

Для трапецоидальной эпюры координаты центра тяжести находят или аналитически по формуле:

$$h_{0,эп} = (H - a) + \frac{c + 2d}{3(c + d)} a \qquad (2—5)$$

(где c и d — ординаты эпюры давления), или графически (фиг. 2—10). Для этого на продолжении верхнего основания трапеции откладывают отрезок, равный нижнему основанию, а на продолжении в противоположную сторону нижнего основания — отрезок, равный верхнему основанию. Нанесенные точки соединяют прямой линией.

Середины верхнего и нижнего оснований трапеции соединяют средней линией. Точка пересечения упомянутой прямой со средней линией дает центр тяжести трапеции, практически определяющий координату центра давления.

2—3. ДАВЛЕНИЕ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Давление жидкости на цилиндрическую поверхность с горизонтальной образующей получается как геометрическая сумма горизонтальной и вертикальной составляющих. Горизонтальная составляющая силы давления жидкости на цилиндрическую поверхность (фиг. 2—11) равна силе давления на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности, перпендикулярную искомой составляющей, и направлена со стороны жидкости нормально к вертикальной проекции поверхности:

$$P_x = F_x \gamma h_0, \qquad (2—6)$$

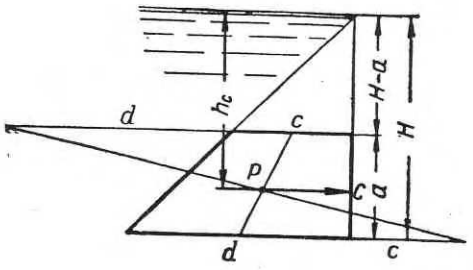
где P_x — горизонтальная составляющая силы давления на цилиндрическую поверхность;

F_x — вертикальная проекция цилиндрической поверхности;

h_0 — глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции.

Вертикальная составляющая P_y силы давления жидкости на криволинейную поверхность равна весу жидкости в объеме V так называемого «тела давления».

Тело давления есть объем, ограниченный цилиндрической поверхностью, проекцией ее на плоскость свободной поверхности жидкости и вертикальной ее проекцией (см. фиг. 2—11).



Фиг. 2—10

Если жидкость находится над криволинейной поверхностью, то вертикальная составляющая направлена вниз.

Если жидкость находится под криволинейной поверхностью, то вертикальная составляющая направлена вверх. Полная сила давления P определится геометрической суммой сил P_x и P_y:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}. \qquad (2—7)$$

Направление равнодействующей P определится углом β, величину которого находят по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_y}{P_x}. \qquad (2—8)$$

Горизонтальная составляющая силы давления P_x пройдет через центр тяжести эпюры давления на вертикальную проекцию поверхности (см. фиг. 2—11). Вертикальная составляющая силы давления P_y пройдет через центр тяжести тела давления.

Вектор силы полного давления P должен пройти через точку пересечения P_x и P_y под углом β к горизонту.

Точка C пересечения этого вектора с криволинейной поверхностью AB является центром давления жидкости на криволинейную поверхность.

Если криволинейная поверхность является поверхностью кругового цилиндра (фиг. 2—11), то полная сила давления будет нормальна к цилиндрической поверхности и пройдет через ее центр кривизны под углом β к горизонту и точка пересечения C силы давления с криволинейной поверхностью будет центром давления.

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДАВЛЕНИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

1. Сегментный затвор

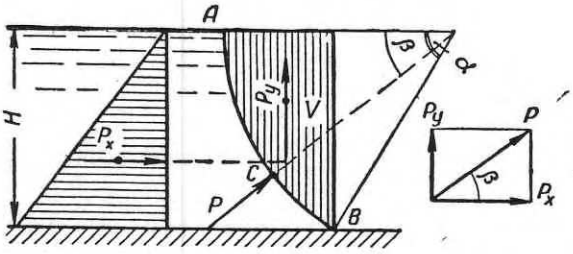
Даны: H, b, α;

$$P_x = F_x \gamma h_0 = bH\gamma \frac{H}{2} = b\gamma \frac{H^2}{2}; \quad (Фиг.\ 2—11)$$

$$P_y = -\gamma V = -\gamma b \left(\frac{\pi H^2 \alpha^\circ}{\sin^2 \alpha \cdot 360^\circ} - \frac{H^2}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right).$$

2. Секторный затвор

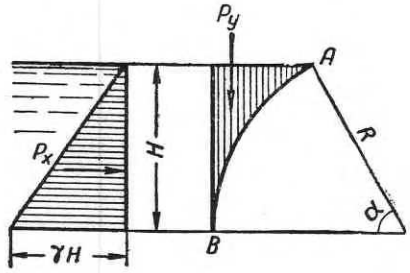
Даны: H, α, b и $R = \frac{H}{\sin \alpha}$;



Фиг. 2—11

$$P_x = b\gamma\,\frac{H^2}{2}\text{ (фиг. 2—12);}$$

$$P_y = \gamma\, b\left[RH\left(1-\frac{\cos\alpha}{2}\right)-\frac{\pi R^2\,\alpha^\circ}{360^\circ}\right].$$



Фиг. 2—12

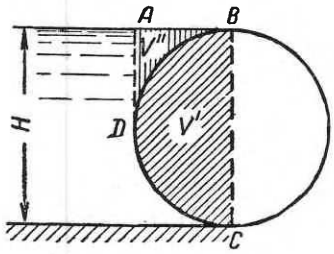
3. Цилиндрический затвор

Даны: H и b;

$$P_x = \frac{1}{2}\gamma\, bH^2;$$

$$P_y = \gamma\,(V' - V'') = -\gamma\, V = -\gamma b\,\frac{\pi H^2}{8}\quad\text{(фиг. 2—13),}$$

где V' — объем $ABCD$;
V'' — объем ABD;
V — объем BCD.



Фиг. 2—13

2—4. ПЛАВАНИЕ ТЕЛ

1. Пловучесть

Закон Архимеда. Жидкость действует на погруженное в нее тело с силой, направленной вверх и равной по величине весу жидкости в объеме погруженной части тела.

Всякое погруженное в жидкость однородное тело с объемным весом γ_1 находится под действием двух вертикальных сил: силы веса тела $G=\gamma_1 V$ (где V — объем тела) и определяемой по закону Архимеда силы давления жидкости $P_y=\gamma V$.

Для однородного тела могут быть три случая:

1) $\gamma_1 > \gamma$; так как $G-P_y=V(\gamma_1-\gamma)>0$ и сумма сил G и P_y дает равнодействующую, направленную вниз, то тело потонет;

2) $\gamma_1=\gamma$; в этом случае $G=P_y$ и тело будет находиться в жидкости в состоянии безразличного равновесия;

3) $\gamma_1<\gamma$; в этом случае $G-P_y=V(\gamma_1-\gamma)<0$, т. е. сумма сил дает равнодействующую, направленную вверх, которая заставит тело всплывать на поверхность. Тело всплывет и выйдет выше поверхности настолько, чтобы новое давление $P'_y=\gamma V'$ (где V' — объем погруженной части тела) уравновесилось весом тела $G=\gamma V$. Тогда для плавающего на поверхности тела мы будем иметь условие равновесия:

$$\gamma V'=\gamma_1 V$$

или

$$\frac{V'}{V}=\frac{\gamma_1}{\gamma};\qquad (2—9)$$

последнее соотношение является исходным при определении глубины погружения (осадки) плавающих однородных тел. Для призматических тел:

$$\frac{V'}{V}=\frac{y}{h}=\frac{\gamma_1}{\gamma},$$

где y — глубина погружения (осадка) тела;
h — полная его высота.

2. Остойчивость

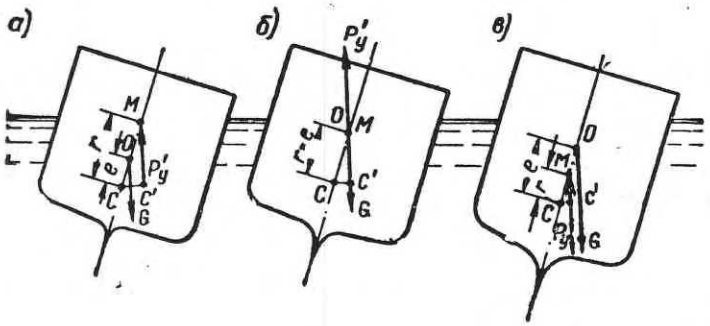
Способность плавающих тел находиться в заданном положении и возвращаться к нему после крена называется остойчивостью плавающих тел.

Точка C приложения вертикальной силы P давления воды, называемой водоизмещением судна, является центром тяжести наружного объема погруженной части судна, или так называемым центром водоизмещения (фиг. 2—14). При нормальном положении судна точка C лежит на одной вертикали с центром тяжести судна O. Прямая, проходящая через точки O и C, называется осью плавания. Расстояние OC обозначается через e.

Плоскость пересечения плавающего судна свободной поверхностью воды называется плоскостью плавания; линия ее пересечения с судном — ватерлинией, а ограниченная ватерлинией площадь в плоскости плавания называется площадью плоскости плавания.

При выходе плавающего тела из положения равновесия с поворотом оси плавания судна на небольшой угол (до 15°) центр тяжести тела O остается на месте, а центр водоизмещения C перемещается в новое положение C' по круговой дуге радиуса r с центром в точке M.

Точка M, являющаяся точкой пересечения оси плавания судна с новым направлением силы давления P'_y, называется метацентром, а расстояние $MC=r$ — метацентрическим радиусом.



Фиг. 2—14

Величина метацентрического радиуса определяется по формуле:

$$r = \frac{J}{W}, \qquad (2—10)$$

где J — момент инерции всей площади плоскости плавания относительно ее продольной оси симметрии;

W — объемное водоизмещение плавающего судна.

Могут быть три случая равновесия плавающего тела (фиг. 2—14):

1) метацентр M выше центра тяжести O ($r>e$) (фиг. 2—14,*а*); в этом случае силы G и P'_y образуют пару, поворачивающую судно в положение первоначального равновесия; судно находится в состоянии остойчивого равновесия;

2) метацентр M совпадает с центром тяжести O ($r=e$) (фиг. 2—14,*б*); в этом случае силы G и P'_y не дают вращающего момента, и судно, выведенное из нормального положения, не сможет само вернуться в него; этот случай является примером безразличного равновесия;

3) метацентр M ниже центра тяжести O ($r<e$) (фиг. 2—14,*в*); силы P'_x и G при выходе судна из нормального положения образуют пару с моментом, вращающим судно в сторону отклонения, т. е. вызывают дальнейшее опрокидывание судна; этот случай характеризует неустойчивое равновесие.

2—Б. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

2—5. МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ

Расход жидкости при истечении через небольшие отверстия в стенках резервуаров, баков, называемые малыми отверстиями в тонкой стенке (фиг. 2—15), определяется по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}, \qquad (2—11)$$

где $\mu = \varepsilon\varphi$; $\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$ — коэффициент сжатия струи;

φ — коэффициент скорости, равный

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha+\zeta}};$$

α — коэффициент кинетической энергии струи в сжатом сечении;

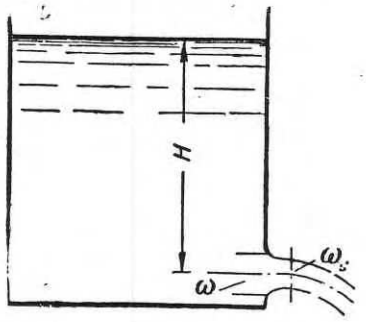
ζ — коэффициент сопротивления выходной кромки отверстия;

ω — площадь отверстия;

H_0 — полный напор над центром отверстия:

$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g};$$

v_0 — скорость подхода.



Фиг. 2—15

Теоретические значения коэффициентов при истечении из щели, основанные на гидромеханическом решении проф. Жуковского для идеальной жидкости, следующие:

$\varepsilon = 0{,}633$, $\varphi = 0{,}965$, $\mu = \frac{\pi}{\pi+2} = 0{,}611$, $\alpha = 1{,}073$.

Распределение скоростей и давлений в сжатом сечении на расстоянии $\frac{d}{2}$ от стенки, полученные проф. В. В. Ведерниковым, приведены на фиг. 2—16, *а* и *б*.

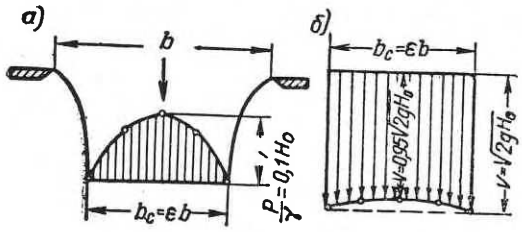
Для практических расчетов принимают значение коэффициента расхода $\mu = 0{,}59 \div 0{,}61$. Меньшим размерам отверстия соответствуют большие значения μ.

Сжатие струи при истечении через отверстия бывает:

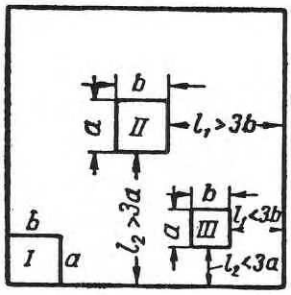
а) полное, когда струя получает сжатие по всему периметру;

б) неполное, когда часть периметра отверстия примыкает к продольным стенкам (фиг. 2—17,*I*).

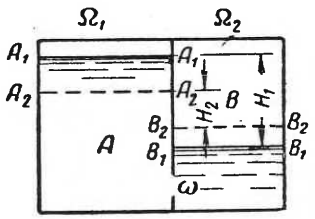
Полное сжатие разделяется на совершенное и несовершенное. Совершенным сжатием считается такое, когда дно и стенки с боков не влияют на сжатие струи; это бывает, если расстояние от любой стороны контура отверстия до направляющих стенок



Фиг. 2—16



Фиг. 2—17



Фиг. 2—18

сосуда не меньше тройного поперечного размера отверстия, т. е. $l_1>3b$ и $l_2>3a$ (фиг. 2—17,*II*).

Несовершенным сжатием считается такое, когда дно и боковые стенки влияют на сжатие струи; такое сжатие бывает при более близком расстоянии отверстия от направляющих стенок (фиг. 2—17,*III*).

В случае неполного сжатия коэффициент расхода $\mu_{нп}$ будет больше, чем коэффициент расхода μ для полного сжатия:

$$\mu_{нп} = \mu\left(1 + c\frac{n}{p}\right), \qquad (2—12)$$

где p — периметр всего отверстия;
n — часть периметра без сжатия;
$c = 0{,}13$ для круглых и $c=0{,}15$ для прямоугольных отверстий.

При истечении через затопленное отверстие (фиг. 2—18) расход определяется по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gz}, \qquad (2—13)$$

где z — разность уровней жидкости с обеих сторон отверстия.

2—6. БОЛЬШИЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ

Для расчета больших отверстий в тонкой стенке (при истечении из-под щита) можно применять те же формулы (2—11) и (2—12) со следующими ориентировочными значениями коэффициента расхода, рекомендованными акад. Павловским [15]:

малые отверстия с полным сжатием	$\mu=0{,}60$
отверстия средних размеров со сжатием струи со всех сторон при отсутствии направляющих стенок, в среднем	$\mu=0{,}65$
отверстия больших размеров с несовершенным, но всесторонним сжатием, в среднем	$\mu=0{,}70$
донные отверстия (т. е. вовсе не имеющие сжатия по дну) со значительным влиянием бокового сжатия	$\mu=0{,}65\div0{,}70$
донные отверстия с умеренным влиянием бокового сжатия	$\mu=0{,}70\div0{,}75$
донные отверстия с плавными боковыми подходами	$\mu=0{,}80\div0{,}85$
исключительные случаи весьма плавных подходов воды к отверстию со всех сторон (при условии обязательной лабораторной проверки)	$\mu=0{,}90$

2—7. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ

Расход при истечении через насадки определяется по формуле (2—11):

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}.$$

1. Внешний цилиндрический насадок

При длине насадка $l\geqslant(3\div4)d$ он может работать полным сечением (фиг. 2—19,*A*).

В последнем случае $\mu=\varphi=0{,}82$.

В работающем полным сечением насадке в сжатом сечении струи близ входа наблюдается вакуум $h_{вак}\approx\approx0{,}75H_0$; при затопленном выходе $h_{вак}\approx0{,}75z_0-h_п$, где $z_0=z+\frac{v_0^2}{2g}$; z — разность уровней с обеих сторон насадка, а $h_п$ — величина подтопления снизу. Величина вакуума независимо от H_0 не может превысить 6—7 *м*.

Гидравлический расчет напорных водопропускных труб подробно освещен в разделе 2—К этой главы.

При наклонном положении внешнего цилиндрического насадка под углом α (по отношению к нормали к стенке) коэффициент расхода уменьшается согласно данным табл. 2—2.

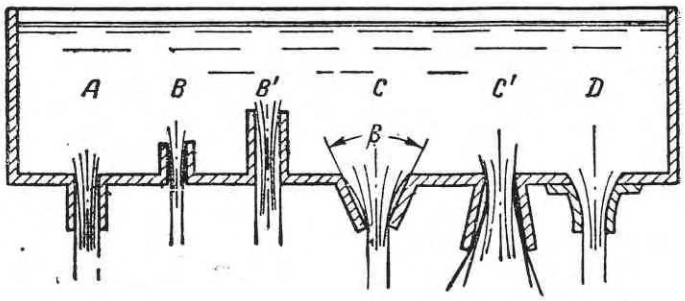
Таблица 2—2

Значения коэффициентов μ для наклонных внешних насадков

$\alpha°$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
μ	0,815	0,799	0,782	0,764	0,747	0,731	0,719

2. Внутренний цилиндрический насадок

При $l<3d$ внутренний цилиндрический насадок не заполняется водой (фиг. 2—19,*B*) и имеет коэффициент расхода $\mu=0{,}51$. При $l>(3\div4)d$ внутренний цилиндрический насадок заполняется и $\mu=0{,}71$ (фиг. 2—19,*B'*).



Фиг. 2—19

Таблица 2—3

Значения коэффициентов расхода μ конически сходящихся насадков

$\beta°$	1°	3°	5°	10°	13°24′	16°	20°	25°	30°	35°	45°
μ	0,852	0,892	0,920	0,937	0,945	0,938	0,922	0,908	0,896	0,883	0,857

3. Конические насадки

а) Конически сходящийся насадок (фиг. 2—19,*C*).

В зависимости от угла конусности β насадок имеет значения коэффициента расхода (отнесенные к выходному сечению насадка), приведенные в табл. 2—3.

б) Конически расходящийся насадок (фиг. 2—19,*C′*).

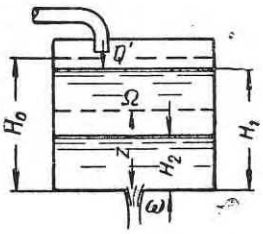
При угле конусности 5°—7° в среднем можно считать, что $\mu = 0{,}5$ (для выходного сечения насадка).

в) Коноидальный насадок (фиг. 2—19,*D*). Коэффициент расхода достигает значения $\mu = 0{,}97 \div 0{,}98$. При замене криволинейного очертания на круговое $\mu = 0{,}95$.

2—8. ИСТЕЧЕНИЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ

Будем предполагать резервуары призматическими, т. е. по высоте их $\Omega = \text{const}$.

1. Истечение при постоянном притоке Q_0 (фиг. 2—20)



Фиг. 2—20

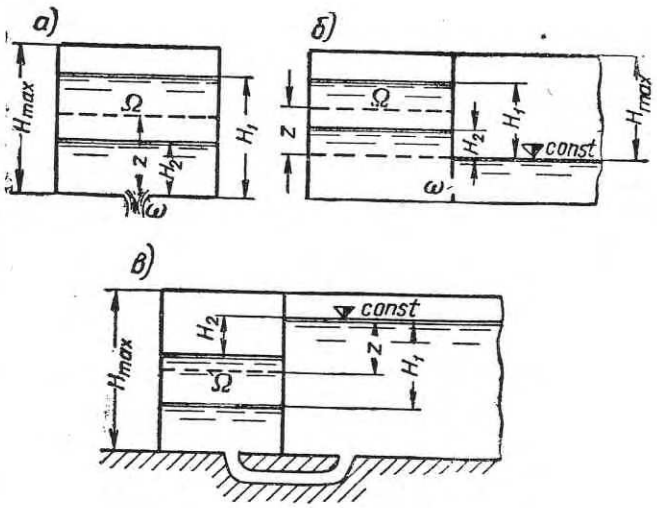
Для равновесия притока и расхода необходимо было бы иметь над выходным отверстием напор H_0, при котором $Q_0 = \mu\,\omega\sqrt{2g\,H_0}$,

т. е.
$$H_0 = \frac{Q_0^2}{2g\,\mu^2\,\omega^2}.$$

При $H_1 < H_0$ будет происходить увеличение напора до H_1, при $H_1 > H_0$ будет происходить уменьшение напора до H_1.

Время, требующееся для изменения напора от H_1 до H_2:

$$t_{H_1}^{H_2} = \frac{2\,\Omega}{\mu\,\omega\sqrt{2g}}\left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0}\,\ln\frac{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_2}}\right). \qquad (2\text{—}14)$$



Фиг. 2—21

2. Время опорожнения или наполнения резервуара

Для опорожнения призматического резервуара от уровня H_1 до уровня H_2 с истечением в атмосферу или под уровень (фиг. 2—21,*а* и *б*) или наполнения его от уровня H_2 до уровня H_1 из большого бьефа с постоянным напором (см. фиг. 2—21, *в*) требуется время:

$$t_{H_1}^{H_2} = \frac{2\Omega\left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}\right)}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \qquad (2\text{—}15)$$

Время полного опорожнения, или наполнения резервуара (при $H_2 = 0$)

$$t_{H_1}^{0} = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \qquad (2\text{—}15')$$

3. Истечение при переменном напоре под переменный уровень

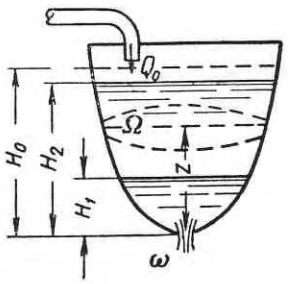
При истечении жидкости из одного резервуара с переменным уровнем в другой резервуар с переменным уровнем (см. фиг. 2—18) время изменения разности напоров от H_1 до H_2 равно:

$$t_{H_1}^{H_2} = \frac{2\Omega_1\Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2}\left(\frac{\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}}{\mu\omega\sqrt{2g}}\right). \qquad (2\text{—}16)$$

Время, необходимое для полного уравнивания горизонтов в резервуарах (H_2=0):

$$\overset{0}{\underset{H_1}{t}} = \frac{2\Omega_1\Omega_2}{(\Omega_1+\Omega_2)}\frac{\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \qquad (2-16')$$

4. Истечение при переменном напоре из непризматических резервуаров



Фиг. 2—22

При наличии притока Q_0=const время опорожнения или наполнения непризматического резервуара (фиг. 2—22)

$$\overset{H_2}{\underset{H_1}{t}} = \int_{H_1}^{H_2}\frac{\Omega\,dz}{Q_0-\mu\omega\sqrt{2gz}} =$$

$$= \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}}\int_{H_1}^{H_2}\frac{\Omega\,dz}{\sqrt{H_0}-\sqrt{z}} = \frac{Z}{M\omega}, \qquad (2-17)$$

где $M=\mu\sqrt{2g}$,

$$Z=\int_{H_1}^{H_2}\frac{\Omega\,dz}{\sqrt{H_0}-\sqrt{z}}$$ — называется модулем истечения. Формула

$$\overset{H_2}{\underset{H_1}{t}} = \frac{Z}{M\omega}$$

является общей формулой времени опорожнения для всех случаев.

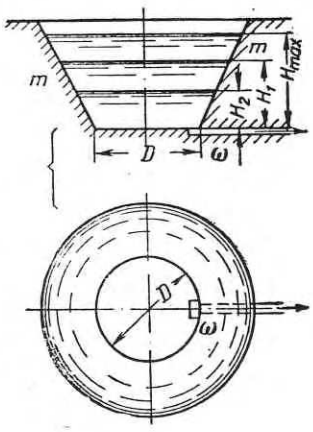
При полном опорожнении или наполнении (H_2=0)

$$Z=\int_{H_1}^{0}\frac{\Omega\,dz}{\sqrt{H_0}-\sqrt{z}} = Z_{max}. \qquad (2-17')$$

Если $\Omega=f(z)$ выражается простой функцией от z, то интеграл Z легко разрешается. При отсутствии притока (Q_0=0) взятие интеграла еще более упрощается.

Некоторые частные случаи при Q_0=0.

а) Резервуар в виде усеченного конуса (фиг. 2—23).



Фиг. 2—23

Имеем:

$$Z=\pi\left[\frac{D^2}{2}\left(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2}\right)+\frac{2}{3}mD\left(H_1^{3/2}-\right.\right.$$

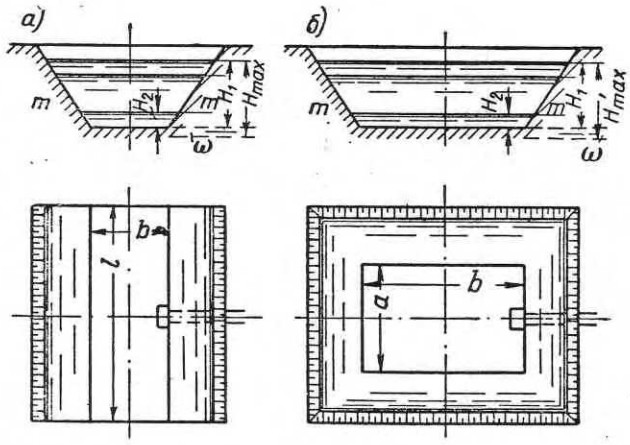
$$\left.\left.-H_2^{3/2}\right)+\frac{2}{5}m^2\left(H_1^{5/2}-H_2^{5/2}\right)\right],$$

где D — диаметр нижнего основания;
m — заложение откоса.

Полагая $H_1=H_{max}$ и H_2=0, имеем:

$$Z_{max}=\pi\sqrt{H_{max}}\left(\frac{D^2}{2}+\frac{2}{3}\,m\,H_{max}+\frac{2}{5}m^2H_{max}^2\right).$$

б) Резервуар в виде трапецоидальной призмы (фиг. 2—24,*а*):



Фиг. 2—24

$$Z=2l\left[b\left(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2}\right)+\frac{2}{3}\,m\,\left(H_1^{3/2}-H_2^{3/2}\right)\right]$$

(обозначения ясны из фиг. 2—24,*а*),

$$Z_{max}=2l\sqrt{H_{max}}\left(b+\frac{2}{3}\,m\,H_{max}\right).$$

в) Резервуар в виде усеченной пирамиды (фиг. 2—24,*б*):

$$Z = 2\left[ab\left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}\right) + \right.$$

$$+ \frac{2}{3} m (a+b)\left(H_1^{3/2} - H_2^{3/2}\right) +$$

$$\left. + \frac{4}{5} m^2 \left(H_1^{5/2} - H_2^{5/2}\right)\right],$$

$$Z_{\max} = 2\sqrt{H_{\max}}\left[ab + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3} m (a+b) H_{\max} + \frac{4}{5} m^2 H_{\max}^2\right].$$

5. Опорожнение и наполнение водохранилищ

Так как в естественных водохранилищах кривая $\Omega = f(z)$ не имеет правильного аналитического выражения, вопрос о времени опорожнения водохранилища решается приближенным способом.

Приводим решение этой задачи по так называемому способу трапеции [3]. Время опорожнения непризматического резервуара от уровня H_1 до уровня H_2 составляет:

$$T_{H_1}^{H_2} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{\Omega\, dz}{Q_0 - \mu\omega\sqrt{2gz}} = \int_{H_2}^{H_1} \frac{\Omega\, dz}{\mu\omega\sqrt{2gz} - Q_0}, \qquad (2—18)$$

где Q_0 — приток в водохранилище.

Так как водохранилище не имеет правильной призматической формы и Ω нельзя выразить определенной функцией от z, то интегрирование уравнения (2—18) заменяют обычно суммированием по способу трапеций.

Для этого необходимо иметь кривую зависимости зеркала водохранилища от глубины $\Omega = f(z)$. Весь объем опорожнения водохранилища, называемый сливной призмой, разбивается по высоте на n частей с высотой $\Delta H = 1$ *м* (или 0,5 *м*).

Так как:

$$\Omega\,\Delta H = \frac{\Omega_{n-1} + \Omega_n}{2}\Delta H,$$

то

$$T_{H_1}^{H_2} = \frac{\Delta H}{2\mu\omega\sqrt{2g}}\left[\left(\frac{\Omega_1}{\sqrt{H_1} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}} + \right.\right.$$

$$+ \frac{\Omega_2}{\sqrt{H_2} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}}\Bigg) + \left(\frac{\Omega_2}{\sqrt{H_2} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}} + \right.$$

$$\left.\left. + \frac{\Omega_3}{\sqrt{H_3} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}}\right) + \dots\right] =$$

$$= \frac{\Delta H}{2\mu\omega\sqrt{2g}}\left(\frac{\Omega_1}{\sqrt{H_1} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}} + \right.$$

$$+ \frac{\Omega_2}{\sqrt{H_2} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}} + \dots +$$

$$\left. + \frac{\Omega_n}{\sqrt{H_n} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}}\right). \qquad (2—19)$$

Все вычисления удобно сводить в таблицу по нижеприведенной форме.

Кроме способа трапеции, для расчета опорожнения и наполнения водохранилища применяют формулу Симпсона и способ Н. Н. Павловского [15].

H	$\sqrt{H}$	$\sqrt{H} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}$	Ω в $м^2$	2Ω в $м^2$	$\frac{\Omega}{\sqrt{H} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}}$	$\frac{2\Omega}{\sqrt{H} - \frac{Q_0}{\mu\omega\sqrt{2g}}}$	Примечание

2—В. ВОДОСЛИВЫ

2—9. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОСЛИВОВ

Водосливом называется стоящая в открытом потоке преграда (порог, плотина), через которую переливается вода.

По типу стенки (порога) водосливы подразделяют на:

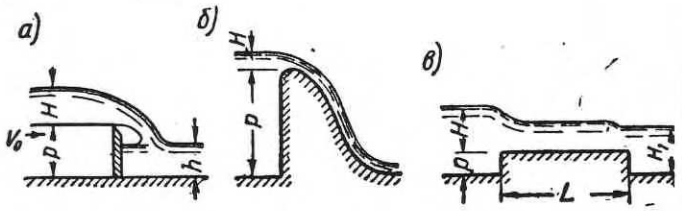
а) водосливы с тонкой стенкой (фиг. 2—25,*а*);

б) водосливы практического профиля (фиг. 2—25,*б*);

в) водосливы с широким порогом (фиг. 2—25,*в*).

Водослив с тонкой стенкой представляет собой стенку с заостренной кромкой, через которую непосредственно или через специальный вырез в которой происходит перелив воды; при этом переливающаяся струя соприкасается только с входной кромкой и толщина стенки при $\delta < 0{,}67H$ не влияет на характер истечения.

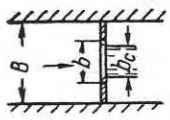
Водослив практического профиля имеет плавное криволинейное или ломаное очертание.



Фиг. 2—25

Водослив с широким порогом представляет собой прямоугольный порог с длиной L, достаточной для того, чтобы на нем происходило плавно изменяющееся течение, близкое к параллельно-струйному ($L \geqslant 2{,}5H$).

По типу сопряжения струи с нижним бьефом водосливы подразделяются на:



Фиг. 2—26

а) незатопленные, в которых уровень нижнего бьефа не влияет на расход и картину перелива через порог;

б) затопленные, в которых уровень нижнего бьефа влияет на расход и картину перелива.

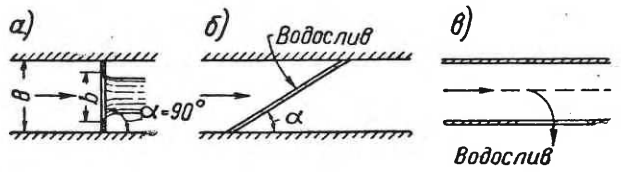
По условиям подхода потока к порогу водосливы подразделяются на:

а) водосливы без бокового сжатия,

б) водосливы с боковым сжатием.

Первые представляют собой водосливы, у которых ширина подходящего потока B равна ширине водосливного отверстия b на том же уровне или, иначе говоря, подходящий к водосливу поток на прилегающем к водосливу участке не имеет искривления линий токов в плане.

Если ширина водосливного отверстия b (фиг. 2—26) меньше ширины верхнего бьефа B, то истечение через водослив происходит с боковым сжатием.



Фиг. 2—27

По расположению порога в плане водосливы подразделяются на:

1) нормальные водосливы с углом $\alpha = 90°$ между порогом и направлением потока (фиг. 2—27,*а*);

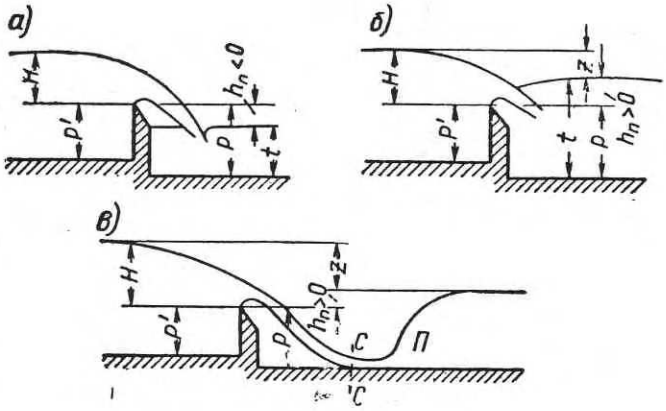
2) косые водосливы с углом $\alpha < 90°$ (фиг. 2—27,*б*);

3) боковые водосливы при угле $\alpha = 0°$ (фиг. 2—27,*в*).

2—10. ВОДОСЛИВЫ С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ (фиг. 2—28)

1. Прямоугольный водослив

Прямоугольный водослив с тонкой стенкой применяется как наиболее распространенный и достаточно точный измеритель расхода воды и как элемент гидросооружений (плоские затворы, донные пороги на оросительной сети и т. п.). Во избежание прилипания струи к водосливу под струю следует всегда давать доступ воздуха.



Фиг. 2—28

При глубине воды в нижнем бьефе $t < p$, где p — высота порога со стороны нижнего бьефа, а t — глубина в нижнем бьефе, водослив считается незатопленным.

Для незатопленного водослива расход воды определяется по формуле:

$$Q = m_0\, b \sqrt{2g}\, H^{3/2}, \qquad (2—20)$$

где m_0 — коэффициент расхода;
b — ширина порога;
H — напор на пороге.

Коэффициент расхода m_0 для прямоугольного водослива с вертикальной стенкой в прямоугольном русле определяется по формуле:

$$m_0 = \left(0{,}405 + \frac{0{,}0027}{H} - 0{,}03\,\frac{B-b}{B}\right)\left[1 + 0{,}55\left(\frac{b}{B}\right)^2 \frac{H^2}{(H+p')^2}\right], \qquad (2—21$$

где p' — высота порога со стороны верхнего бьефа;
B — ширина верхнего бьефа;
H — напор над гребнем водослива в *м*;
b — ширина водослива.

В табл. 2—4 приведены значения коэффициента расхода m_0 по этой формуле для случая $B=b$ (водослив без бокового сжатия).

Для незатопленного водослива без бокового сжатия коэффициент расхода может быть также определен [23] по следующей формуле:

$$m_0 = 0{,}402 + 0{,}054\,\frac{H}{p'}. \qquad (2—22)$$

Если уровень воды в нижнем бьефе расположен выше гребня водослива $t > p$; $h_n > 0$ и $\frac{z}{p} < \left(\frac{z}{p}\right)_к$, то в нижнем бьефе будет надвинутый прыжок и водослив будет затопленный (фиг. 2—28,*б*).

Таблица 2—4

Значение коэффициента расхода m_0 для прямоугольного водослива

Напор H в *м*	Высота порога водослива p' в *м*									
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	∞
0,05	0,469	0,464	0,462	0,461	0,461	0,460	0,460	0,459	0,459	0,459
0,06	0,463	0,457	0,454	0,453	0,452	0,451	0,451	0,450	0,450	0,450
0,08	0,458	0,449	0,446	0,443	0,442	0,441	0,440	0,439	0,439	0,439
0,10	0,458	0,447	0,442	0,439	0,437	0,435	0,434	0,433	0,433	0,432
0,12	0,461	0,447	0,440	0,436	0,434	0,432	0,430	0,429	0,428	0,428
0,14	0,464	0,448	0,440	0,436	0,439	0,430	0,428	0,426	0,425	0,424
0,16	0,468	0,450	0,441	0,436	0,432	0,428	0,426	0,424	0,423	0,422
0,18	0,472	0,453	0,442	0,436	0,432	0,428	0,425	0,423	0,422	0,420
0,20	0,476	0,455	0,444	0,437	0,433	0,428	0,425	0,422	0,420	0,419
0,22	0,480	0,459	0,446	0,439	0,434	0,428	0,425	0,420	0,420	0,417
0,24	0,484	0,462	0,448	0,440	0,435	0,428	0,425	0,421	0,419	0,416
0,26	0,488	0,465	0,451	0,442	0,436	0,429	0,425	0,420	0,418	0,415
0,28	0,492	0,468	0,453	0,444	0,438	0,430	0,425	0,420	0,418	0,415
0,30	0,496	0,471	0,458	0,445	0,439	0,431	0,426	0,420	0,418	0,414
0,35	—	0,479	0,462	0,451	0,444	0,434	0,428	0,421	0,418	0,413
0,40	—	0,486	0,468	0,457	0,448	0,437	0,430	0,422	0,418	0,412
0,45	—	0,492	0,474	0,462	0,452	0,440	0,433	0,423	0,419	0,411
0,50	—	0,499	0,480	0,467	0,457	0,444	0,436	0,425	0,419	0,410
0,60	—	—	0,491	0,477	0,466	0,451	0,441	0,428	0,421	0,410
0,70	—	—	0,500	0,485	0,474	0,453	0,447	0,432	0,424	0,409

Если $t > p$; $h_n > 0$, но $\frac{z}{p} > \left(\frac{z}{p}\right)_к$, то ниже водослива образуется отогнанный прыжок и водослив будет работать как незатопленный (фиг. 2—28,*в*).

Величина отношения $\left(\frac{z}{p}\right)_к$ определяется в зависимости от отношения $\frac{H}{p}$ по табл. 2—5.

Таблица 2—5

$\frac{H}{p}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\left(\frac{z}{p}\right)_к$	1,0	0,825	0,74	0,70	0,675	0,66	0,67	0,70	0,76	0,85

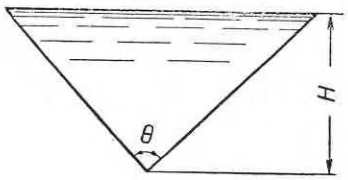
Расход через затопленный водослив определяется по формуле:

$$Q = \sigma_з m_0 b \sqrt{2g}\, H^{3/2}, \qquad (2—23)$$

где коэффициент $\sigma_з$, называемый коэффициентом затопления, можно определять по формуле:

$$\sigma_з = 1{,}05\left(1 + 0{,}2\frac{h_n}{p'}\right)\sqrt[3]{\frac{z}{H}}. \qquad (2—24)$$

2. Треугольный водослив (фиг. 2—29)

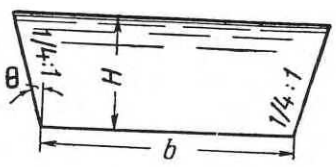


Фиг. 2—29

Треугольный водослив с тонкой стенкой обычно применяется при измерении сравнительно небольших расходов воды, главным образом в гидравлических и гидротехнических лабораториях и на каналах мелиоративных систем. Чаще всего применяется незатопленный треугольный водослив с углом при вершине $\theta = 90°$.

Расход через такой треугольный водослив определяется по формуле $Q = 1{,}4H^5/_2$, или по несколько более точной: $Q = 1{,}343H^{2{,}47}$.

3. Трапецоидальный водослив (фиг. 2—30)



Фиг. 2—30

Для измерения расходов в лабораторных условиях и на оросительных и осушительных каналах иногда применяется водослив с тонкой стенкой, имеющей трапецоидальный вырез с углом наклона боковых стенок θ, характеризуемым $\operatorname{tg}\theta=\frac{1}{4}$, при котором компенсируется влияние бокового сжатия струи. Расход через такой трапецоидальный водослив определяется по формуле:

$$Q = mb\sqrt{2g}\,H^{3/2},$$

(где m=0,42) или при измерении H в *м*:

$$Q = 1{,}86\,bH^{3/2}. \qquad (2\text{—}25)$$

Надежные результаты получаются при скорости подхода $v_0 \leqslant 0{,}5$ *м/сек* и при $b \geqslant 4H$.

4. Косой водослив
(см. фиг. 2—27,*б*)

Коэффициент расхода для косого водослива без бокового сжатия, по данным опытов В. С. Истоминой в Институте Водгео, можно принимать таким же, как и для прямого водослива.

5. Боковой водослив
(см. фиг. 2—27,*в*)

Боковой водослив устраивается для выпуска воды в боковые каналы. Расход через такой водослив может быть определен [19] по формуле:

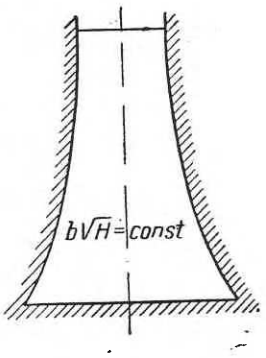
$$Q = mb\sqrt{2g}\,(h_{ср} - p_0)^{3/2}, \qquad (2\text{—}26)$$

где $h_{ср}=\frac{h_1+h_2}{2}$;

h_1 и h_2 — глубины в канале в начале и конце водослива;
b — длина водослива;
p_0 — высота порога водослива над дном канала;
m — коэффициент расхода, принимаемый в соответствии с типом порога бокового водослива.

6. Пропорциональный водослив
(фиг. 2—31)

Боковые стенки пропорционального водослива очерчиваются по кривой, удовлетворяющей уравнению[1]:



Фиг. 2—31

$$b = \sqrt{H} = \frac{K}{\mu\sqrt{2g}} = \text{const}. \qquad (2\text{—}27)$$

Формула расхода водослива

$$Q = KH,$$

т. е. расход пропорционален напору. Коэффициент K определяется в результате тарировки такого водослива.

2—11. БЕЗВАКУУМНЫЕ ВОДОСЛИВЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

Водосливы практического профиля можно подразделить на:

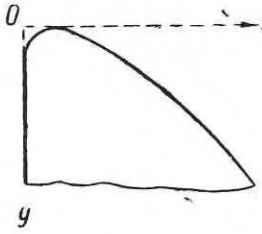
безвакуумные, очерченные по контуру нижней поверхности падающей струи (криволинейные) и по ломаному очертанию (полигональные, трапецоидальные и т. п.);

вакуумные, очерченные в верхней части по эллипсу, а в нижней — по прямой, с давлением на водосливной грани, меньшим атмосферного.

1. Очертание водосливной грани безвакуумного криволинейного водослива практического профиля с вертикальной напорной гранью α=90°
(фиг. 2—32)

Это очертание можно построить по табл. 2—6 координат Кригера — Офицерова, данных для напора H_0=1 *м*.

При напоре, отличном от H_0= 1 *м*, координаты профиля водослива получаются умножением на расчетный напор H_0.



Фиг. 2—32

Высота плотины определяется водохозяйственными и гидротехническими расчетами. Высота порога с низовой стороны и величина радиуса закругления носка плотины R определяются из условий гашения энергии и пропуска льда.

Таблица 2—6

Координаты криволинейного очертания безвакуумного профиля плотины (по Кригеру—Офицерову)

x	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
y	0,126	0,036	0,007	0,000	0,006	0,025	0,060	0,100	0,146	0,198	0,256	0,321	0,394	0,475	0,564
x	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
y	0,661	0,764	0,873	0,987	1,108	1,235	1,396	1,508	1,653	1,804	1,960	2,122	2,289	2,462	2,640
x	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,5	—	—	—
y	2,824	3,013	3,207	3,405	3,609	3,818	4,031	4,249	4,471	4,698	4,93	6,22	—	—	—

[1] Г. В. Железняков, Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии, изд. Академии наук СССР, 1950.

2. Пропускная способность водослива

Пропускная способность водослива практического профиля выражается [5] формулой:

$$Q = Km_{пл}\sigma_з b\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \qquad (2—28)$$

где $m_{пл}$ — коэффициент расхода водослива в условиях плоской задачи;

K — коэффициент, учитывающий влияние бокового сжатия от быков, равный $\frac{m}{m_{пл}}$ (см. п. 5);

$\sigma_з$ — коэффициент, учитывающий затопление водослива (см. п. 6);

b — длина гребня водослива;

H — напор: $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$;

v_0 — скорость подхода;

p — высота порога со стороны верхнего бьефа.

3. Учет полноты напора

При напоре $H > H_0$ (где H_0—расчетный напор) коэффициент расхода становится равным $m' = mm_н$, где $m_н$ коэффициент полноты напора, а m — коэффициент расхода при расчетном напоре.

Для определения коэффициента полноты напора $m_н$ можно пользоваться формулой Н. П. Розанова [17]:

$$m_н = a + (1 - a)\sqrt[3]{\frac{H}{H_0}}, \qquad (2—29)$$

где a=0,778—0,00175 α °; α° — угол наклона напорной грани водослива к горизонту.

При α=90° (преобладающий случай) формула (2—29) имеет вид:

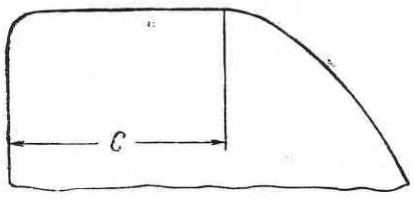
$$m_н = 0,62 + 0,38\sqrt[3]{\frac{H}{H_0}}. \qquad (2—30)$$

4. Учет ширины гребня

Ширина гребня водослива (фиг. 2—33) влияет на коэффициент расхода. По опытам проф. А. Р. Березинского [5], для водослива практического профиля с вертикальной напорной гранью и плавно очерченным входным ребром при $\frac{p}{H} \geqslant 2$

$$m_{пл} = 0,36 + 0,1\,\frac{2,5 - \frac{c}{H}}{1 + \frac{2c}{H}}, \qquad (2—31)$$

где c — ширина гребня от вертикальной напорной грани до начала криволинейной поверхности (фиг. 2—33).



Фиг. 2—33

Это уравнение действительно в пределах $a \leqslant \frac{c}{H} < 2,5$, где a=0,3 для закругленного входного ребра и a=0,6 для прямоугольного. При $\frac{c}{H} > 2,5$

$$m_{пл} = 0,36 = \text{const}$$

как для широкого порога. При $\frac{c}{H}$ =0,3

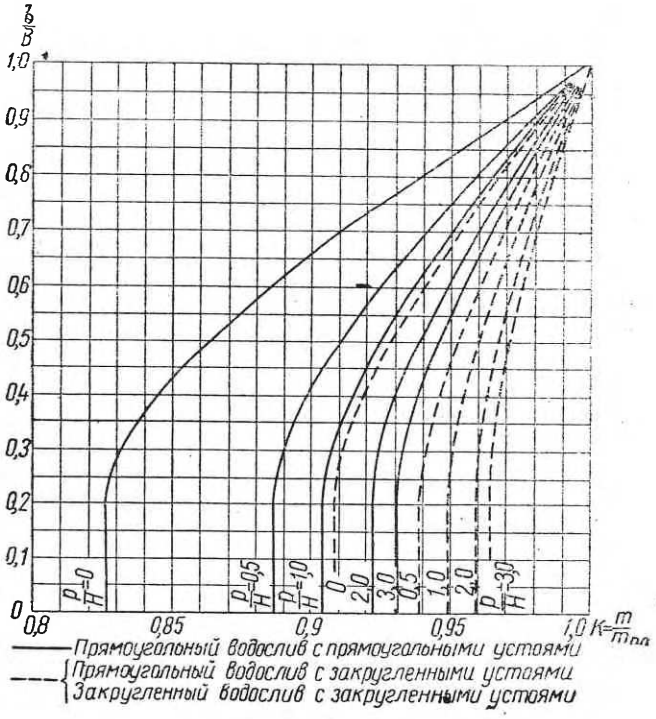
$$m_{пл} = 0,49 \div 0,50.$$

При $\frac{c}{H} < 0,3$ (при закругленном входном ребре) и при $\frac{c}{H} < 0,67$ (при прямоугольном) истечение следует рассматривать как происходящее через водослив с тонкой стенкой.

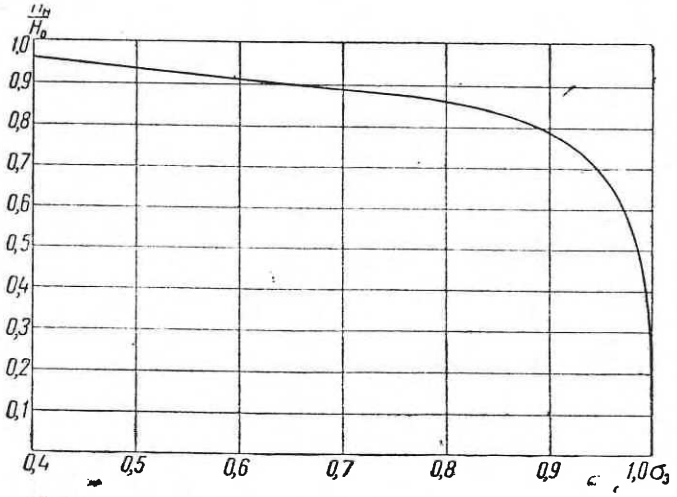
5. Учет бокового сжатия

Основными факторами, уменьшающими коэффициент расхода водослива при переходе от плоской задачи к пространственной, являются величина планового $\left(\frac{b}{B}\right)$ и вертикального $\left(\frac{p}{H}\right)$ сжатий потока и очертание быков или устоев.

Боковое и вертикальное сжатие потока учитывается коэффициентом расхода $m = Km_{пл}$, где K в зависимости от $\frac{p}{H}$ и $\frac{b}{B}$ определяется по графику (фиг. 2—34).



Фиг. 2—34. График изменения коэффициента $K = \frac{m}{m_{пл}}$ *в зависимости от отношений* $\frac{b}{B}$ *и* $\frac{p}{H}$



Фиг. 2—35. График коэффициента затопления $\sigma_з$ для водослива практического профиля

При наличии в устоях или быках пазов для затворов значения K, полученные из графика на фиг. 2—34, уменьшаются на 1% при $\frac{c}{H_0}=0{,}3$ и на 0,5% при $\frac{c}{H_0}=1{,}0$.

При работе ряда незатопленных водосливных отверстий одинаковых размеров среднее значение K для всего водосливного фронта приближенно определяется по формуле:

$$K_{ср}=\frac{K_1(n-2)+2K_2}{n}, \qquad (2—32)$$

где K_1 — значение K для промежуточных отверстий;
K_2 — значение K для крайних отверстий;
n — число отверстий.

Значения K_1 и K_2 определяются по графику на фиг. 2—34 в соответствии с величиной $\frac{b}{B}$ с учетом поправки на пазы; причем для промежуточных отверстий

$$\frac{b}{B}=\frac{b}{b+b_б},$$

где $b_б$ — толщина быка.

Для крайних отверстий

$$B=b+b_у+l_д.$$

Здесь b — пролет крайнего отверстия;
$b_у$ — толщина устоя;
$l_д$ — длина сопрягающей дамбы от устоя до берега, т. е. B равно расстоянию от крайнего быка до ближайшего к нему уреза верхнего бьефа перед сооружением.

6. Учет затопления

Если уровень нижнего бьефа влияет на пропускную способность водослива, то водослив считается затопленным и расход в нем определяется [6] по формуле:

$$Q_з=K\sigma_з m_{пл} b\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \qquad (2—28)$$

$\sigma_з=\frac{m_з}{m_{пл}}$ — коэффициент затопления, принимаемый в зависимости от отношения $\frac{H_н}{H_0}$ по опытной кривой $\sigma_з=f\left(\frac{H_н}{H_0}\right)$, приведенной на фиг. 2—35, полученной по опытным данным А. С. Офицерова (1936 г.) [14] и А. Р. Березинского (1947 г.) [6].

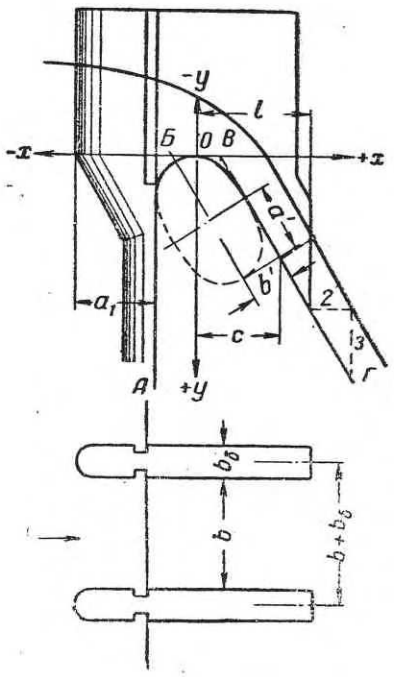
Как видно из графика, практически затопление начинает влиять при $\frac{H_н}{H_0}>0{,}35$, где $H_н$ — глубина нижнего бьефа, отсчитываемая от отметки порога водослива.

2—12. ВАКУУМНЫЕ ВОДОСЛИВЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ[1]

Вакуумные профили имеют бо́льший коэффициент расхода и меньшую площадь поперечного сечения (меньший объем кладки тела плотины), чем безвакуумные профили.

1. Очертание вакуумных профилей

Оголовки вакуумных профилей очерчиваются по эллипсу с полуосями a' и b' (фиг. 2—36). Большая полуось эллипса a' располагается параллельно низовой грани,



Фиг. 2—36

[1] Данный параграф написан ст. научн. сотр. канд. техн. наук Н. П. Розановым на основе его исследований, проведенных в Водгео в 1933—1935 гг. [16], и в МИСИ им. В. В. Куйбышева в 1948—1951 гг.

Таблица 2—7

Координаты очертания вакуумных профилей при $r_ф = 1$

Координаты точек профиля при					
α=1,0		α=2,0		α=3,0	
x	y	x	y	x	y
—1,000	1,000	—0,700	0,806	—0,472	0,629
—0,960	0,720	—0,694	0,672	—0,462	0,462
—0,880	0,525	—0,670	0,519	—0,432	0,327
—0,740	0,327	—0,624	0,371	—0,370	0,193
—0,530	0,152	—0,553	0,241	—0,253	0,072
—0,300	0,046	—0,488	0,162	—0,131	0,018
0,000	0,000	—0,402	0,091	0,000	0,000
0,200	0,020	—0,312	0,046	0,194	0,030
0,400	0,083	—0,215	0,012	0,381	0,095
0,600	0,200	—0,117	0,003	0,541	0,173
0,720	0,306	0,000	0,000	0,707	0,271
0,832	0,445	0,173	0,025	0,866	0,381
1,377	1,282	0,334	0,076	1,022	0,503
2,434	2,868	0,490	0,147	1,168	0,623
3,670	4,722	0,631	0,223	1,318	0,760
5,462	7,410	0,799	0,338	1,456	0,890
—	—	0,957	0,461	1,584	1,021
—	—	1,107	0,595	1,714	1,163
—	—	1,243	0,731	1,855	1,320
—	—	1,405	0,913	1,979	1,467
—	—	1,551	1,098	2,104	1,628
—	—	1,688	1,282	2,240	1,792
—	—	2,327	2,246	2,346	1,943
—	—	2,956	3,189	2,462	2,106
—	—	4,450	5,430	2,575	2,272
—	—	5,299	6,704	3,193	3,214
—	—	—	—	4,685	5,452
—	—	—	—	5,561	6,766

Примечание. Таблица составлена для фиктивного радиуса оголовка $r_ф$=1,0. Фиктивный радиус $r_ф$ представляет собой радиус окружности, вписанной между сторонами *АБ*, *БВ*, *ВГ* (фиг 2—36). При $\alpha = \frac{a'}{b'} = 1$ фиктивный радиус $r_ф$ равен действительному радиусу кривизны оголовка. Для получения значений координат при $r_ф \neq 1{,}0$ необходимо приведенные в таблице значения x и y умножить на $r_ф$.

имеющей наклон 1 : 2/3. В табл. 2—7 приведены координаты очертания вакуумных профилей при различном соотношении полуосей эллипса $\alpha = \frac{a'}{b'}$.

2. Коэффициенты расхода

Значения коэффициентов расхода $m_{пл}$ формулы (2—28) для вакуумных незатопленных водосливов, работающих в условиях плоской задачи, можно определять по табл. 2—8.

Таблица 2—8

Значения коэффициента расхода $m_{пл} = f\left(\frac{H_0}{r_ф}, \alpha\right)$ для вакуумных водосливов

$\frac{H_0}{r_ф}$	Коэффициент расхода $m_{пл}$ при		
	α=1,0	α=2,0	α=3,0
1,00	0,486	0,487	0,495
1,20	0,497	0,500	0,509
1,40	0,506	0,512	0,520
1,60	0,513	0,521	0,530
1,80	0,521	0,531	0,537
2,00	0,526	0,540	0,544
2,20	0,533	0,548	0,551
2,40	0,538	0,554	0,557
2,60	0,543	0,560	0,562
2,80	0,549	0,565	0,566
3,00	0,553	0,569	0,570
3,20	0,557	0,573	0,575
3,40	0,560	0,577	0,577

При наличии бычков (без пазов для рабочих затворов) с полуциркульным или криволинейно заостренным очертанием передней части, выдвинутой в верхний бьеф на величину $a_1 \approx 1{,}14 r_ф$* (фиг. 2—36) при $\frac{b}{b+b_б} = 0{,}80 \div 0{,}92$, коэффициенты расхода $m_{пл}$, приведенные в табл. 2—8, следует уменьшать примерно на 3%, т. е. принимать $m = 0{,}97 m_{пл}$. Наличие пазов для ремонтных затворов существенного влияния на коэффициент расхода не оказывает.

* Практически можно принимать $a_1 = (1 \div 1{,}5) r_ф$ или $a_1 \geqslant 0{,}4 H_{max}$.

Таблица 2—9

Значения коэффициента затопления $\sigma_з = f_1\left(\frac{H_н}{H_0}, \alpha\right)$

$\sigma_з$ \ $\frac{H_н}{H_0}$	—0,15	—0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
При α=1,0	1,000	0,999	0,990	0,971	0,940	0,895	0,845	0,788	0,723	0,642	0,538	0,390	0,000
При α=2,0	1,000	1,000	0,995	0,990	0,988	0,985	0,965	0,780	0,690	0,605	0,505	0,400	0,000

3. Коэффициенты затопления

Коэффициент затопления $\sigma_з$ формулы (2—28) для затопленных вакуумных водосливов с $\alpha = 1{,}0$ и $\alpha = 2{,}0$ определяется по табл. 2—9. При $\alpha = 3{,}0$ ориентировочно можно пользоваться значениями $\sigma_з$ для $\alpha = 2{,}0$.

$H_н = H - z$ (см. п. 2—11,6).

4. Данные о вакууме

Величина максимального вакуума на оголовке вакуумного водослива определяется по формуле:

$$h_{вак} = \sigma_0 H_0, \qquad (2—33)$$

где H_0 — расчетный напор с учетом скоростного;

$\sigma_0 = [\sigma_0]_{пл}\,\sigma'\sigma''$ — коэффициент вакуумности, причем $[\sigma_0]_{пл}$ — коэффициент вакуумности незатопленного водослива для условий плоской задачи, определяемой по табл. 2—10; σ' — коэффициент, учитывающий влияние бычков; σ'' — коэффициент, учитывающий влияние затопления водослива.

Коэффициент σ' при полуциркульных и криволинейно-заостренных бычках с $a_1 \approx (1 \div 1{,}5) r_ф$ (или $a_1 \geqslant 0{,}4 H_{max}$) может быть определен по формуле $\sigma' = 0{,}70 \dfrac{b}{b+b_б} + 0{,}30$ при $\dfrac{b}{b-b_б}$ в пределах от 0,80 до 1,00.

Таблица 2—10

Значения коэффициента вакуумности $[\sigma_0]_{пл} = f\left(\dfrac{H_0}{r_ф}, \alpha\right)$

$\frac{H_0}{r_ф}$	Коэффициент вакуумности $[\sigma_0]_{пл}$ при		
	$\alpha=1{,}0$	$\alpha=2{,}0$	$\alpha=3{,}0$
1,00	0,474	—	—
1,20	0,571	0,000	0,059
1,40	0,647	0,162	0,211
1,60	0,752	0,311	0,351
1,80	0,859	0,454	0,490
2,00	0,962	0,597	0,631
2,20	1,057	0,734	0,789
2,40	1,138	0,887	0,928
2,60	1,224	1,018	1,060
2,80	1,309	1,147	1,197
3,00	1,388	1,274	1,337
3,20	1,483	1,411	1,470
3,40	1,580	1,550	1,626

Для затопленных водосливов при определении $h_{вак}$ в правую часть формулы (2—33) вводится поправочный множитель σ', определяемый по табл. 2—11. При $\alpha = 3{,}0$ можно ориентировочно принимать значения σ', как и при $\alpha = 2{,}0$.

Для затопленных водосливов коэффициент σ'' определяется по табл. 2—11. При $\alpha = 3{,}0$ можно ориентировочно принимать значения σ'', как и при $\alpha = 2{,}0$.

Таблица 2—11

Значения коэффициента σ''

$\frac{H_н}{H_0}$ / σ''	−0,15	−0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
При $\alpha=1{,}0$	1,00	0,98	0,88	0,61	0,21	−0,07	−0,29	−0,47
При $\alpha=2{,}0$	1,00	0,99	0,98	0,96	0,93	0,86	0,78	−0,30

Во избежание возникновения кавитации и эрозии кладки (учитывая при этом ориентировочно и пульсацию вакуума) величину максимального осредненного (т. е. без учета пульсаций) вакуума на оголовке, определяемую по формуле (2—33), рекомендуется принимать не больше величины $(h_{вак})_{max, доп} \approx \approx 8{,}5—0{,}1\ (H_0 + h_{вак})$, где H_0 и $h_{вак}$ — в *м* вод. ст.[1].

Во избежание значительной пульсации вакуума наибольшее расчетное отношение $\dfrac{H_0}{r_ф}$ не следует принимать больше 3,4 ÷ 3,6, а для особо ответственных сооружений — больше 3,0—3,3.

На гребне вакуумных водосливов не следует применять рабочих затворов, требующих устройства пазов в бычках (в частности плоских затворов), так как через пазы в бычках в область вакуума засасывается воздух и срывает вакуум, что может иногда привести к вибрациям сооружения и снижает пропускную способность водослива. При необходимости устройства затворов на гребне можно применять сегментные затворы без пазов (ниш).

Пазы для ремонтных затворов (в случае необходимости в последних) следует располагать в области положительных давлений (фиг. 2—36).

Чтобы вакуум не срывался попаданием воздуха под водосливную струю со стороны нижнего бьефа, длину бычков в сторону нижнего бьефа (фиг. 2—36) следует принимать такой, чтобы она с некоторым запасом перекрывала область вакуума. При этом можно считать, что в зоне, для которой $\dfrac{x}{r_ф} \geqslant 2{,}5$, на поверхности профиля при всех расходах будет положительное избыточное давление. При назначении длины l с некоторым запасом можно принять $\dfrac{c}{r_ф} \approx 2{,}5$ (фиг. 2—36). Свободную поверхность потока при этом можно построить по данным табл. 2—12.

Во избежание срыва вакуума при открытии не всех отверстий плотины целесообразно режущую грань бычка несколько выдвигать в верхний бьеф $[a_1 \approx (1 \div 1{,}5) r_ф$ или $a_1 \geqslant 0{,}4 H_{max}]$; в этом отношении полуциркульные бычки несколько предпочтительнее криволинейно заостренных.

[1] В общем случае $(h_{вак})_{max, доп} \leqslant \dfrac{p_0}{\gamma} - \dfrac{p_d}{\gamma} - \delta_0 \dfrac{v^2}{2g}$, где $\dfrac{p_0}{\gamma}$ и $\dfrac{p_d}{\gamma}$ — атмосферное давление и давление паров воды при данной ее температуре, выраженное в линейных величинах (например, в *м* вод. ст.), v — скорость течения воды над точкой с максимальным вакуумом (при безотрывном обтекании поверхности $\delta_0 \leqslant 0{,}1$), g — ускорение силы тяжести.

Относительные координаты точек кривой свободной поверхности струи (при $r_ф=1$) при различных $\frac{H_0}{r_ф}$ и α

Таблица 2—12

$\frac{H_0}{r_ф}$	α \ $\frac{x}{r_ф}$		−5,00	−4,00	−3,00	−2,00	−1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
1,00	1,0	Значения $y/r_ф$	−1,00	−0,99	−0,98	−0,95	−0,89	−0,69	0,00	1,57	3,20	4,73	6,18
	2,0		−0,98	−0,96	−0,95	−0,94	−0,91	−0,72	−0,13	1,14	2,77	4,30	5,81
	3,0		−0,99	−0,99	−0,98	−0,95	−0,90	−0,72	−0,14	1,03	2,55	4,08	5,61
1,50	1,0		−1,47	−1,45	−1,42	−1,38	−1,31	−1,03	−0,40	1,13	2,72	4,27	5,77
	2,0		−1,45	−1,44	−1,41	−1,37	−1,30	−1,07	−0,50	0,63	2,25	3,94	5,43
	3,0		−1,48	−1,47	−1,45	−1,41	−1,33	−1,08	−0,52	0,55	2,10	3,75	5,38
2,00	1,0		−1,95	−1,92	−1,88	−1,75	−1,62	−1,35	−0,80	0,52	2,25	3,83	5,40
	2,0		−1,91	−1,88	−1,84	−1,79	−1,68	−1,43	−0,87	0,13	1,78	3,56	5,10
	3,0		−1,96	−1,95	−1,92	−1,85	−1,72	−1,45	−0,91	0,06	1,60	3,30	4,94
2,50	1,0		−2,40	−2,37	−2,30	−2,21	−2,05	−1,72	−1,18	−0,02	1,72	3,40	4,94
	2,0		−2,39	−2,35	−2,29	−2,21	−2,08	−1,80	−1,27	−0,38	1,22	3,10	4,69
	3,0		−2,42	−2,38	−2,34	−2,26	−2,10	−1,81	−1,29	−0,42	1,03	2,75	4,52
3,00	1,0		−2,82	−2,78	−2,73	−2,61	−2,40	−2,05	−1,52	−0,48	1,10	2,80	4,40
	2,0		−2,83	−2,79	−2,70	−2,61	−2,43	−2,15	−1,66	−0,82	0,62	2,50	4,25
	3,0		−2,86	−2,82	−2,75	−2,63	−2,45	−2,14	−1,67	−0,85	0,43	2,16	3,99
3,50	1,0		−3,29	−3,25	−3,18	−3,02	−2,78	−2,45	−1,95	−1,20	0,09	1,94	3,83
	2,0		−3,27	−3,21	−3,12	−3,02	−2,82	−2,52	−2,02	−1,24	0,06	1,77	3,66

Примечание. Расположение осей координат — по фиг. 2—36.

2—13. ВОДОСЛИВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ (фиг. 2—37)

Определение водослива с широким порогом дано выше, в п. 2—9.

1. Пропускная способность

Расход через водослив с широким порогом определяется по формуле (2—28): $Q=K\sigma_з m_{пл} b\sqrt{2g}\ H_0^{3/2}$ (обозначения см. п. 2—11, 2). Коэффициент расхода водослива с широким порогом без бокового сжатия $m_{пл}$ изменяется в пределах от 0,32 до 0,385 и, по данным опытов проф. А. Р. Березинского [5], может быть определен по формулам:

а) при прямоугольном входном ребре

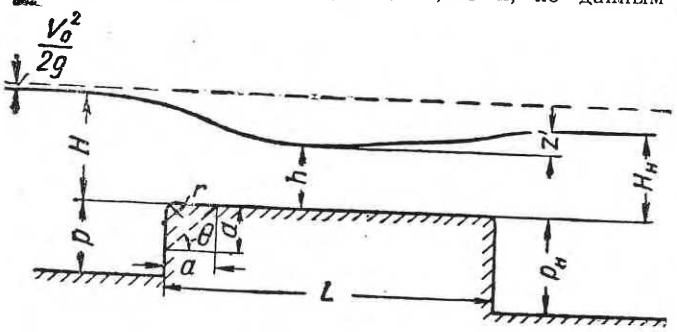
$$m_{пл}=0{,}32+0{,}01\frac{3-\frac{p}{H}}{0{,}46+0{,}75\frac{p}{H}}; \quad (2—34)$$

б) при закругленном входном ребре (при $\frac{r}{H}\geqslant 0{,}2$, где r — радиус закругления)

$$m_{пл}=0{,}36+0{,}01\frac{3-\frac{p}{H}}{1{,}20+1{,}5\frac{p}{H}}. \quad (2—34')$$

Значения $m_{пл}$, подсчитанные по этим формулам, приведены ниже, в табл. 2—13.

При $\frac{p}{H}>3$ значения $m_{пл}$ остаются неизменными и равными 0,36 для закругленного и 0,32 для прямоугольного входных ребер.



Фиг. 2—37

Таблица 2—13

Значения коэффициента расхода $m_{пл}$

Форма входного ребра \ $\frac{p}{H}$	0,00	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Прямоугольная	0,385	0,363	0,35	0,342	0,337	0,33	0,325	0,323	0,32
Закругленная	0,385	0,375	0,373	0,37	0,367	0,364	0,362	0,361	0,36

Для водослива с широким порогом со скошенной под углом $\theta = 45°$ верховой гранью (фиг. 2—37, пунктир) коэффициент расхода может приниматься по данным табл. 2—14 [23]. При скошенной входной грани с заложением $\operatorname{ctg}\theta > 2{,}5$ значения m приведены в последней графе табл. 2—14.

Таблица 2—14

Значения коэффициента расхода $m_{пл}$

$\frac{p}{H}$ \ $\frac{a}{H}$	0,025	0,05	0,10	>0,2	$\operatorname{ctg}\theta$ >2,5
0,0	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385
0,2	0,371	0,374	0,376	0,377	0,382
0,4	0,364	0,367	0,370	0,373	0,381
0,6	0,359	0,363	0,367	0,370	0,380
0,8	0,356	0,360	0,365	0,368	0,379
1,0	0,353	0,358	0,363	0,367	0,378
2,0	0,347	0,353	0,358	0,363	0,377
4,0	0,342	0,349	0,355	0,361	0,376
6,0	0,341	0,348	0,354	0,360	0,376
∞	0,337	0,345	0,352	0,358	0,375

Сжатая глубина в конце входного участка порога определяется зависимостью:

$$h = kH_0,$$

где

$$k = \frac{2}{3} - \frac{0{,}385 - m_{пл}}{0{,}95 - 2m_{пл}}. \qquad (2—35)$$

Коэффициент скорости φ связан с коэффициентом расхода зависимостью:

$$\varphi = 1 - \frac{0{,}385 - m_{пл}}{\frac{1}{m_{пл}} - 1{,}80}. \qquad (2—36)$$

Подсчитанные по этим формулам значения φ и k приведены в табл. 2—15.

2. Учет бокового сжатия

Боковое сжатие на водосливе с широким порогом учитывается, как и на водосливе практического профиля, введением коэффициента K (см. п. 2—11,5).

Пазы в быках и устоях не оказывают заметного влияния на пропускную способность водослива с широким порогом.

Таблица 2—15

Значения φ и k

$m_{пл}$	φ	$k = \frac{h}{H_0}$
0,32	0,951	0,457
0,33	0,954	0,477
0,34	0,961	0,500
0,35	0,967	0,527
0,36	0,974	0,558
0,37	0,983	0,595
0,38	0,994	0,641
0,385	1,000	0,667

3. Учет затопления водослива

Уровень нижнего бьефа влияет на величину расхода водослива при глубине затопления $H_н \geqslant 0{,}8H_0$, где $H_н$ — возвышение уровня нижнего бьефа над порогом водослива (фиг. 2—37).

Расход через затопленный водослив с широким порогом можно определять по формуле:

$$Q_з = K\varphi_з bh\sqrt{2g(H_0 - h)}, \qquad (2—37)$$

где $\varphi_з$ — коэффициент скорости затопленного водослива;

h — глубина на пороге затопленного водослива: $h = H_н - z'$;

z' — перепад восстановления, т. е. превышение уровня нижнего бьефа над уровнем воды на пороге (фиг. 2—37).

Перепад восстановления z' имеет наибольшее значение в начальный момент затопления и убывает по мере выравнивания уровней верхнего и нижнего бьефов.

Пренебрежение перепадом восстановления, т. е. допущение $h = H_н$, занижает расход затопленного водослива.

Если обозначить отношение $\frac{z'}{h_к} = k_в$, то по Березинскому:

$$k_в = 0{,}30 - \frac{k' - 1{,}39}{3{,}22k' - 3{,}65},$$

где $k' = \frac{H_н}{h_к}$.

Коэффициент скорости затопленного водослива

$$\varphi_з = \varphi - \frac{0{,}013}{m^3}\sqrt{\frac{H_н}{H_0} - 0{,}80}, \qquad (2—38)$$

где φ и m — коэффициенты скорости и расхода незатопленного водослива;

$H_н$ — глубина нижнего бьефа относительно порога.

Второй, более простой, формулой для определения расхода затопленного водослива с широким порогом может служить формула:

$$Q_з = \sigma_з K m_{пл} b\sqrt{2g}H^{3/2}. \qquad (2—39)$$

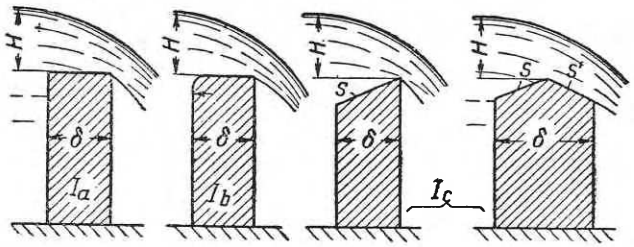
Значения коэффициента затопления $\sigma_з$ *Таблица 2—16*

$\frac{H_н}{H_0}$	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98
$\sigma_з$	1,0	0,995	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,78	0,74	0,70	0,65	0,59	0,50	0,40

Значения коэффициента затопления $\sigma_з$ (по опытам проф. Березинского) в зависимости от степени затопления, характеризуемой величиной отношения $\frac{H_н}{H_0}$, приведены в табл. 2—16.

2—14. ВОДОСЛИВЫ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ, ТРАПЕЦОИДАЛЬНОЙ И ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ФОРМ

1. Прямоугольные водосливы (фиг. 2—38)



Фиг. 2—38

Тип I_a. Чистый прямоугольный профиль. Акад. Павловский [15] для таких профилей коэффициент расхода $m_н$ определяет, как

$$m_н = m\,\sigma_н\,\sigma_ф,$$

где $\sigma_н$ — коэффициент полноты напора; для такого профиля $\sigma_н$ может быть выражен эмпирической формулой: $\sigma_н = 0{,}70 + 0{,}185\,\frac{H}{\delta}$;

$m = 0{,}42$;

$\sigma_ф$ — коэффициент формы.

При $\frac{H}{\delta} < 0{,}4$ получаем водослив с широким порогом;

при $\frac{H}{\delta} > 1{,}5$ получаем водослив с тонкой стенкой.

Тип I_b. Прямоугольный профиль с закруглением входного ребра. Для этого профиля

$$m_н \approx m\sigma_н\sigma_ф,$$

где $\sigma_н$ — см. выше;

$$\sigma_ф = 1 + \frac{r}{H} \approx 1{,}05.$$

Тип I_c. Прямоугольный профиль с наклонным верхом. Для этого профиля

$$m_н = m\,\sigma_н\,\sigma_ф;$$

при $s > 10$

$$\sigma_ф = 1;$$

при $s = 5 \div 10$

$$\sigma_ф = 1{,}05,$$

где s — заложение откоса (котангенс угла наклона к горизонту).

Те же значения можно принять и для двускатного верха; если же имеется обратный уклон s' (фиг. 2—39, II'_c), то коэффициент формы $\sigma_ф = 1$.

2. Трапецоидальные профили (фиг. 2—39)

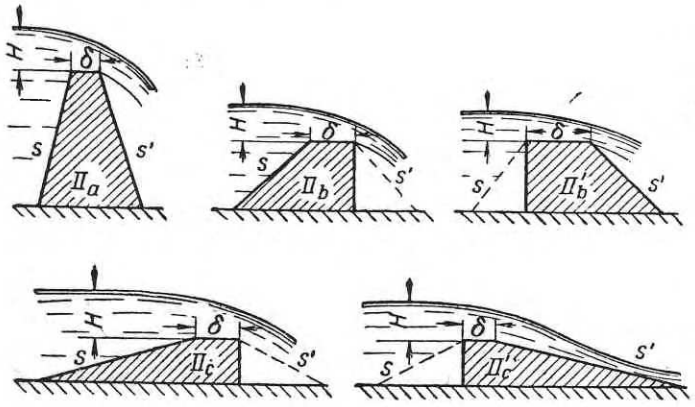
Коэффициенты расхода для незатопленных водосливов трапецоидальных профилей для различных соотношений $\frac{H}{\delta}$ приведены в табл. 2—17, данной акад. Н. Н. Павловским.

Таблица 2—17

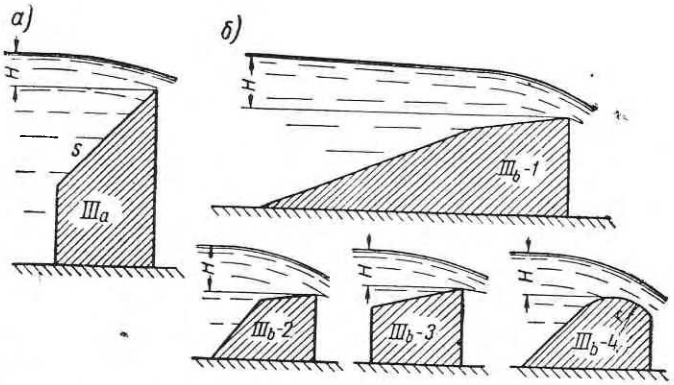
Значения коэффициентов расхода m для трапецоидальных профилей

Группа профилей	Тип профилей	Тип напора			
		$\frac{H}{\delta} > 2$	$\frac{H}{\delta} = 2 \div 1{,}0$	$\frac{H}{\delta} = 1 \div \frac{1}{2}$	$\frac{H}{\delta} < \frac{1}{2}$
Высокие	Тип II_a $s \leqslant \frac{1}{2}$; $s' \leqslant \frac{1}{2}$	0,42—0,43	0,38—0,40	0,35—0,36	—
Средние	Тип II_b				
	1) при $s=1$	0,44	0,42	0,40	*
	2) при $s=2$	0,43	0,41	0,39	*
	Тип II'_b				
	1) при $s'=1$	0,42	0,40	0,37—0,38	*
	2) при $s'=2$	0,40	0,38	0,35—0,36	*
Низкие (растянутые)	Тип II_c (с развитой понурной частью)				
	1) при $s=3$	0,42	0,40	0,38	*
	2) при $s=4$	0,41	0,39	0,37	*
	3) при $s=5$	0,40	0,38	0,36	*
	4) при $s=10$	0,38	0,36	*	*
Низкие (растянутые)	Тип II'_c				
	1) при $s'=3$	0,39	0,37	0,35	*
	2) при $s'=5$	0,375	0,35	*	*
	3) при $s'=10$	0,35	*	*	*

Примечание. Знак * обозначает переход к водосливу с широким порогом.



Фиг. 2—39



Фиг. 2—40

3. Полигональные профили (фиг. 2—40)

Тип III_a — высокий профиль с резко скошенным верхом:

m=0,45 (фиг. 2—40,*а*);

Тип III_b — средние профили (фиг. 2—40,*б*).

Тип	Коэффициент расхода
III_b—*1*	m=0,42
III_b—*2*	m=0,42÷0,43
III_b—*3*	m=0,42÷0,43
III_b—*4*	m=0,43÷0,44

2—Г. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

2—15. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Равномерным движением потока называется такое движение, при котором живые сечения потока одинаковы по всей его длине и притом скорости потока в соответственных точках всех живых сечений также одинаковы.

Основными расчетными формулами для определения средней скорости и расхода воды при равномерном движении в открытых руслах являются следующие:

$$v = C\sqrt{Ri} \quad \text{и} \quad Q = \omega C\sqrt{Ri}, \qquad (2—40)$$

где C — коэффициент, зависящий от шероховатости стенок и дна русла, а также от формы и размеров русла (коэффициент Шези), определяемый по специальным формулам;

R — гидравлический радиус сечения, $R = \frac{\omega}{\chi}$;

ω — площадь живого сечения;

χ — смоченный периметр;

для широких русел принимают $R = h_{ср}$, где $h_{ср} = \frac{\omega}{B}$ — средняя глубина русла, B — ширина русла;

i — гидравлический уклон, который при равномерном движении в открытом русле совпадает с уклоном дна и поверхности.

Для определения коэффициента C рекомендуется формула акад. Н. Н. Павловского, основанная на большом опытном материале и получившая в советской гидротехнической практике широкое распространение:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \qquad (2—41)$$

где R — гидравлический радиус сечения;

n — коэффициент шероховатости, зависящий от материала и состояния русла, приведенный в табл. 2—18;

y — показатель степени, зависящий от R и n, определяемый по формуле:

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}\left(\sqrt{n} - 0{,}1\right). \qquad (2—42)$$

В табл. 2—19 приведены значения C по формуле (2—41). Формула (2—41) применима для открытых русел при значениях гидравлического радиуса 0,1 *м* $< R <$ 3,0 *м*.

Для упрощения расчетов вместо формулы (2—42) акад. Павловский дает более простые формулы:

при 0,1 *м* $< R <$ 1 *м*

$$y \approx 1{,}5\sqrt{n},$$

при 1 *м* $< R <$ 3 *м*

$$y \approx 1{,}3\sqrt{n}$$

В практике гидравлических расчетов каналов можно применять формулу (2—41) с постоянными значениями показателя y=$^1/_6$, $^1/_5$ и $^1/_4$, ограничив область их применения согласно табл. 2—20 (по А. М. Латышенкову [11]).

Ошибка в величине C, вычисленной по сокращенной формуле Павловского при выборе показателя степени y в зависимости от значений n и R согласно табл. 2—20, для R>3,0 *м* не превышает 2,5—3,0%, а для R<3,0 *м*, как правило, она меньше 2%.

Таблица 2—18

Коэффициент шероховатости n и величина $\frac{1}{n}$ в формулах Павловского, Агроскина и Гангилье—Куттера

Род стенки	n	$\frac{1}{n}$	Род стенки	n	$\frac{1}{n}$
Исключительно гладкие поверхности; поверхности, покрытые эмалью или глазурью	0,009	111,1	сеченные в скале; каналы в лёссе, плотном гравии, плотной земле, затянутые илистой пленкой (в нормальном состоянии)	0,020	50
Весьма тщательно остроганные доски, хорошо пригнанные; лучшая штукатурка из чистого цемента	0,010	100	Каналы в плотной глине; каналы в лёссе, гравии, земле, затянутые несплошной (местами прерываемой) илистой пленкой; земляные каналы, находящиеся в условиях содержания и ремонта выше средних	0,0225	44,4
Лучшая цементная штукатурка ($^1/_3$ песку); чистые (новые) гончарные, чугунные и железные трубы, хорошо уложенные и соединенные; хорошо остроганные доски	0,011	90,9	Хорошая сухая кладка; земляные каналы в средних условиях содержания и ремонта; реки в весьма благоприятных условиях (чистое прямое ложе со свободным течением, без обвалов и глубоких промоин)	0,025	40
Нестроганые доски, хорошо пригнанные; водопроводные трубы в нормальных условиях, без заметной инкрустации; весьма чистые водосточные трубы; весьма хорошая бетонировка	0,012	83,3	Земляные каналы в условиях содержания и ремонта ниже средней „нормы"	0,0275	36,4
Тесовая кладка в лучших условиях, хорошая кирпичная кладка; водосточные трубы в нормальных условиях; несколько загрязненные водопроводные трубы	0,013	76,9	Земляные каналы в сравнительно плохих условиях (например, местами с водорослями, булыжником или гравием по дну), заметно заросшие травой, с местными обвалами откосов и пр.; реки в благоприятных условиях течения (см. п. 11)	0,030	33,3
Загрязненные трубы (водопроводные и водосточные); бетонировка каналов в средних условиях	0,014	71,4	Каналы, находящиеся в весьма плохих условиях (с неправильным профилем, заметно засоренные камнями и водорослями и пр.); реки в сравнительно благоприятных условиях, но с некоторым количеством камней и водорослей	0,035	28,6
Средняя кирпичная кладка; облицовка из тесаного камня в средних условиях; значительно загрязненные водостоки; брезент по деревянным рейкам	0,015	66,7	Каналы в исключительно плохих условиях (значительные промоины и обвалы, заросли камыша, густые корни, крупные камни по руслу и пр.); реки при дальнейшем ухудшении условий течения (по сравнению с предыдущими пунктами); увеличение количества камней и водорослей; извилистое ложе с небольшим количеством промоин и отмелей и т. д	0,040	25
Хорошая бутовая кладка; старая (расстроенная) кирпичная кладка; сравнительно грубая бетонировка; исключительно гладкая, весьма хорошо разработанная скала	0,017	58,8			
Каналы, покрытые толстым, устойчивым илистым слоем; каналы в плотном лёссе и плотном мелком гравии, затянутые сплошной илистой пленкой (все притом в безукоризненном состоянии)	0,018	55,6			
Средняя (вполне удовлетворительная) бутовая кладка; булыжная мостовая; каналы, весьма чисто вы-					

Таблица 2–19

Значения коэффициента C по полной формуле Павловского:

$C=\frac{1}{n}R^{y}$ при $y=2{,}5\sqrt{n}-0{,}13-0{,}75\sqrt{R}\,(\sqrt{n}-0{,}10)$

R в м \ n	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,020	0,0225	0,025	0,0275	0,030	0,035	0,040
0,10	67,36	60,33	54,46	49,43	45,07	38,00	35,06	30,85	26,18	22,48	19,53	17,50	14,00	11,43
0,12	69,00	61,92	56,10	50,86	46,47	39,29	36,34	32,05	27,29	23,56	20,51	18,40	14,80	12,15
0,14	70,36	63,25	57,30	52,14	47,74	40,47	37,50	33,10	28,26	24,48	21,38	19,23	15,54	12,80
0,16	71,64	64,50	58,46	53,29	48,80	41,53	38,50	34,05	29,15	25,28	22,18	19,96	16,20	13,40
0,18	72,73	65,53	59,46	54,29	49,80	42,47	39,45	34,90	29,95	26,04	22,87	20,63	16,80	13,95
0,20	73,73	66,50	60,46	55,21	50,74	48,35	40,28	35,65	30,71	26,76	23,56	21,23	17,34	14,48
0,22	74,64	67,42	61,31	56,07	51,54	44,11	40,89	36,40	31,37	27,40	24,14	21,80	17,86	14,95
0,24	75,55	68,25	62,08	56,86	52,34	44,88	41,78	37,05	32,00	28,00	24,72	22,36	18,34	15,40
0,26	76,27	69,00	62,85	57,57	53,00	45,53	42,45	37,70	32,62	28,56	25,27	22,86	18,83	15,83
0,28	77,00	69,75	63,54	58,29	53,67	46,17	43,06	38,25	33,15	29,08	25,78	23,33	19,26	16,23
0,30	77,73	70,42	64,23	58,93	54,34	46,82	43,67	38,85	33,69	29,60	26,25	23,80	19,68	16,60
0,32	78,36	71,05	64,85	59,50	54,94	47,35	44,23	39,35	34,17	30,08	26,72	24,23	20,06	16,98
0,34	79,00	71,67	65,46	60,07	55,47	47,94	44,78	39,85	34,66	30,56	27,16	24,63	20,46	17,33
0,36	79,64	72,25	66,00	60,64	56,07	48,47	45,28	40,35	35,15	31,00	27,60	25,03	20,83	17,68
0,38	80,18	72,75	66,54	61,22	56,54	48,94	45,78	40,80	35,60	31,40	28,00	25,43	21,17	18,00
0,40	80,73	73,33	67,08	61,72	57,07	49,41	46,28	41,25	36,00	31,80	28,40	25,80	21,51	18,30
0,45	81,91	74,50	68,23	62,86	58,20	50,53	47,34	42,30	36,97	32,76	29,31	26,66	22,31	19,05
0,50	83,09	75,67	69,31	63,30	59,27	51,59	48,39	43,25	37,91	33,64	30,14	27,46	23,06	19,75
0,55	84,09	76,67	70,31	64,93	60,20	52,53	49,28	44,10	38,75	34,44	30,94	28,20	23,74	20,40
0,60	85,09	77,58	71,23	65,86	61,14	53,41	50,17	44,90	39,51	35,20	31,67	28,90	24,40	21,03
0,65	86,00	78,42	72,08	66,64	61,94	54,17	50,95	45,70	40,26	35,92	32,36	29,53	25,00	21,60
0,70	86,82	79,25	72,93	67,50	62,74	54,94	51,73	46,40	40,93	36,60	33,01	30,16	25,57	22,15
0,75	87,55	80,00	73,69	68,22	63,47	55,70	52,45	47,05	41,60	37,24	33,63	30,76	26,14	22,68
0,80	88,27	80,75	74,46	68,93	64,20	56,35	53,12	47,70	42,22	37,84	34,25	31,30	26,66	23,18
0,85	89,00	81,50	75,08	69,57	64,87	57,06	53,78	48,30	42,80	38,40	34,80	31,86	27,17	23,65
0,90	89,64	82,17	75,69	70,22	65,47	57,64	54,39	48,90	43,37	38,96	35,34	32,36	27,66	24,13
0,95	90,27	82,50	76,31	70,86	66,07	58,23	54,90	49,45	43,91	39,48	35,85	32,86	28,11	24,58
1,00	90,91	83,33	76,92	71,43	66,67	58,82	55,56	50,00	44,44	40,00	36,36	33,33	28,57	25,00
1,10	92,00	84,33	77,92	72,36	67,54	59,64	56,34	50,75	45,15	40,72	37,05	34,00	29,20	25,60
1,20	93,09	85,33	78,92	73,29	68,40	60,47	57,12	51,50	45,82	41,40	37,71	34,63	29,79	26,18
1,30	94,09	86,25	79,77	74,07	69,14	61,17	57,78	52,15	46,48	42,04	38,32	35,23	30,34	26,70
1,40	95,00	87,08	80,62	74,86	69,87	61,88	58,45	52,75	47,06	42,64	38,91	35,76	30,86	27,20
1,50	95,82	87,83	81,38	75,57	70,54	62,53	59,06	53,35	47,60	43,20	39,41	36,30	31,37	27,68
1,60	96,64	88,58	82,15	76,29	71,20	63,11	59,62	53,90	48,12	43,72	39,96	36,80	31,83	28,13
1,70	97,36	89,25	82,85	76,93	71,80	63,70	60,17	54,45	48,62	44,24	40,43	37,26	32,28	28,55
1,80	98,09	89,92	83,54	77,57	72,40	64,23	60,67	54,95	49,11	44,72	40,91	37,70	32,71	28,95
1,90	98,82	90,58	84,15	78,14	72,94	64,76	61,17	55,40	49,55	45,20	41,34	38,13	33,11	29,35
2,00	99,45	91,17	84,77	78,72	73,47	65,29	61,67	55,85	50,00	45,64	41,78	38,56	33,51	29,73
2,10	100,09	91,75	85,31	79,22	73,94	65,76	62,12	56,30	50,39	46,04	42,18	38,96	33,88	30,08
2,20	100,73	92,33	85,92	79,79	74,47	66,23	62,56	56,70	50,79	46,48	42,58	39,33	34,26	30,45

Продолжение табл. 2—19

R в м \ n	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,020	0,0225	0,025	0,0275	0,030	0,035	0,040
2,30	101,27	92,83	86,46	80,29	74,94	66,64	62,95	57,15	51,19	46,84	42,94	39,70	34,60	30,78
2,40	101,91	93,42	86,92	80,72	75,34	67,05	63,34	57,50	51,55	47,24	43,30	40,06	34,94	31,13
2,50	102,45	93,72	87,46	81,22	75,80	67,47	63,73	57,90	51,91	47,60	43,67	40,40	35,18	31,43
2,60	102,91	94,33	87,93	81,64	76,20	67,88	64,12	58,25	52,26	47,96	44,03	40,73	35,60	31,75
2,70	103,36	94,75	88,38	82,07	76,60	68,29	64,51	58,60	52,62	48,32	44,36	41,06	35,91	32,05
2,80	103,91	95,25	88,85	82,50	77,00	68,64	64,84	58,95	52,93	48,64	44,69	41,36	36,20	32,35
2,90	104,36	95,67	89,23	82,86	77,34	69,00	65,17	59,30	53,24	48,96	44,98	41,70	36,45	32,60
3,00	104,82	96,08	89,69	83,29	77,74	69,35	65,51	59,60	53,55	49,28	45,30	42,00	36,70	32,80
3,20	105,73	96,92	90,54	84,07	78,47	70,05	66,17	60,25	54,17	49,88	45,89	42,56	37,00	33,00
3,40	106,55	97,67	91,23	84,72	79,07	70,64	66,73	60,80	54,71	50,40	46,10	42,80	37,30	33,20
3,60	107,36	98,42	92,00	85,43	79,74	71,29	67,34	61,35	55,21	50,70	46,50	43,15	37,60	33,45
3,80	108,09	99,08	92,69	86,07	80,34	71,88	67,89	61,90	55,77	51,00	46,90	43,50	37,90	33,70
4,00	108,82	99,75	93,38	86,72	80,94	72,41	68,39	62,40	56,26	51,30	47,20	43,75	38,10	33,90
4,20	109,55	100,42	94,00	87,29	81,47	72,94	68,89	62,90	56,71	51,55	47,50	44,00	38,30	34,15
4,40	110,18	101,00	94,62	87,86	82,00	73,47	69,39	63,40	57,15	51,80	47,70	44,20	38,45	34,35
4,60	110,82	101,58	95,23	88,43	82,54	73,94	69,83	63,85	57,59	52,00	47,90	44,50	38,60	34,45
4,80	111,45	102,17	95,85	89,00	83,07	74,41	70,28	64,25	58,04	52,25	48,10	44,70	38,70	34,55
5,00	112,09	102,75	96,38	89,50	83,54	74,88	70,73	64,70	58,44	52,50	48,30	44,90	38,80	34,65

Таблица 2—20

Пределы применения показателей y

Тип русла	Пределы применения		Значения y
	$R<1$ м	$R>1$ м	
Русла малой шероховатости	$0,015<n<0,018$	$0,015<n<0,020$	0,167
Русла средней шероховатости	$0,018<n<0,025$	$0,020<n<0,030$	0,200
Русла большой шероховатости	$0,025<n<0,035$	$0,030<n<0,040$	0,250

Для оценки ошибки, получаемой в величине C, и расходной характеристики K при вычислении их по распространенной формуле для C при $y=1/6$ по сравнению с C и K, вычисленными по полной формуле Павловского, приводится вычисленная А. М. Латышенковым табл. 2—21 поправочного коэффициента $k=\dfrac{C_{(y)}}{C_{(1/6)}}=R^{y-0,167}$.

Из этой таблицы видно, что ошибка от применения сокращенной формулы $C=\dfrac{1}{n}R^{1/6}$ за пределами рекомендуемых для $y=1/6$ значений n и R может достигать при больших значениях R до 8%, а при малых значениях R до 12—24%.

Таблица 2—21

Коэффициенты перевода $C=\dfrac{1}{n}R^{1/6}$ к C, вычисленному по полной формуле Павловского: $C=\dfrac{1}{n}R^{y}$

R в м \ n	0,012	0,015	0,020	0,025	0,030	0,040
0,2	1,042	1,002	0,931	0,881	0,836	0,762
0,4	1,026	1,002	0,961	0,937	0,903	0,867
0,6	1,015	1,002	0,983	0,967	0,953	0,928
0,8	1,006	1,001	0,993	0,987	0,981	0,970
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,2	0,994	1,000	1,004	1,009	1,014	1,022
1,4	0,989	0,997	1,007	1,016	1,024	1,039
1,6	0,984	0,994	1,008	1,020	1,032	1,053
1,8	0,980	0,992	1,009	1,023	1,037	1,067
2,0	0,976	0,989	1,009	1,026	1,040	1,070
2,2	0,973	0,987	1,009	1,027	1,044	1,075
2,4	0,970	0,985	1,008	1,028	1,046	1,078
2,6	0,966	0,983	1,006	1,027	1,046	1,080
2,8	0,963	0,980	1,004	1,026	1,046	1,083
3,0	0,960	0,977	1,003	1,025	1,046	1,083
3,5	0,955	0,972	0,999	1,023	1,045	1,082
4,0	0,950	0,966	0,993	1,017	1,041	1,078
4,5	0,944	0,958	0,986	1,009	1,035	1,070
5,0	0,938	0,953	0,979	1,001	1,028	1,060

Примечание. Коэффициент перевода высчитан по формуле

$$k=\frac{C_{(y)}}{C_{(1/6)}}=R^{y-0,167}.$$

В 1949 г. проф. И. И. Агроскин предложил [1] новую формулу для определения коэффициента C, основанную на связи величины абсолютной шероховатости Δ с коэффициентом n. Формула И. И. Агроскина для C может быть представлена в виде:

$$C = \frac{1}{n} + 17{,}72 \lg R, \qquad (2-43)$$

где n — коэффициент шероховатости (см. табл. 2—17);
R — гидравлический радиус.

Для расчета открытых русел при $R<3$ *м* формула (2—43) дает для C результаты несколько меньшие, но близкие к формуле (2—41).

Из старых формул для определения C, дающих относительно точные значения, можно пользоваться сокращенной формулой Гангилье—Куттера:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{23n}{\sqrt{R}}}, \qquad (2-44)$$

где n — коэффициент шероховатости (см. табл. 2—17);
R — гидравлический радиус сечения.

При расчете естественных русел коэффициенты шероховатости принимаются по данным М. Ф. Срибного (табл. 2—22) и Б. В. Полякова (табл. 2—23).

Таблица 2—22

Коэффициенты шероховатости n и величины $\frac{1}{n}$ для естественных водотоков по М. Ф. Срибному[1]

Характеристика русла	$\frac{1}{n}$	Коэффициент шероховатости n
Естественные русла в весьма благоприятных условиях (чистое, прямое, незасоренное, земляное со свободным течением русло)	40	0,025
Русла постоянных водотоков равнинного типа (преимущественно больших и средних рек) в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды. Периодические потоки (большие и малые) при очень хорошем состоянии поверхности и формы ложа	30	0,033
Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмелями, промоинами, местами с камнями). Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в относительно благоприятных условиях	25	0,040
Русла (больших и средних рек) значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые и с неспокойным течением. Периодические (ливневые и весенние) водотоки, несущие во время паводка заметное количество наносов, с крупногалечным или покрытым растительностью (травой и пр.) ложем. Поймы (больших и средних рек) сравнительно разработанные, покрытые нормальным количеством растительности (травой, кустарниками)	20	0,050
Русла периодических водотоков сильно засоренные и извилистые. Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кустарники, деревья с наличием заводей).		
Галечно-валунные русла горного типа с неправильной поверхностью водного зеркала. Порожистые участки равнинных рек	15	0,067
Реки и поймы весьма значительно заросшие (со слабым течением) с большими глубокими промоинами. Валунные горного типа русла с бурливым пенистым течением, с изрытой поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды)	12,5	0,080
Поймы такие же, как предыдущей категории, но с сильно неправильным косоструйным течением, заводями и пр. Горно-водопадного типа русла с крупно-валунным извилистым строением ложа (перепады ярко выражены, пенистость настолько сильна, что вода, потеряв прозрачность, имеет белый цвет, шум потока доминирует над всеми остальными звуками, делает разговор затруднительным)	10	0,100
Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода). Поймы с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями—озерами и пр.	7,5	0,133
Потоки типа селевых, состоящие из грязи, камней и пр. Глубинные поймы (сплошь лесные, таежного типа)	5,0	0,200

[1] См. также—Гидроэнергопроект, Стандарты, нормы и технические условия проектирования гидротехнических сооружений гидроэлектростанций, Сборник № 1, 1939 г. Временные технические условия. Коэффициенты шероховатости. Нормы проектирования (ТУ 24-02).

Таблица 2—23

Коэффициенты шероховатости n для равнинных рек по Б. В. Полякову

Категория	Характеристика русла равнинных рек	Коэффициент шероховатости n
I	Русло песчаное ровное, без растительности, с незначительным влечением донных наносов	0,02—0,023
II	Русло песчаное извилистое, с большими перемещениями донных масс. Пойма, покрытая лугом без кустарника	0,023—0,033
III	Пойма, покрытая кустарником или редким лесом	0,033—0,045
IV	Пойма, покрытая лесом	0,045—0,060

2—16. ГИДРАВЛИЧЕСКИ НАИВЫГОДНЕЙШЕЕ СЕЧЕНИЕ

Гидравлически наивыгоднейшей называется такая форма поперечного сечения русла, которая при заданном уклоне, шероховатости и площади живого сечения обладает наибольшей пропускной способностью. При заданном i и площади живого сечения ω наибольшей пропускной способностью будет обладать сечение с максимальным гидравлическим радиусом R. Последний при ω=const будет иметь сечение с наименьшим смоченным периметром χ.

Для каналов трапецоидального сечения гидравлически наивыгоднейшее сечение получается при отношении β ширины дна b к глубине h, определяемом по формуле:

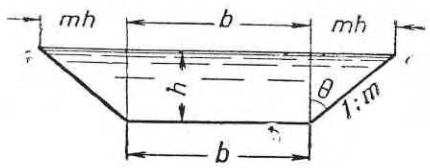
$$\beta_{г.н} = \frac{b}{h} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right), \qquad (2-45)$$

где m — коэффициент откоса, т. е. котангенс угла наклона стенок канала к горизонту (фиг. 2—41).

В табл. 2—24 приведены значения $\beta_{г.н}$ по формуле (2—45) при различном значении коэффициента откоса m.

Гидравлический радиус в трапецоидальном гидравлически наивыгоднейшем сечении равен половине глубины:

$$R_{г.н} = \frac{h}{2}.$$



Фиг. 2-41

Таблица 2—24

Значения $\beta_{г.н} = \frac{b}{h}$ для гидравлически наивыгоднейшего сечения трапецоидальной формы

m	0	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\beta_{г.н} = \frac{b}{h}$	2,0	1,56	1,24	0,82	0,61	0,47	0,385	0,325

Если заданными величинами в канале являются Q, v, i, m и n и требуется определить гидравлически наивыгоднейшие размеры поперечного сечения канала h и b, то для этого типа задач можно применять метод проектирования каналов экономического поперечного сечения, предложенный проф. А. А. Угинчусом[1].

Решая совместно уравнения площади и смоченного периметра трапецоидального сечения относительно глубины наполнения h

$$\omega = (b+mh)h \text{ и } \chi = b+2h\sqrt{1+m^2} = b + m'h,$$

где

$$m' = 2\sqrt{1+m^2},$$

можно получить следующее выражение:

$$h = \frac{\chi}{2(m'-m)} - \sqrt{\frac{\chi^2}{4(m'-m)^2} - \frac{\omega}{m'-m}}. \qquad (2-45')$$

В этой формуле значения m', m и $\omega = \frac{Q}{v}$ известны и требуется только узнать значение χ.

Для решения этого типа задач А. А. Угинчусом вычислены таблицы скоростных характеристик $W = \frac{v}{\sqrt{i}} = C\sqrt{R}$ при значениях C по формуле (2—41).

Зная W, находят величину $R = \frac{W^2}{C^2}$ и $\chi = \frac{W}{Q}$.

Глубина наполнения определяется по формуле (2—45′), а ширина канала по зависимости $b = \chi - m'h$.

Проведенное А. А. Угинчусом графическое исследование уравнения (2—45′) показало, что кривая $h = f(v)$ обладает особенностью, заключающейся в том, что верхняя часть кривой асимптотически приближается к оси ординат. В этой области при весьма незначительном изменении скорости v происходит резкое изменение глубины наполнения h и, следовательно, ширины канала по дну b.

Так, например, при изменении скорости в пределах 1% можно получить изменение ширины канала по дну в 2—3 раза и более.

Существует целая область гидравлически наивыгоднейших профилей, имеющих практически одинаковые площади живых сечений ω и R, но с сильно отличающимися между собой глубинами наполнения h и ширинами b.

Поэтому, установив указанную область, можно в ней выбрать сечение канала, удобное по производственным или эксплуатационным условиям и обладающее свойствами гидравлически наивыгоднейшего сечения.

---

[1] Угинчус А. А., Каналы и сооружения на них. 1953, § 6, стр. 60—69.

2—17. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАНАЛОВ (типы задач)

При гидравлическом расчете каналов встречаются следующие основные типы задач.

I тип. При заданных размерах канала (b, h и m), его шероховатости n и уклоне дна i требуется определить пропускную способность канала Q.

Вычисляют площадь ω и гидравлический радиус R сечения канала, коэффициент C, и определяют Q по формуле (2—40).

II тип. По заданному расходу Q, размерам канала b, h и m и шероховатости n требуется определить уклон i.

Из формулы (2—40) искомая величина уклона

$$i = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} . \qquad (2—40')$$

Если требуется найти уклон канала по величине скорости, допускаемой на размыв (v_{max}) или незаиление v_{min}), то удобнее пользоваться формулой:

$$i = \frac{v^2}{C^2 R} . \qquad (2—40'')$$

Данные о величинах неразмывающих скоростей, допускаемых в каналах для различных грунтов и креплений, а также незаиляющих скоростей в каналах приведены в гл. 7.

III тип. Требуется подобрать размеры поперечного сечения канала, глубину h (или ширину b), если известны Q, i, n и b (или h). Этот тип задач наиболее часто встречается в инженерной практике.

Так как здесь неизвестными величинами являются b и h, то одной из них задаются, а вторую определяют.

Непосредственное аналитическое решение задачи по определению неизвестной величины h или b из формулы (2—40) приводит к весьма сложному алгебраическому уравнению относительно h или b, а потому задача решается подбором или при помощи специальных вспомогательных таблиц или графиков (см. ниже).

Для упрощения техники решения задач в гидравлике введено понятие расходной характеристики:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \omega C \sqrt{R} .$$

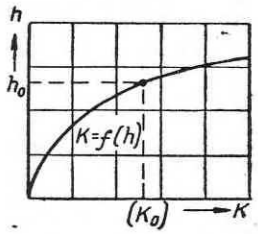
Физический смысл этого понятия делается ясным при i=1, когда K=Q, т. е. расходная характеристика (иногда ее называют «модуль расхода») есть тот расход, который прошел бы в русле при уклоне i=1.

Для решения задачи методом подбора при определенной выбранной величине b (или h) задаются рядом значений искомой глубины h (или b). По b и h последовательно находят ω, χ, R, C, K.

Вычисления рекомендуется сводить в таблицу по следующей форме.

b	h	ω	χ	R	$\sqrt{R}$	C	K

Определив два или три значения расходной характеристики K для принятых значений h, строят график K=$f(h)$ или K=$f(b)$, если подбирается ширина канала. По этой кривой (фиг. 2—42), снеся на нее заданную величину расходной характеристики $K_0 = \frac{Q_0}{\sqrt{i}}$, можно определить искомую величину h_0 и проверить ее, подсчитав для нее значение K по формуле $K = \omega C\sqrt{R}$.



Фиг. 2—42. Кривая зависимости K=$f(h)$

Если подбор глубины желательно сделать не по расходной характеристике $K_0 = \frac{Q_0}{\sqrt{i}}$, а непосредственно по расходу Q_0, то в приведенную таблицу вместо графы K добавляют две графы: $\sqrt{i}$ и Q.

IV тип. Требуется определить размеры гидравлически наивыгоднейшего сечения канала трапецоидальной формы при заданных Q, i и m.

Решение проводится аналогично решению задачи III типа с той лишь разницей, что между b и h выдерживается постоянное соотношение (2—45):

$$\frac{b}{h} = \beta_{г.н} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right) .$$

V тип. Требуется определить размеры поперечного сечения канала h и b, если заданы расход Q, уклон i, скорость течения v, m и n.

Такой тип задач может встретиться при проектировании энергетических и оросительных каналов при заданной величине скорости v.

Решение этого типа задач проводится по способу, предложенному А. А. Угинчусом — см. п. 2—16.

2—18. РАСЧЕТ КАНАЛОВ ПО СПОСОБУ ЕДИНИЧНЫХ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Если в трапецоидальном сечении отношение $\frac{h}{b}$ обозначить через ξ, то основные параметры сечения $\omega\chi$ и R могут быть выражены так:

$$\left.\begin{aligned} &\omega = (b + mh)\,h = b^2(1 + m\xi)\xi; \\ &\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2} = b\left(1 + 2\xi\sqrt{1+m^2}\right); \\ &R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{b(1+m\xi)\,\xi}{1 + 2\xi\sqrt{1+m^2}} . \end{aligned}\right\} \qquad (2—46)$$

Для сечения, имеющего ширину по дну b=1 *м*, будем иметь:

$$\omega_1 = (1 + m\xi)\,\xi; \quad \chi_1 = 1 + 2\xi\sqrt{1+m^2}$$

и

$$R_1 = \frac{(1+m\xi)\,\xi}{1 + 2\xi\sqrt{1+m^2}} .$$

Расходная характеристика такого сечения при b=1 и фиктивном значении коэффициента шероховатости n=1 была проф. В. Д. Журиным названа «единичной расходной характеристикой»:

$$K_1 = \omega_1 C_1 \sqrt{R_1} . \qquad (2—47)$$

Если выразить C_1 по упрощенной формуле Павловского при постоянном значении показателя степени y:

$$C = \frac{1}{n} R^y,$$

то расходная характеристика при любой ширине b может быть выражена [11] как:

$$K = \frac{b^{2,5+y} K_1}{n},$$

где

$$K_1 = (1 + m\xi)\,\xi \left[\frac{(1 + m\xi)\,\xi}{1 + 2\xi\sqrt{1 + m^2}}\right]^{0,5+y}. \quad (2\text{—}48)$$

Так как

$$Q = K\sqrt{i} = \frac{b^{2,5+y} K_1 i^{0,5}}{n},$$

то

$$K_1 = \frac{nQ}{b^{2,5+y}\, i^{0,5}}.$$

Ввиду того что величины K_1 очень малы, для расчетов удобнее иметь дело с обратной величиной:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{b^{2,5+y}\, i^{0,5}}{nQ}. \quad (2\text{—}49)$$

Такое же выражение для трапецоидального сечения при $y=1/6$ получил в 1939 г. проф. В. Т. Лобачев для введенной им при расчете каналов методом безразмерных параметров функции $Z(\xi)$, см. [10] и [12].

Пользуясь последней формулой с показателем $2,5+y$ при b, соответствующим заданной шероховатости канала (согласно табл. 2—17), и имея вычисленные А. М. Латышенковым таблицы значений $\frac{1}{K_1}$ (табл. 2—25, 2—26 и 2—27) для разных ξ, m и n, можно быстро без подбора решать задачи на определение глубин в каналах трапецоидального и прямоугольного сечений при заданных Q, b, m, n и i.

Действительно, величина $\frac{1}{K_1}$ легко вычисляется по формуле (2—49). С другой стороны, $\frac{1}{K_1} = f(\xi)$ при заданном m отвечает только одному, вполне определенному, значению ξ, которое находится по табл. 2—25 ÷ ÷2—27. Искомая глубина наполнения канала при этом $h = \xi b$.

Если заданной величиной в канале является глубина h и требуется определить ширину канала по дну b, то решение задачи этого типа также легко может быть проведено при помощи таблиц:

$$\frac{1}{K'_1} = f(\beta),$$

где

$$\beta = \frac{b}{h};$$

K'_1 — единичная расходная характеристика при единичной глубине $h=1$ *м* и $n=1$.

Таблица 2—25

Значения $\frac{1}{K_1}$ при $y = 0,167$

ξ \ m	0	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0
0,10	52,3	49,1	46,9	45,0	43,9	42,60	41,50
0,12	39,4	36,6	34,6	33,0	31,75	30,80	29,80
0,14	31,3	28,45	26,6	25,44	24,40	23,46	22,4
0,16	25,6	22,96	21,20	20,04	19,1	18,30	17,6
0,18	21,44	18,98	17,40	16,3	15,48	14,85	14,23
0,20	18,25	16,00	14,53	13,52	12,75	12,16	11,52
0,25	13,2	11,18	9,93	9,08	8,48	7,86	7,49
0,30	10,20	8,32	7,21	6,53	5,98	5,56	5,20
0,35	8,20	6,51	5,51	4,92	4,55	4,11	3,78
0,40	6,81	5,20	4,35	3,82	3,43	3,12	2,89
0,50	5,04	3,61	2,91	2,48	2,20	1,96	1,78
0,60	3,97	2,67	2,07	1,74	1,50	1,33	1,20
0,70	3,25	2,06	1,58	1,27	1,075	0,948	0,85
0,80	2,74	1,64	1,20	0,965	0,815	0,708	0,628
0,90	2,37	1,36	0,953	0,751	0,626	0,540	0,438
1,00	2,08	1,113	0,770	0,602	0,498	0,426	0,375
1,2	1,67	0,808	0,531	0,405	0,339	0,279	0,243
1,4	1,39	0,618	0,386	0,288	0,232	0,195	0,168
1,6	1,19	0,473	0,291	0,213	0,169	0,141	0,122
1,8	1,04	0,378	0,225	0,162	0,128	0,106	0,091
2,0	0,921	0,308	0,179	0,127	0,100	0,084	0,070

Таблица 2—2б

Значения $\frac{1}{K_1}$ при $y = 0,20$

ξ \ m	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,10	56,6	52,9	50,4	48,4	47,4	46,1	45,0
0,12	42,8	39,3	37,0	35,3	34,0	33,0	32,1
0,14	33,6	30,4	28,4	27,1	25,9	25,10	24,0
0,16	27,4	24,4	22,6	21,3	20,3	19,50	18,8
0,18	22,9	20,2	18,5	17,3	16,4	15,80	15,2
0,20	19,8	17,0	15,4	14,3	13,5	12,90	12,3
0,25	14,0	11,8	10,5	9,57	8,96	8,30	7,80
0,30	10,8	8,75	7,58	6,86	6,28	5,86	5,47
0,35	8,65	6,84	5,76	5,12	4,76	4,31	3,96
0,40	7,16	5,44	4,54	3,98	3,58	3,26	3,10
0,50	5,17	3,76	3,01	2,57	2,29	2,04	1,85
0,60	4,15	2,76	2,14	1,80	1,55	1,37	1,24
0,70	3,35	2,13	1,63	1,31	1,11	0,970	0,871
0,80	2,84	1,69	1,23	0,99	0,834	0,725	0,643
0,90	2,46	1,395	0,975	0,768	0,638	0,550	0,487
1,0	2,15	1,14	0,787	0,613	0,506	0,433	0,381
1,2	1,73	0,825	0,540	0,411	0,334	0,283	0,246
1,4	1,44	0,629	0,391	0,291	0,235	0,197	0,170
1,6	1,23	0,480	0,294	0,214	0,170	0,142	0,123
1,8	1,06	0,383	0,227	0,163	0,127	0,106	0,091
2,0	0,947	0,311	0,180	0,127	0,100	0,084	0,070

Таблица 2—27

Значения $\frac{1}{K_1}$ при $y = 0{,}25$

ξ \ m	0	0,5	1,0	1,5	2.0	2,5	3,0
0,10	63,0	58,9	56,2	54,0	52,8	51,2	49,9
0,12	46,9	43,5	40,8	38,9	37,4	36,4	35,4
0,14	36,9	33,4	31,2	29,7	28,4	27,4	26,3
0,16	29,9	26,7	24,6	23,2	22,1	21,13	20,5
0,18	24,9	21,9	20,1	18,8	17,9	17,21	16,5
0,20	21,0	18,4	16,7	15,5	14,7	14,00	13,3
0,25	15,05	12,7	11,3	10,30	9,65	8,96	8,50
0,30	11,55	9,37	8,08	7,32	6,70	6,26	5,86
0,35	9,24	7,28	6,12	5,46	5,04	4,57	4,22
0,40	7,60	5,77	4,84	4,22	3,78	3,45	3,21
0,50	5,58	3,96	3,16	2,70	2,41	2,14	1,05
0,60	4,38	2,90	2,24	1,88	1,62	1,435	1,30
0,70	3,54	2,22	1,69	1,36	1.16	1,012	0,908
0,80	3,00	1,76	1,28	1,02	0,861	0,749	0,666
0,90	2,58	1,45	1,01	0,788	0,655	0,566	0,503
1,00	2,25	1,18	0,808	0,629	0,519	0,445	0,380
1,2	1,80	0,849	0,552	0,420	0,341	0,289	0,251
1,4	1,50	0,644	0,397	0,296	0,238	0,200	0,172
1,6	1,28	0,489	0,298	0,217	0,172	0,143	0,124
1,8	1,13	0,389	0,229	0,154	0,128	0,107	0,092
2,0	0,986	0,316	0,181	0,128	0,100	0,084	0,070

Величина

$$\frac{1}{K_1'} = \frac{h^{2,5+y}\, i^{0,5}}{nQ}. \qquad (2-50)$$

В табл. 2—28, 2—29 и 2—30 приведены величины $\frac{1}{K_1'} = f(\beta)$ при разных n, m и β, вычисленные по формуле:

$$\frac{1}{K_1'} = \frac{1}{\beta + m}\left[\frac{\beta + 2\sqrt{1+m^2}}{\beta + m}\right]^{0,5+y}. \qquad (2-51)$$

Вычислив по формуле (2—51) $\frac{1}{K_1'}$, из табл. 2—28 — 2—30 находим соответствующее значение β и определяем искомую ширину $b = \beta h$.

Если требуется определить размеры гидравлически наивыгоднейшего сечения, то по m и табл. 2—24 находят $\beta_{г.н}$. По $\beta_{г.н}$ и m по табл. 2—28 — 2—30 находят $\frac{1}{K_1'} = f(\beta)$ и из уравнения (2—50) определяют h и $b = \beta h$.

Пример 1. Дано: $Q = 40$ *м³/сек*, $b = 10$ *м*, $m = 1{,}5$, $i = 0{,}003$, $n = 0{,}025$. Требуется определить глубину h наполнения трапецоидального канала.

Решение. Так как $n = 0{,}025$, то в сокращенной формуле Павловского для C можно принять (см. табл. 2—20) $y = 0{,}2$, а $2{,}5 + y = 2{,}7$.

Таблица 2—28

Значения $\frac{1}{K_1'}$ при $y = 1/6$

β \ m	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	∞	5,46	2,00	1,20	0,855	0,668	0,550
0,25	—	2,98	1,46	0,965	0,725	0,585	0,493
0,50	5,88	1,97	1,13	0,810	0,636	0,517	0,446
0,75	3,17	1,43	0,915	0,668	0,560	0,467	0,414
1,00	2,08	1,11	0,770	0,608	0,500	0,426	0,375
1,25	1,52	0,95	0,658	0,530	0,460	0,389	0,346
2,50	1,173	0,76	0,576	0,477	0,409	0,360	0,322
3	0,800	0,572	0,457	0,391	0,345	0,309	0,280
4	0,467	0,374	0,320	0,287	0,262	0,240	0,224
5	0,328	0,278	0,246	0,226	0,210	0,197	0,186
6	0,250	0,218	0,198	0,186	0,176	0,165	0,158
7	0,202	0,180	0,166	0,156	0,149	0,144	0,137
8	0,169	0,153	0,144	0,137	0,131	0,125	0,121
9	0,145	0,134	0,125	0,120	0,116	0,112	0,108
10	0,127	0,118	0,112	0,108	0,105	0,101	0,099
1	0,113	0,106	0,101	0,0975	0,094	0,092	0,090

Таблица 2—29

Значения $\frac{1}{K_1'}$ при $y = 0{,}20$

β \ m	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	∞	5,72	2,07	1,233	0,880	0,684	0,563
0,25	—	3,09	1,50	0,982	0,745	0,600	0,504
0,50	6,16	2,03	1,16	0,825	0,648	0,527	0,455
0,75	3,30	1,46	0,94	0,705	0,567	0,477	0,425
1,00	2,16	1,14	0,78	0,612	0,510	0,434	0,380
1,25	1,53	0,925	0,67	0,542	0,455	0,397	0,367
1,50	1,203	0,775	0,588	0,483	0,417	0,365	0,327
2	0,815	0,580	0,463	0,397	0,350	0,313	0,286
3	0,477	0,380	0,325	0,291	0,266	0,244	0,226
4	0,333	0,280	0,248	0,228	0,212	0,198	0,187
5	0,252	0,220	0,200	0,188	0,177	0,167	0,160
6	0,203	0,181	0,169	0,159	0,151	0,144	0,138
7	0,170	0,155	0,145	0,138	0,131	0,126	0,122
8	0,146	0,134	0,126	0,121	0,117	0,112	0,109
9	0,128	0,119	0,113	0,109	0,106	0,102	0,099
10	0,114	0,107	0,102	0,098	0,095	0,093	0,090

Вычисляем:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{b^{2,7}\, i^{0,5}}{nQ} = \frac{10^{2,7}\sqrt{0,0003}}{0,025 \cdot 40} = \frac{501,2 \cdot 0,0073}{1} = 8,68.$$

По табл. 2—26 при $m = 1{,}5$ находим интерполяцией, при $\frac{1}{K_1} = 8{,}68$.

$$\xi = 0{,}266,$$

откуда

$$h = \xi b = 0{,}266 \cdot 10 = 2{,}66\ м.$$

Таблица 2—30

Значения $\frac{1}{K_1'}$ при $y = 0{,}25$

β \ m	1	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3
0		6,14	2,18	1,280	0,915	0,712	0,583
0,25	—	3,30	1,57	1,05	0,778	0,622	0,520
0,50	6,68	2,14	1,207	0,855	0,672	0,543	0,472
0,75	3,52	1,535	0,977	0,734	0,590	0,492	0,441
1,00	2,28	1,19	0,815	0,632	0,527	0,448	0,392
1,25	1,64	0,960	0,693	0,556	0,471	0,407	0,362
1,50	1,26	0,800	0,604	0,497	0,429	0,375	0,336
2	0,845	0,596	0,475	0,406	0,360	0,322	0,392
3	0,487	0,388	0,330	0,296	0,270	0,248	0,232
4	0,340	0,284	0,252	0,231	0,215	0,202	0,190
5	0,256	0,224	0,203	0,189	0,180	0,169	0,163
6	0,207	0,185	0,170	0,160	0,153	0,146	0,140
7	0,171	0,156	0,146	0,139	0,133	0,128	0,124
8	0,147	0,135	0,128	0,122	0,118	0,114	0,111
9	0,129	0,119	0,113	0,110	0,106	0,103	0,100
10	0,115	0,107	0,102	0,099	0,096	0,094	0,091

Пример 2. Дано: $Q=3{,}0$ *м³/сек*, $m=1{,}5$, $n=0{,}025$, $i=0{,}002$. Требуется найти размеры гидравлически наивыгоднейшего трапецоидального сечения.

Решение. а) При $m=1{,}5$

$$\frac{b}{h} = \beta_{г.н} = 0{,}61$$

(см. табл. 2—24).

По табл. 2—29 находим $\frac{1}{K_1'}$. При $m=1{,}5$ и $\beta = 0{,}61$

$$\frac{1}{K_1'} = 0{,}778.$$

Но

$$\frac{1}{K_1'} = \frac{h^{2,7}\, i^{0,5}}{nQ} = \frac{h^{2,7}\sqrt{0{,}002}}{0{,}025 \cdot 3} = 0{,}778,$$

откуда

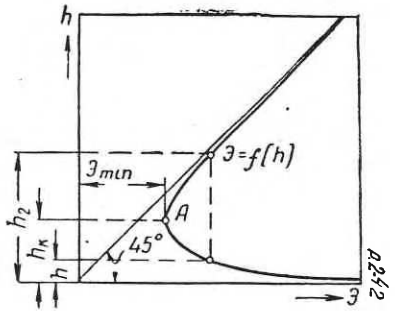
$$h^{2,7} = \frac{0{,}778 \cdot 0{,}025 \cdot 3}{0{,}002} = 1{,}304.$$

Отсюда находим логарифмированием:

$$h = 1{,}103\ м, \quad b = \beta h = 0{,}61 \cdot 1{,}103 = 0{,}673\ м.$$

2—19. УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СЕЧЕНИЯ. КРИТИЧЕСКАЯ ГЛУБИНА ПОТОКА

Удельной энергией сечения при плавно изменяющемся движении в открытом русле называется отнесенная к единице веса жидкости энергия относительно наинизшей точки данного сечения:



Фиг. 2—43. Кривая удельной энергии сечения $Э=f(h)$

$$Э = h + \frac{\alpha v^2}{2g}, \qquad (2—52)$$

где h — глубина воды в сечении;
v — средняя скорость в данном сечении;
α — коэффициент кинетической энергии потока.

Функция $Э=f(h)$ имеет минимум (фиг. 2—43).

Та глубина, при которой удельная энергия сечения имеет минимум, называется критической глубиной потока в данном сечении и обозначается $h_к$.

Общее выражение для определения критической глубины имеет вид:

$$\frac{\omega_к^3}{B_к} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \qquad (2—53)$$

где $\omega_к$ и $B_к$ — соответственно площадь живого сечения и ширина потока поверху при критической глубине.

Это выражение справедливо при любой форме поперечного сечения.

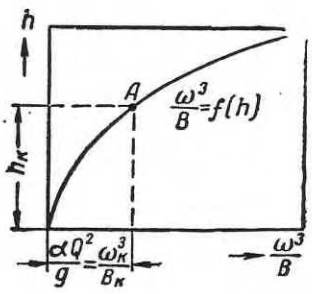
Способы нахождения критической глубины $h_к$

1. В общем случае критическая глубина находится подбором по уравнению (2—53). Для ускорения подбора рекомендуется строить график функции $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$ (фиг. 2—44), причем искомую критическую глубину находят как ординату точки, имеющей своей абсциссой $\frac{\alpha Q^2}{g}$.

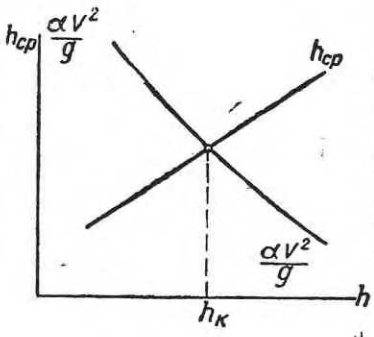
Для построения кривой $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$ вычисления сводят в таблицу по нижеприведенной форме.

b	h	B	ω	$\frac{\omega^3}{B}$	$\frac{\alpha Q^2}{g}$

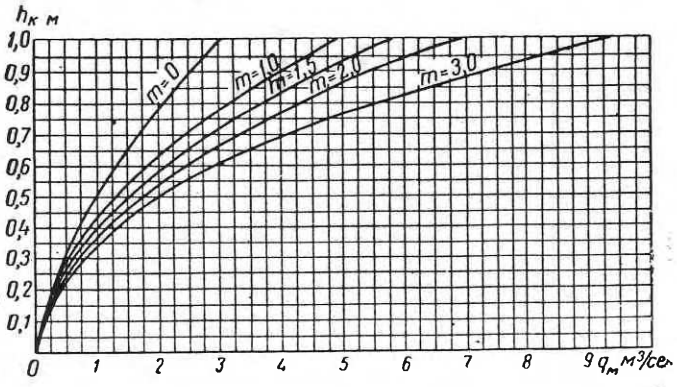
2. Если обе части уравнения (2—53) разделить на $2\omega^2$, то получим $\frac{\omega}{2B} = \frac{h_{ср}}{2} = \frac{\alpha v^2}{2g}$, т. е. при критическом состоянии потока скоростной напор равен половине



Фиг. 2—44. График зависимости $\frac{\omega^3}{B}=f(h)$



Фиг. 2—45. График зависимости $\frac{\alpha v^2}{2g}=f(h)$ *и* $h_{ср}=f(h)$



Фиг. 2—46. График зависимости $h_{к\cdot м}=f(q_м, m)$

средней глубины потока (определенной по ширине сечения поверху).

Поэтому величину $h_к$, по предложению канд. техн. наук А. М. Латышенкова, можно еще находить путем построения по 3 точкам кривых $\frac{\alpha v^2}{g}$ и $h_{ср}=\frac{\omega}{B}$, точка пересечения которых дает $h_к$. (Кривая $h_{ср}=\frac{\omega}{B}$ практически получается почти прямой линией — фиг. 2—45.) Для построения этих кривых вычисления рекомендуется сводить в таблицу по следующей форме.

b	h	ω	B	$v=\frac{Q}{\omega}$	$\frac{\alpha v^2}{g}$	$h_{ср}=\frac{\omega}{B}$

Приведенные выше два графических способа пригодны для русел и каналов любой геометрической формы.

3. Для трапецоидального русла критическую глубину можно находить без подбора — по графику (фиг. 2—46) канд. техн. наук П. Г. Киселева [8], построенному при $\alpha=1{,}1$. Пользование графиком следующее.

Вычисляется величина расхода $q_м$ «модельного» сечения (с шириной $b=1$ *м*)

$$q_м=\frac{Q}{b^{2,5}};$$

по графику для данного откоса m и $q_м$ находят соответствующее значение $h_{к\cdot м}$ для «модельного» сечения, а затем искомую критическую глубину заданного русла по формуле:

$$h_к=h_{к\cdot м}\,b.$$

При $\alpha=1{,}0$ величину $q_м$ находят по формуле:

$$q_м=\frac{Q}{1{,}05\,b^{2,5}},$$

в остальном ход решения тот же.

4. Для русел прямоугольной, треугольной и параболической форм $h_к$ находят аналитически.

Прямоугольное русло.

$$h_к=\sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}}=\sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}},\qquad (2—53')$$

где $q=\frac{Q}{b}$ — удельный расход (на единицу ширины сечения).

При $\alpha=1{,}1$

$$h_к=0{,}482\,q^{2/3};$$

при $\alpha=1$

$$h_к=0{,}467\,q^{2/3}.$$

Треугольное русло.

$$h_к=\sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g\,\mathrm{tg}^2\frac{\theta}{2}}},$$

где θ — угол при вершине.

При $\theta=90°$

$$h_к=\sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g}};$$

при $\alpha=1{,}1$

$$h_к=0{,}295\sqrt[5]{Q^2};$$

при $\alpha=1$

$$h_к=0{,}29\sqrt[5]{Q^2}.$$

Параболическое русло.

$$h_к=\sqrt[4]{\frac{27\,\alpha Q^2}{68\,pg}},$$

где p параметр параболы.

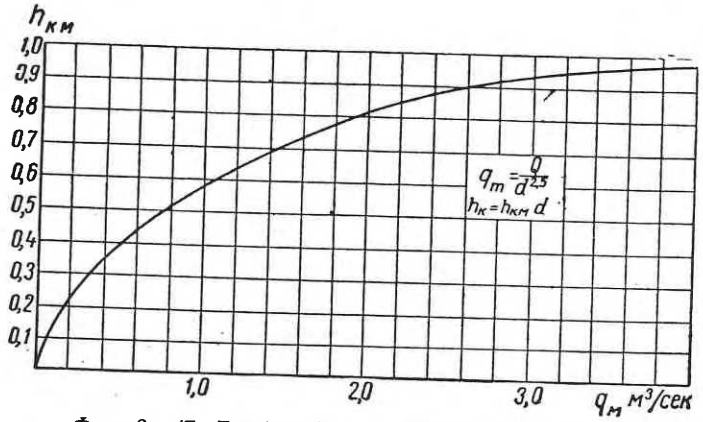
При $\alpha=1{,}1$

$$h_к=0{,}446\sqrt[4]{\frac{Q^2}{p}};$$

при $\alpha=1$

$$h_к=0{,}455\sqrt[4]{\frac{Q^2}{p}}.$$

Круглое сечение. Для круглого сечения критическую глубину можно находить по предложенному

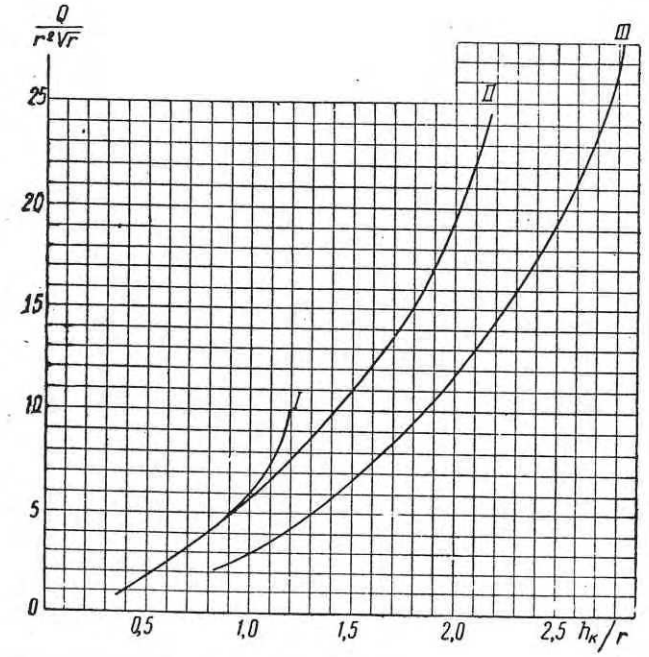


Фиг. 2—47. График для определения критической глубины в круглом сечении при $d=1$ м

А. М. Латышенковым графику (фиг. 2—47). На этом графике приведена кривая величины $h_{к.м}$ для «модельного» круглого сечения при $d=1$ м и $\alpha=1{,}0$ с расходом $q_м=\frac{Q}{d^{2,5}}$; для определения критической глубины в заданном сечении взятую с графика величину $h_{к.м}$ умножают на d, т. е. $h_к = h_{к.м}\, d$.

В основу этого способа положена та же идея, что и в описанном выше способе для трапецоидального сечения. При $\alpha=1{,}1$ расход модельного сечения определяется по формуле $q_м=\frac{1{,}05Q}{d^{2,5}}$; в остальном решение остается то же.

Лотковое и овоидальное сечения. Для нахождения критических глубин в лотковом, шатровом



Фиг. 2—48. График для определения критической глубины в лотковом, шатровом и овоидальном сечениях

I — лотковое сечение; *II* — шатровое сечение; *III* — овоидальное сечение

и овоидальном русле можно применить графический способ, предложенный проф. А. А. Угинчусом [21].

По этому способу относительная величина критической глубины

$$\frac{h_к}{r} = f\left(\frac{\sqrt{\alpha}\,Q}{r^2\sqrt{r}}\right),$$

где r — радиус сечения.

На фиг. 2—48 нанесены при $\alpha=1{,}0$ кривые $\frac{h_к}{r} = f\left(\frac{Q}{r^2\sqrt{r}}\right)$, для лоткового (*I*), шатрового (*II*) и овоидального (*III*) сечений.

Этими кривыми пользуются следующим образом.

По заданной величине Q и r вычисляют $\frac{Q}{r^2\sqrt{r}}$; по последней величине на графике находят соответствующую величину $\frac{h_к}{r}$. Искомая величина критической глубины $h_к=\left(\frac{h_к}{r}\right)r$. При $\alpha=1{,}1$ $\frac{h_к}{r}$ находят по величине $\frac{1{,}05\,Q}{r^2\sqrt{r}}$.

2—20. КРИТИЧЕСКИЙ УКЛОН

Критическим уклоном $i_к$ называется такой уклон дна призматического водотока, при котором данный расход Q проходит в условиях равномерного движения с минимальным запасом удельной энергии, т. е. нормальная глубина h_0 равна критической глубине $h_к$:

$$i_к = \frac{g}{\alpha C_к^2}\cdot\frac{\chi_к}{B_к}, \qquad (2—54)$$

где $\chi_к$, $B_к$ и $C_к$ — соответственно смоченный периметр, ширина поверху и коэффициент C при критической глубине.

Для широких русел $\chi_к \approx B_к$ и, следовательно,

$$i_к = \frac{g}{\alpha C_к^2}.$$

При $i<i_к$ $h_0>h_к$.

В этом случае потоки называются спокойными. При $i>i_к$ $h_0<h_к$ и потоки называются бурными.

Для критического состояния потока, т. е. при $h=h_к$:

$$\frac{\alpha v^2}{g} = h_{ср} = \frac{\omega}{B}. \qquad (2—55)$$

Очевидно, что для бурных потоков

$$\frac{\alpha v^2}{g} > h_к,$$

а для спокойных потоков

$$\frac{\alpha v^2}{g} < h_к.$$

В качестве критерия состояния потока применяют соотношение $\frac{\alpha v^2}{g h_{ср}}$, называемое параметром кинетичности потока $П_к$. Следовательно, для бурных потоков:

$$П_к = \frac{\alpha v^2}{g h_{ср}} > 1.$$

При критическом состоянии потока:

$$П_к = \frac{\alpha v^2}{g h} = 1.$$

Для спокойных потоков:

$$П_к = \frac{\alpha v^2}{g h_{ср}} < 1.$$

Параметр кинетичности потока может быть также представлен в виде:

$$П_к = \frac{\alpha v^2}{g h_{ср}} = \frac{\alpha v^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega} = \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}. \quad (2—56)$$

2—Д. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

Основное уравнение установившегося плавно изменяющегося движения потока для любой формы русла имеет вид:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}\left(1 - \frac{\alpha C^2 R}{g\omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial l}\right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}}. \quad (2—57)$$

Для случая призматического русла $\frac{\partial \omega}{\partial l} = 0$, и уравнение (2—57) принимает вид:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}} = i \frac{1 - \frac{K_0^2}{K^2}}{1 - П_к} = i \frac{1 - \frac{K_0^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha v^2}{g h}}. \quad (2—58)$$

2—21. ТИПЫ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИЗМАТИЧЕСКОМ РУСЛЕ

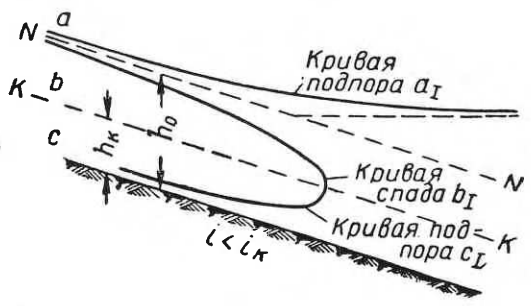
Исследование вопроса о формах кривой свободной поверхности в водотоках дает следующие результаты.

1. Водотоки с прямым уклоном дна ($i > 0$)

I случай. Нормальная глубина больше критической $h_0 > h_к$ (т. е. $i < i_к$). Здесь возможны три зоны.

Зона *a*. Глубина потока больше нормальной $h > h_0$, имеем кривую подпора a_I (фиг. 2—49).

Кривая подпора в нижней своей части асимптотически приближается к горизонтальной прямой.



Фиг. 2—49

В верхней части кривая подпора асимптотически приближается к линии нормальных глубин. Рассмотренная вогнутая кривая подпора (типа a_I) имеет наиболее широкое распространение перед плотинами, мостами и т. п.

Зона *b*. $h_0 > h > h_к$. Имеем выпуклую кривую спада типа b_{II}. В верхней части кривая спада имеет асимптотой линию нормальных глубин. При приближении к $h_к$ кривая спада кончается водопадом (фиг. 2—49, кривая b_I).

Зона *c*. $h < h_к$. Имеем вогнутую кривую подпора типа c_I, встречающуюся при истечении из-под щита при сопряжении с нижним бьефом падающей с водослива струи и т. п.

II случай. Нормальная глубина h_0 меньше критической ($h_0 < h_к$ и $i > i_к$).

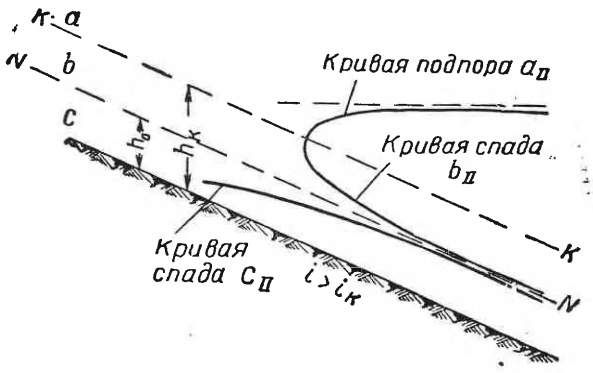
Зона *a*. $h > h_к$. Имеем выпуклую кривую подпора типа a_{II} (фиг. 2—50), встречающуюся перед преградой в бурном потоке (с $i > i_к$). Кривая a_{II} начинается прыжком и имеет асимптотой горизонтальную прямую.

Зона *b*. $h_0 < h < h_к$. Имеем вогнутую кривую спада b_{II} (фиг. 2—50), встречающуюся на быстротоках или при истечении из-под щита в водоток с большим уклоном. Кривая спада внизу асимптотически приближается к линии нормальных глубин. В верхней части кривая начинается прыжком.

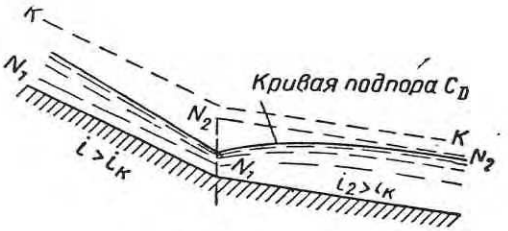
Зона *c*. $h < h_0 < h_к$. Имеем выпуклую кривую подпора типа c_{II} (фиг. 2—51). В нижней части кривая подпора асимптотически подходит к линии бытовых глубин.

III случай. $h_0 = h_к$ (т. е. $i = i_к$).

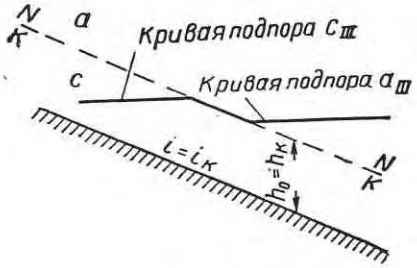
Зона *a*. $h > h_0$. Имеем кривую подпора, близкую к горизонтальной прямой (фиг. 2—52) типа a_{III}.



Фиг. 2—50



Фиг. 2—51



Фиг. 2—52

Зона *b* отсутствует, так как $h_0 = h_к$.

Зона *c*. $h < h_0$. В этом случае также имеем кривую подпора, близкую к горизонтальной прямой типа c_{III} (фиг. 2—52). Эти кривые подпора встречаются при сопряжении водоемов с каналом при $i = i_к$.

2. Водотоки с горизонтальным дном ($i=0$)

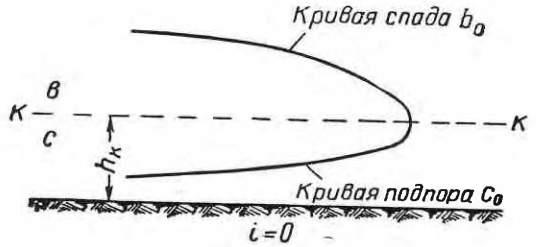
В этом случае уравнение (2—58) можно представить в виде:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\dfrac{Q^2}{K^2}}{\dfrac{\alpha v^2}{gh} - 1}. \qquad (2-59)$$

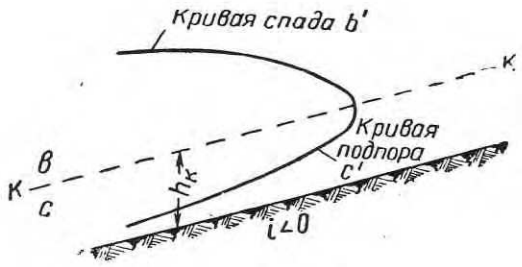
Зона *a* отсутствует, так как $h_0 = \infty$.

Зона *b*. $h > h_к$. Имеем выпуклую кривую спада b_0 (фиг. 2—53).

Зона *c*. $h < h_к$. Имеем вогнутую кривую подпора типа c_0 (фиг. 2—53), которая кончается прыжком. Кривые b_0 и c_0 встречаются в тех же условиях, что и кривые b_I и c_I.



Фиг. 2—53



Фиг. 2—54

3. Водотоки с обратным уклоном дна ($i<0$)

В этом случае имеем:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{[i] + \dfrac{Q^2}{K^2}}{\dfrac{\alpha v^2}{gh} - 1}, \qquad (2-60)$$

где $[i]$ — абсолютная величина обратного уклона.

Зона *a* — отсутствует, так как нормальной глубины нет.

Зона *b*. $h > h_к$. Имеем выпуклую кривую спада типа b' (фиг. 2—54), которая заканчивается прыжком.

Зона *c*. $h < h_к$; $\dfrac{\alpha v^2}{gh} > 1$, следовательно: $\dfrac{dh}{dl} > 0$, при $h = h_к$

$$\frac{dh}{dl} \to \infty$$

и кривая заканчивается прыжком. Имеем вогнутую кривую подпора типа c' (фиг. 2—54). Кривые b' и c' встречаются в тех же случаях, что и кривые b_I и c_I.

2—22. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИЗМАТИЧЕСКОМ РУСЛЕ ПРИ $i > 0$

Способ относительных расходных характеристик (Н. Н. Павловского)

Расстояние l между сечениями с глубинами h_1 и h_2 определяется уравнением:

$$l = \frac{1}{ai}\left\{\varkappa_2 - \varkappa_1 - (1 - \bar{j})\ [\Pi(\varkappa_2) - \Pi(\varkappa_1)]\right\}, \qquad (2-61)$$

где $\varkappa_2 = \dfrac{K_2}{K_0}$ и $\varkappa_1 = \dfrac{K_1}{K_0}$ — относительные расходные характеристики;

K_2, K_1 и K_0 — расходные характеристики русла соответственно при глубинах неравномерного движения h_2 и h_1 и нормальной глубине h_0 (см. п. 2—17);

$$\bar{j} = \frac{\alpha i \bar{C}^2 \bar{B}}{g \bar{\chi}}; \qquad (2-62)$$

$\overline{C}$, $\overline{B}$ и $\overline{\chi}$ — соответственно коэффициент Шези, ширина потока поверху и смоченный периметр, средние для рассматриваемого участка.

При выводе уравнения (2—61) величину $\frac{d\varkappa}{dh}$ Н. Н. Павловский заменил некоторым постоянным средним значением ее в пределах рассматриваемого участка, обозначив ее через a. Таким образом:

$$a = \frac{d\varkappa}{dh} = \frac{\varkappa_2 - \varkappa_1}{h_2 - h_1} = \frac{K_2 - K_1}{K_0(h_2 - h_1)}. \qquad (2-63)$$

При $\varkappa > 1$

$$\Pi(\varkappa) = 1{,}151 \lg \frac{\varkappa + 1}{\varkappa - 1}; \qquad (2-64)$$

при $\varkappa < 1$

$$\Pi(\varkappa) = 1{,}151 \lg \frac{\varkappa + 1}{1 - \varkappa}. \qquad (2-65)$$

Значения $\Pi(\varkappa)$ приведены в табл. 2—31.

При решении практических задач следует иметь в виду, что в случае подпора в водотоках малого уклона можно принимать для величины a среднее ее значение в пределах всей подпорной кривой.

В случае же спада, особенно в наиболее крутой части кривой спада, а также в водотоках большого уклона ($i > i_к$) для получения большей точности уравнение (2—61) следует применять по участкам и для каждого из них находить соответствующее среднее значение величины a.

Большим преимуществом способа Н. Н. Павловского является то, что для решения задач на построение кривых подпора и спада требуется всего лишь одна таблица независимо от формы русла вместо 7—10 таблиц, требующихся при решении задачи по весьма распространенному способу показательной зависимости расходной характеристики (способ Бахметева).

Типы задач на построение кривых подпора ($\varkappa > 1$) и спада ($\varkappa < 1$)

I тип. Даны: расход Q, форма сечения, уклон i, шероховатость канала n и глубины h_1 и h_2 в сечениях *1* и *2*. Требуется определить расстояние l между сечениями.

Вычисляют таблицу значений ω, χ, R, $\sqrt{R}$ и K (см. п. 2—17), находят нормальную глубину h_0 и расходную характеристику K_0.

Далее по значениям h_1 и h_2 вычисляют $\overline{\chi}$, $\overline{B}$, $\overline{C}$ и $\overline{j}$ — средние для всего участка, а по формуле (2—63) — величину a, после чего находят l по уравнению (2—61).

II тип. Даны: расход Q, форма сечения, уклон i, шероховатость канала n и конечная глубина h_2. Требуется построить кривую подпора или спада.

Решение проводится аналогично решению задачи предыдущего типа, но только задаются несколькими значениями глубин h_1, вычисляют соответственные значения K_1; $\varkappa_1$ и $\Pi(\varkappa_1)$ и определяют l по уравнению (2—61), которому можно придать вид:

$$l = \frac{\varkappa_2 - (1 - \overline{j})\Pi(\varkappa_2)}{ai} - \frac{\varkappa_1}{ai} + \frac{(1 - \overline{j})}{ai}\Pi(\varkappa_1) \qquad (2-66)$$

или

$$l = l_1 - A\varkappa_1 + B\Pi(\varkappa_1), \qquad (2-67)$$

где

$$l_1 = \frac{\varkappa_2 - (1 - \overline{j})\Pi(\varkappa_2)}{ai};$$

$$A = \frac{1}{ai};$$

$$B = \frac{1 - \overline{j}}{ai}.$$

Вычисления сводят в таблицу по следующей форме:

h_1	K_1	$\varkappa_1 = \frac{K_1}{K_0}$	$\Pi(\varkappa_1)$	$A\varkappa_1$	$B\Pi(\varkappa_1)$	l

Конец кривой подпора принимают при значении $\varkappa_1 = 1{,}01$ или $1{,}005$, конец кривой спада — при значении $\varkappa_1 = 0{,}99$ или $0{,}995$.

III тип. Даны: расход Q, форма сечения, уклон i, шероховатость канала n, конечная глубина h_2 и расстояние l до неизвестной глубины h_1, которую и надо определить.

Вычисляя a и $\overline{j}$ по глубинам h_2 и h_0, приходят к уравнению (2—67):

$$l = l_1 - A\varkappa_1 + B\Pi(\varkappa_1),$$

которое решается подбором. По найденному значению $\varkappa_1$ и K_1, по кривой $K = f(h)$ (см. фиг. 2—42) находят искомое значение h_1.

Пример. Задан канал трапецоидального сечения с расходом $Q_0 = 40$ *м³/сек* и уклоном $i = 0{,}0003$, $b = 10$ *м*, $m = 1{,}5$, $n = 0{,}025$. Плотина создает в канале глубину $h = 4$ *м*. Требуется построить кривую подпора.

Решение. Задаваясь глубинами $h = 1$; 2; 3; 3,5 и 4 *м*, вычисляем последовательно расходные характеристики, сводя вычисления в табл. 2—32. → (*стр. 79*)

Расходу $Q_0 = 40$ *м³/сек* будет соответствовать характеристика:

$$K_0 = \frac{Q_0}{\sqrt{i}} = \frac{40}{\sqrt{0{,}0003}} = 2\,320 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Построив график $K = f(h)$ (фиг. 2—55,*а*), проведя подбор по табл. 2—32 или применив способ единичных расходных характеристик (см. п. 2—18), находим нормальную глубину $h_0 = 2{,}66$ *м*. Находим критическую глубину сечения по графику П. Г. Киселева (см. п. 2—19):

$$q_м = \frac{Q}{b^2\sqrt{b}} = \frac{40}{10^2\sqrt{10}} = \frac{40}{316} = 0{,}127.$$

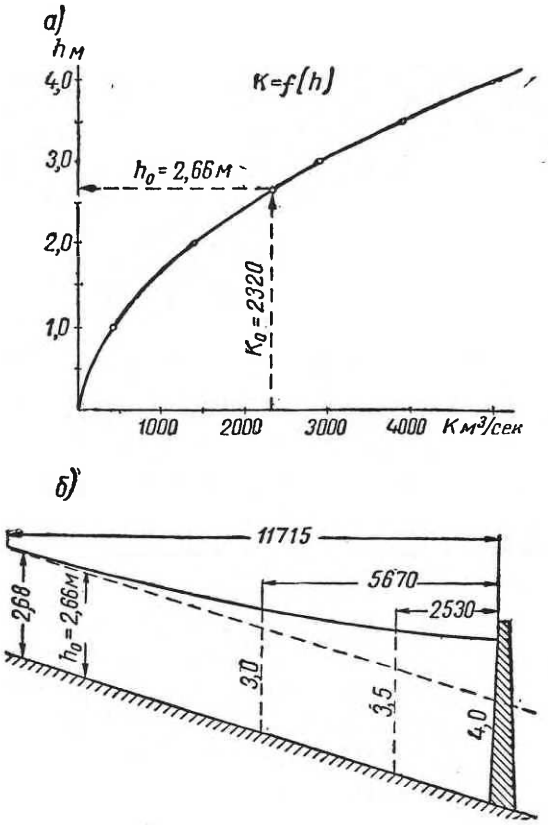
По графику для $m = 1{,}5$ находим $h_{к.м} = 0{,}11$ *м*, откуда $h_к = bh_{к.м} = 10 \cdot 0{,}11 = 1{,}1$ *м*. Так как $h_0 > h_к$, будем иметь вогнутую кривую подпора типа a_1.

Таблица 2—31

Значения функции $\Pi(x)$ к способу Павловского при $i > 0$

x	$\Pi(x)$	Δ*	x	$\Pi(x)$	Δ*	x	$\Pi(x)$	Δ*	x	$\Pi(x)$	Δ*
0,001	0,0010		0,955	1,8858		1,0015	3,5981		1,35	0,9521	
		0,0090			0,0601			0,1437			0,0562
0,01	0,0100		0,96	1,9459		1,0020	3,4544		1,40	0,8959	
		0,0407			0,0681			0,1116			0,0486
0,05	0,0507		0,965	2,0140		1,0025	3,3428		1,45	0,8473	
		0,0496			0,0783			0,0909			0,0426
0,10	0,1003		0,97	2,0923		1,0030	3,2519		1,50	0,8047	
		0,0508			0,0924			0,1436			0,0715
0,15	0,1511		0,975	2,1847		1,004	3,1083		1,60	0,7332	
		0,0516			0,1129			0,1113			0,0582
0,20	0,2027		0,98	2,2976		1,005	2,9970		1,70	0,6750	
		0,0527			0,0532			0,0909			0,0486
0,25	0,2554		0,982	2,3508		1,006	2,9061		1,80	0,6264	
		0,0541			0,0593			0,0868			0,0414
0,30	0,3095		0,984	2,4101		1,007	2,8293		1,90	0,5850	
		0,0559			0,0673			0,0666			0,0357
0,35	0,3654		0,986	2,4774		1,008	2,7627		2,00	0,5493	
		0,0583			0,0776			0,0585			0,0589
0,40	0,4237		0,988	2,5550		1,009	2,7041		2,2	0,4904	
		0,0610			0,0917			0,0524			0,0467
0,45	0,4847		0,990	2,6467		1,010	2,6517		2,4	0,4437	
		0,0646			0,0529			0,2015			0,0382
0,50	0,5493		0,991	2,6996		1,015	2,4502		2,6	0,4055	
		0,0691			0,0591			0,1426			0,0319
0,55	0,6184		0,992	2,7587		1,020	2,3076		2,8	0,3736	
		0,0748			0,0671			0,1104			0,0270
0,60	0,6932		0,993	2,8258		1,025	2,1972		3,0	0,3466	
		0,0821			0,0773			0,0899			0,0527
0,65	0,7753		0,994	2,9031		1,030	2,1073		3,5	0,2939	
		0,0920			0,0914			0,0758			0,0385
0,70	0,8673		0,995	2,9945		1,035	2,0315		4,0	0,2554	
		0,1057			0,1118			0,0656			0,0294
0,75	0,9730		0,996	3,1063		1,040	1,9659		4,5	0,2260	
		0,1256			0,1441			0,0576			0,0233
0,80	1,0986		0,997	3,2504		1,045	1,9083		5,0	0,2027	
		0,0582			0,0913			0,0515			0,0345
0,82	1,1568		0,9975	3,3417		1,050	1,8568		6,0	0,1682	
		0,0644			0,1117			0,0887			0,0244
0,84	1,2212		0,998	3,4534		1,06	1,7681		7,0	0,1438	
		0,0721			0,1440			0,0747			0,0181
0,86	1,2933		0,9985	3,5974		1,07	1,6934		8,0	0,1257	
		0,0825			0,2028			0,0643			0,0141
0,88	1,3758		0,999	3,8002		1,08	1,6291		9,0	0,1116	
		0,0964			0,3467			0,0565			0,0113
0,90	1,4722		0,9995	4,1469		1,09	1,5726		10,0	0,1003	
		0,0553			∞			0,0503			0,0335
0,91	1,5275		1,0000	∞		1,10	1,5223		15,0	0,0668	
		0,0615						0,2010			0,0268
0,92	1,5890				∞	1,15	1,3213		25,0	0,0400	
		0,0694	1,0005	4,1471				0,1223			0,0200
0,93	1,6584				0,3464	1,20	1,1990		50,0	0,0200	
		0,0797	1,0010	3,8007				0,1004			0,0100
0,94	1,7381				0,2026	1,25	1,0986		100,0	0,0100	
		0,0937						0,0801			
0,95	1,8318					1,30	1,0185				
		0,0540						0,0664			

*Δ—разница двух смежных значений $\Pi(x)$.



Фиг. 2—55. Построение кривой подпора по способу Н. Н. Павловского

а — график $K=f(h)$; *б* — схема кривой подпора

Таблица 2—32

Вычисления к построению графика $K=f(h)$

h	ω	χ	R	$\sqrt{R}$	C	K
1,0	11,5	13,6	0,845	0,92	38,37	406
2,0	26,0	17,2	1,51	1,23	43,25	1 383
3,0	43,5	20,8	2,09	1,447	46,0	2 894
3,5	53,4	22,7	2,36	1,54	47,08	3 880
4,0	64,0	24,4	2,62	1,62	48,07	4 985
2,66	37,2	19,6	1,90	1,38	45,2	2 320
2,68	37,6	19,6	1,91	1,383	45,24	2 352

Вычисляем:

$$a=\frac{K_2-K_1}{K_0(h_2-h_1)}=\frac{4\,985-2\,320}{2\,320(4-2{,}66)}=0{,}857,$$

находим:

$$h_{ср}=\frac{4+2{,}66}{2}=3{,}33\ м;$$

$\overline{\omega}=50\ м^2$; $\overline{\chi}=22{,}02\ м$; $\overline{B}=20\ м$; $\overline{R}=\frac{\overline{\omega}}{\overline{\chi}}=2{,}27\ м$

и $\overline{C}$=46,72 *м* (по табл. 2—18);

$$\overline{j}=\frac{a\,i\,\overline{C}^2}{g}\cdot\frac{\overline{B}}{\overline{\chi}}=\frac{1{,}1\cdot0{,}0003\cdot46{,}72^2}{9{,}81}\times\frac{20}{22{,}02}=0{,}067.$$

$$1-\overline{j}=1-0{,}067=0{,}933.$$

Вычисляем

$$\varkappa_2=\frac{K_2}{K_0}=\frac{4\,985}{2\,320}=2{,}148.$$

По табл. 2—30 $П(\varkappa_2)$=0,5057.
По уравнению (2—66)

$$l=\frac{\varkappa_2-(1-\overline{j})\,П(\varkappa_2)}{ai}-\frac{\varkappa_1}{ai}+\frac{1-\overline{j}}{ai}\,П(\varkappa_1)=$$

$$=\frac{(2{,}148-0{,}933\cdot0{,}506)}{0{,}857\cdot0{,}0003}-\frac{\varkappa_1}{0{,}857\cdot0{,}0003}+$$

$$+\frac{0{,}933\,П(\varkappa_1)}{0{,}857\cdot0{,}0003}=6\,510-3\,890\,\varkappa_1+3\,630\,П(\varkappa_1).$$

Вычисления сводим в табл. 2—33; последнее значение, соответствующее концу кривой подпора, принимаем для глубины h_1=2,68 *м*.

Таблица 2—33

Вычисления к построению кривой подпора

h_1	K_1	$\varkappa_1=\frac{K}{2\,320}$	$П(\varkappa_1)$	$3\,890\,\varkappa_1$	$3\,630\,П(\varkappa_1)$	l в *м*
4,0	4 985	2,148	0,5057	8 350	1 840	0
3,5	3 880	1,672	0,6913	6 510	2 530	2 530
3,0	2 894	1,247	1,1045	4 850	4 010	5 670
2,68	2 352	1,013	2,531	3 945	9 150	11 715

По данным табл. 2—33 строим кривую подпора (фиг. 2—55,*б*).

2—23. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ДНОМ (i=0)

Расстояние l между сечениями *1* и *2* с глубинами h_1 и h_2 определяют по уравнению:

$$l=\frac{1}{a_к\,i_к}\left\{\overline{j}_к\left(\varkappa_{к,2}-\varkappa_{к,1}\right)-\left[П\left(\varkappa_{к,2}\right)-П\left(\varkappa_{к,1}\right)\right]\right\},\qquad(2-68)$$

где $\varkappa_{к,2}=\frac{K_2}{K_к}$ и $\varkappa_{к,1}=\frac{K_1}{K_к}$ — относительные расходные характеристики;

$K_к$ — расходная характеристика русла при критической глубине;

K_2 и K_1 — расходные характеристики русла при глубинах h_2 и h_1;

$i_к$ — критический уклон;

$a_к$ — постоянное среднее значение $\frac{d\varkappa_к}{dh}$ в пределах рассматриваемого участка:

Таблица 2—34

Значения функции $\Pi(\varkappa_к) = \varkappa_к - \frac{1}{3}\varkappa^3_к$ к способу Павловского при $i = 0$

$\varkappa_к$	$\Pi(\varkappa_к)$	Δ*	$\varkappa_к$	$\Pi(\varkappa_к)$	Δ*	$\varkappa_к$	$\Pi(\varkappa_к)$	Δ*	$\varkappa_к$	$\Pi(\varkappa_к)$	Δ*
0,01	0,0100		0,60	0,5280		1,65	0,1526		2,60	−3,2587	
		0,0100			0,0305			0,0903			0,2945
0,02	0,0200		0,65	0,5585		1,70	0,0623		2,65	−3,5532	
		0,0100			0,0272			0,0190			0,3078
0,03	0,0300		0,70	0,5857		1,71	0,0433		2,70	−3,8610	
		0,0100			0,0237			0,0194			0,3213
0,04	0,0400		0,75	0,6094		1,72	0,0239		2,75	−4,1823	
		0,0100			0,0199			0,0198			0,3350
0,05	0,0500		0,80	0,6293		1,73	0,0041		2,80	−4,5173	
		0,0099			0,0160			0,0201			0,3491
0,06	0,0599		0,85	0,6453		1,74	−0,0160		2,85	−4,8664	
		0,0100			0,0117			0,0205			0,3633
0,07	0,0699		0,90	0,6570		1,75	−0,0365		2,90	−5,2297	
		0,0099			0,0072			0,1075			0,3778
0,08	0,0798		0,95	0,6642		1,80	−0,1440		2,95	−5,6075	
		0,0100			0,0026			0,1165			0,3925
0,09	0,0898		0,99	0,6666		1,85	−0,2605		3,00	−6,0000	
		0,0099			0,0001			0,1258			4,7917
0,10	0,0997		1,00	0,6667		1,90	−0,3863		3,5	−10,7917	
		0,0197			0,0001			0,1353			6,5416
0,12	0,1194		1,01	0,6666		1,95	−0,5216		4,0	−17,3333	
		0,0196			0,0025			0,1451			8,4417
0,14	0,1391		1,05	0,6641		2,00	−0,6667		4,5	−25,7750	
		0,0195			0,0078			0,1550			10,8917
0,16	0,1586		1,10	0,6563		2,05	−0,8217		5,0	−36,6667	
		0,0195			0,0133			0,1653			13,2917
0,18	0,1781		1,15	0,6430		2,10	−0,9870		5,5	−49,9583	
		0,0192			0,0190			0,1758			16,0417
0,20	0,1973		1,20	0,6240		2,15	−1,1628		6,0	−66,0000	
		0,0192			0,0250			0,1865			19,0417
0,22	0,2165		1,25	0,5990		2,20	−1,3493		6,5	−85,0417	
		0,0189			0,0313			0,1976			22,2917
0,24	0,2354		1,30	0,5677		2,25	−1,5469		7,0	−107,3333	
		0,0556			0,0378			0,2088			25,7917
0,30	0,2910		1,35	0,5299		2,30	−1,7557		7,5	−133,1250	
		0,0447			0,0446			0,2203			29,5417
0,35	0,3357		1,40	0,4853		2,35	−1,9760		8,0	−162,6667	
		0,0430			0,0515			0,2320			33,5417
0,40	0,3787		1,45	0,4338		2,40	−2,2080		8,5	−196,2083	
		0,0409			0,0588			0,2440			37,7917
0,45	0,4196		1,50	0,3750		2,45	−2,4520		9,0	−234,0000	
		0,0387			0,0663			0,2563			42,2917
0,50	0,4583		1,55	0,3037		2,50	−2,7083		9,5	−276,2917	
		0,0362			0,0740			0,2688			47,0417
0,55	0,4945		1,60	0,2347		2,55	−2,9771		10,0	−323,3333	
		0,0335			0,0821			0,2816			

*Δ—разность двух смежных значений $\Pi(\varkappa_к)$.

$$a_к = \frac{\varkappa_{к,2} - \varkappa_{к,1}}{h_2 - h_1}; \qquad (2—69)$$

$$\overline{j}_к = \frac{\alpha i_к \overline{C}^2 \overline{B}}{g \overline{\chi}}; \qquad (2—70)$$

$\overline{C}$, $\overline{B}$ и $\overline{\chi}$ — соответственно коэффициент Шези, ширина потока поверху и смоченный периметр, средние для рассматриваемого участка;

$$\Pi(\varkappa_к) = \frac{1}{3}\varkappa^3_к; \qquad (2—71)$$

значения $\Pi(\varkappa_к)$ даны в табл. 2—34.

Таблица 2—35

Значения функции $\Pi(x') = \operatorname{arctg} x'$ к способу Павловского при $i<0$

x'	$\Pi(x')$	Δ*	x'	$\Pi(x')$	Δ*	x'	$\Pi(x')$	Δ*	x'	$\Pi(x')$	Δ*
0,01	0,0100		0,90	0,7328		2,6	1,2036		5,5	1,3909	
		0,0400			0,0270			0,0125			0,0148
0,05	0,0500		0,95	0,7598		2,7	1,2161		6,0	1,4057	
		0,0500			0,0256			0,0117			0,0124
0,10	0,1000		1,00	0,7854		2,8	1,2278		6,5	1,4181	
		0,0489			0,0476			0,0110			0,0103
0,15	0,1489		1,10	0,8330		2,9	1,2388		7,0	1,4289	
		0,0485			0,0431			0,0103			0,0094
0,20	0,1974		1,2	0,8761		3,0	1,2491		7,5	1,4383	
		0,0476			0,0390			0,0097			0,0082
0,25	0,2450		1,3	0,9151		3,1	1,2588		8,0	1,4465	
		0,0465			0,0354			0,0091			0,0072
0,30	0,2915		1,4	0,9505		3,2	1,2679		8,5	1,4537	
		0,0452			0,0323			0,0086			0,0065
0,35	0,3367		1,5	0,9828		3,3	1,2765		9,0	1,4602	
		0,0438			0,0294			0,0082			0,0057
0,40	0,3805		1,6	1,0122		3,4	1,2847		9,5	1,4659	
		0,0424			0,0269			0,0078			0,0052
0,45	0,4229		1,7	1,0391		3,5	1,2925		10,0	1,4711	
		0,0407			0,0246			0,0073			0,0331
0,50	0,4636		1,8	1,0637		3,6	1,2998		15,0	1,5042	
		0,0392			0,0226			0,0070			0,0167
0,55	0,5028		1,9	1,0863		3,7	1,3068		20,0	1,5209	
		0,0376			0,0209			0,0067			0,0099
0,60	0,5404		2,0	1,1072		3,8	1,3135		25,0	1,5308	
		0,0360			0,0192			0,0063			0,0067
0,65	0,5764		2,1	1,1264		3,9	1,3198		30,0	1,5375	
		0,0343			0,0177			0,0060			0,0133
0,70	0,6107		2,2	1,1441		4,0	1,3258		50,0	1,5508	
		0,0328			0,0165			0,0139			0,0100
0,75	0,6435		2,3	1,1606		4,25	1,3397		100,0	1,5603	
		0,0313			0,0154			0,0124			0,0050
0,80	0,6748		2,4	1,1760		4,5	1,3521		200,0	1,5658	
		0,0297			0,0143			0,0213			0,0050
0,85	0,7045		2,5	1,1903		5,0	1,3734		∞	1,5708	
		0,0283			0,0133			0,0175			

*Δ — разность двух смежных значений $\Pi(x')$.

2—24. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ С ОБРАТНЫМ УКЛОНОМ ДНА ($i<0$)

Расстояние l между сечениями *1* и *2* с глубинами h_1 и h_2 определяют по уравнению:

$$l = \frac{1}{a' i}\left\{-\left(x'_2 - x'_1\right) + \left(1 - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \overline{j}\right)\left[\Pi\left(x'_2\right) - \Pi\left(x'_1\right)\right]\right\}, \qquad (2\text{—}72)$$

где i — абсолютная величина уклона;

$x'_2 = \frac{K_2}{K'_0}$ и $x'_1 = \frac{K_1}{K'_0}$ — относительные расходные характеристики;

K_2 и K_1 — расходные характеристики при глубинах h_2 и h_1;

K'_0 — расходная характеристика при нормальной глубине h'_0, которая была бы при таком же прямом уклоне дна русла;

$a' = \frac{dx'}{dh}$ — постоянная средняя для рассматриваемого участка величина, определяемая по формуле:

$$a' = \frac{x'_2 - x'_1}{h_2 - h_1}; \qquad (2\text{—}73)$$

$$\Pi(x') = \operatorname{arctg} x'. \qquad (2\text{—}74)$$

Значения функции $\Pi(x')$ приведены в табл. 2—35.

$$\overline{I} = \frac{\alpha i \overline{C}^2 \overline{B}}{g \overline{\chi}}; \qquad (2-75)$$

$\overline{C}, \overline{B}$ и $\overline{\chi}$ — соответственно коэффициент Шези, ширина потока поверху и смоченный периметр, средние для рассматриваемого участка.

2—25. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В НЕПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ ПУТЕМ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СУММИРОВАНИЯ (способ проф. В. И. Чарномского)[1]

По этому способу расстояние между двумя створами (фиг. 2—56) определяется формулой:

$$\delta l = \frac{\delta \mathcal{Э}}{i - i_f}, \qquad (2-76)$$

где

$\delta \mathcal{Э} = \left(h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g}\right) - \left(h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g}\right)$ — разность удельных энергий сечения в этих створах;

h_2 и h_1, v_2 и v_1 — глубина и средняя скорость соответственно в створах *1* и *2*;

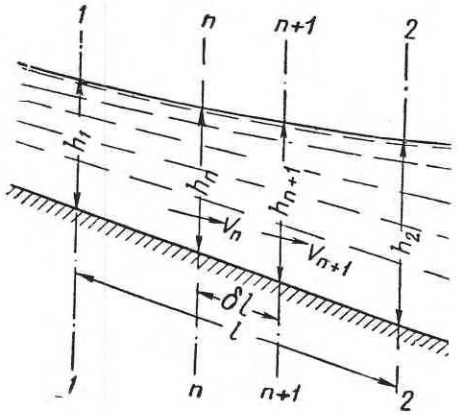
i — уклон дна;

i_f — уклон трения, который можно определять по выражению:

$$i_f = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2 \overline{R}} = \frac{Q^2}{\overline{\omega}^2 \overline{C}^2 \overline{R}};$$

$\overline{v}, \overline{\omega}$, $\overline{C}$ и $\overline{R}$ — гидравлические элементы потока, средние для участка между рассматриваемыми створами.

Створы следует брать достаточно близко друг от друга, причем характер русла между ними должен быть однообразным.



Фиг. 2—56

[1] Способ проф. В. И. Чарномского был опубликован в 1914 г. и неправильно назывался в литературе способом Хестеда, который был опубликован только в 1924 г. [22].

Если заданный поток разграничить по длине на ряд участков, то к каждому из них можно применить уравнение (2—76). Суммируя длины δl_1, δl_2 и т. д. отдельных участков, получают искомое расстояние l:

$$l = \sum_{k=1}^{m} \frac{\delta \mathcal{Э}_к}{i - i_f}. \qquad (2-77)$$

Последнее уравнение может служить для построения кривой свободной поверхности потока и в призматических руслах с незначительным ($\alpha \leqslant 10°$) расширением.

Если водоток имеет горизонтальное дно ($i=0$), то уравнение примет такой вид:

$$\delta l = -\frac{\delta \mathcal{Э}}{i_f};$$

при обратном уклоне дна ($i<0$)

$$\delta l = -\frac{\delta \mathcal{Э}}{[i] + i_f}.$$

Применение полученных выше зависимостей для построения кривой свободной поверхности в призматических руслах сводится к следующему.

Имея заданными Q, i и глубину h_n, задаются глубиной h_{n+1} и определяют гидравлические элементы в сечениях n и $n+1$. Затем находят $\delta \mathcal{Э}$, i_f и, наконец, δl.

Переходя, таким образом, от одного участка к другому, можно получить данные для построения всей кривой свободной поверхности от сечения *1—1* до сечения *2—2*. Чем больше будет принято отдельных участков, т. е. чем с меньшим интервалом будут взяты глубины потока, тем точнее будут окончательные результаты.

В случае непризматического русла уравнение (2—76) удобнее переписать в виде:

$$\mathcal{Э}_{n+1} = \mathcal{Э}_n + \left(i - \overline{i_f}\right) \delta l,$$

где $\mathcal{Э}_n$ и $\mathcal{Э}_{n+1}$ — удельная энергия в сечениях n и $n+1$.

Последнее уравнение приходится решать путем последовательного приближения следующим образом.

При известных Q, i и h_n определяют $\mathcal{Э}_n$. Задавшись δl и h_{n+1} находят $\mathcal{Э}'_{n+1}$. По вышеприведенным формулам вычисляют $\mathcal{Э}''_{n+1}$. Решением задачи будут те значения δl и h_{n+1}, при которых $\mathcal{Э}'_{n+1} = \mathcal{Э}''_{n+1}$.

2—26. ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ В НЕПРИЗМАТИЧЕСКОМ РУСЛЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ГЛУБИНЕ ПОТОКА

При решении некоторых задач инженерной гидравлики требуется найти закон изменения живых сечений по длине потока, при котором глубина потока не изменялась бы по его длине.

В этом случае основное дифференциальное уравнение неравномерного движения упрощается и может быть приведено к виду:

$$dl = \frac{\alpha}{g} \varphi(\omega)\, d\omega;$$

где

$$\varphi(\omega) = \frac{C^2}{\chi(1 - \varkappa^2)};$$

$\varkappa = \frac{K}{K'}$ — относительная расходная характеристика;

$$K' = \frac{Q}{\sqrt{i}}.$$

Интегрирование приведенного выше дифференциального уравнения проводят приближенным способом.

1. Водоток с прямым уклоном дна ($i>0$)

В этом случае вышеприведенное дифференциальное уравнение может быть проинтегрировано по способу суммирования, предложенному проф. Леви И. И.:

$$l = \frac{\alpha}{g}\int_0^L \varphi(\omega)\, d\omega. \qquad (2—78)$$

Уравнение (2—78) при вычислении интеграла по способу трапеций будет иметь вид:

$$\delta l = \frac{\alpha}{2g}[\varphi(\omega_{n+1}) + \varphi(\omega_n)]\,\delta\omega, \qquad (2—79)$$

где ω_n и ω_{n+1} — площади двух близких живых сечений потока n и $n+1$, расстояние между которыми равно δl;

$\varphi(\omega_{n+1})$ и $\varphi(\omega_n)$ — соответствующие значения функции $\varphi(\omega)$

$$\delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n.$$

Если водоток разбит на m отдельных участков длиной δl_1, δl_2 и т. д., то расстояние между двумя сечениями *1—1* и *2—2* определится так:

$$l = \frac{\alpha}{2g}\sum_{n=1}^{m}[\varphi(\omega_{n+1}) + \varphi(\omega_n)]\,\delta\omega. \qquad (2—80)$$

2. Водоток с горизонтальным дном ($i=0$)

В этом случае δl и l определяются по вышеприведенным формулам, в которых

$$\varphi(\omega) = \frac{C^2 R}{\omega}.$$

3. Водоток с обратным уклоном дна ($i<0$)

Расчетные формулы для δl те же,

$$\varphi(\omega) = \frac{C^2}{\chi(1+\varkappa'^2)} = \frac{C^2 R}{\omega(1+\varkappa'^2)}.$$

2—27. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОТОКАХ

Методы построения кривых свободной поверхности в естественных водотоках, которые нашли себе применение в гидротехнической практике, могут быть сведены к двум основным методам: первый — метод непосредственного применения уравнения Бернулли, второй — метод приведения естественного русла к некоторому фиктивному призматическому руслу с однородным уклоном дна.

Первый метод построения кривых свободной поверхности для естественных водотоков применяется в инженерной практике наиболее часто; второй метод построения в настоящее время не применяется и поэтому здесь не излагается.

1. Способ непосредственного суммирования

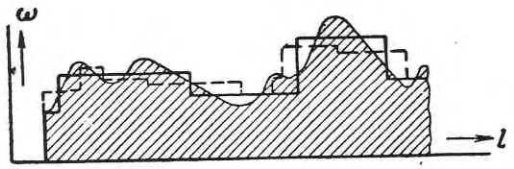
Для применения первого метода водоток разбивают на участки таким образом, чтобы каждый участок имел однообразный уклон свободной поверхности и относительно постоянное живое сечение как по величине, так и по форме (фиг. 2—57). Если наблюденных естественных продольных профилей свободной поверхности нет, то при разбивке руководствуются лишь данными о живых сечениях водотока.

Разбивка водотока по длине на участки производится так, чтобы падение свободной поверхности на участки не превышало 0,5—0,75 *м*.

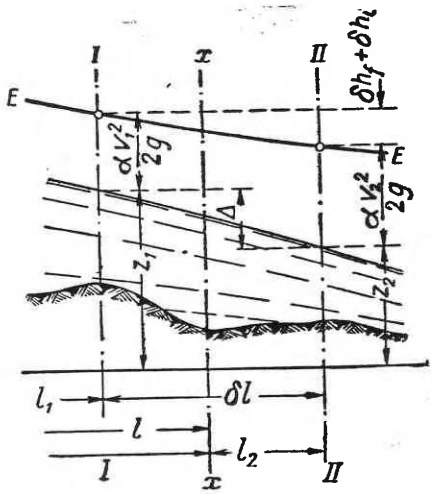
Если естественный водоток имеет притоки, то разбивку водотока на отдельные участки нужно делать так, чтобы расход в пределах каждого участка был постоянен.

Разность уровней в сечениях по концам участка (фиг. 2—58) определяется формулой:

$$\Delta = Q^2\left[\frac{\alpha}{2g}(1+\zeta)\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) + \frac{l}{\overline{K}^2}\right], \qquad (2—81)$$



Фиг. 2—57



Фиг. 2—58

где ζ — коэффициент местного сопротивления, принимаемый для расширяющихся участков равным 0,5; для суживающихся участков $\zeta=0$;

$\overline{K}$ — средняя расходная характеристика русла на участке;

ω_1 и ω_2 — площади живых сечений соответственно в начале и в конце участка;

l — длина участка;

Q — расчетный расход.

Обозначив $\frac{\alpha}{2g}(1+\zeta)=\xi$, уравнению (2—81) можно придать вид:

$$z_1 - Q^2\left(\frac{l}{\overline{K}^2} - \frac{\xi^2}{\omega_1^2}\right) = z_2 + \frac{\xi Q^2}{\omega_2^2}. \quad (2—82)$$

Правая часть уравнения здесь известна; это уравнение решается подбором или графически.

2. Способ постулата неизменяемости модуля сопротивления

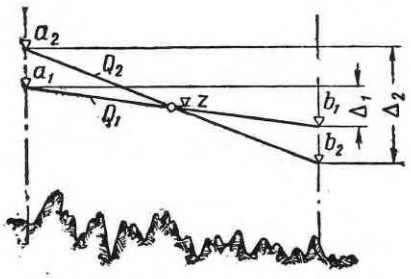
Если при построении кривых свободной поверхности пренебречь изменением скоростного напора, то из (2—81) получим

$$\Delta = Q^2 \frac{l}{K^2}.$$

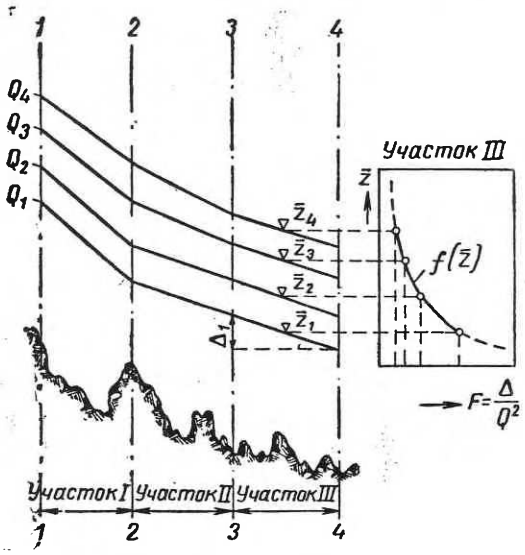
Отношение $\frac{\Delta}{Q^2} = F$ акад. Павловским названо модулем сопротивления. Тогда $\Delta = FQ^2$.

При однообразном живом сечении потока на длине данного участка водотока и небольших падениях свободной поверхности на участке как в естественном, так и подпертом состоянии водотока (что обычно соблюдается в равнинных реках) модуль сопротивления F практически не зависит от уклона свободной поверхности и может быть выражен как функция только средней отметки $\overline{z}$ уровня воды на участке, т. е. $F=f(\overline{z})$, где $\overline{z} = \frac{1}{2}(z_1+z_2)$. В этом и заключается постулат неизменяемости модуля сопротивления.

Пусть на данном участке водотока при расходе Q_1 кривая свободной поверхности занимает положение a_1b_1 (фиг. 2—59) и имеет падение Δ_1, а при расходе Q_2 положение a_2b_2 при падении Δ_2, причем в обоих случаях средняя отметка $z_{ср}$ уровня воды на участке остается неизменной. В этом случае величины



Фиг. 2—59



Фиг. 2—60

$\frac{\Delta_1}{Q_1^2}$ и $\frac{\Delta_2}{Q_2^2}$ согласно вышеизложенному постулату должны быть одинаковыми.

Для построения кривых свободной поверхности естественных водотоков необходимо предварительно построить графики функции $F=f(\overline{z})$ для каждого из участков по длине водотока, непосредственно используя гидрометрические данные или, если их нет или недостаточно, при помощи расчетов.

Если на основе данных гидрометрических наблюдений на водомерных постах *1, 2, 3* и *4* (фиг. 2—60) будет построен ряд продольных профилей потока, соответствующих расходам Q_1, Q_2, Q_3 и т. д., то при помощи таких профилей нетрудно построить графики $F=f(\overline{z})$ для каждого участка водотока.

Действительно, например, для участка *III* (фиг. 2—60) по данным профилей можно найти отметки z и падения Δ для каждого из рассматриваемых расходов, причем

$$F_1 = \frac{\Delta_1}{Q_1^2}; \quad F_2 = \frac{\Delta_2}{Q_2^2} \text{ и т. д.}$$

По этим данным строят график функции $F=f(\overline{z})$ для участка *III* и аналогично для других участков.

В этом случае важно возможно точнее установить расчетное значение коэффициента шероховатости для рассматриваемого участка. Модуль сопротивления определяют по выражению $F=\frac{l}{K^2}$, которым и пользуются для построения графика функции $F=f(\overline{z})$.

Имея данные о гидравлических элементах в начальном и конечном створах данного участка и зная коэффициент шероховатости, находят среднее значение $\overline{K}$, отвечающее значению средней отметки $\overline{z}$ уровня воды. Задавшись рядом произвольных значений средней отметки $\overline{z}$ и высчитав соответствующие значения модуля сопротивления F, получают данные для построения графика функции $F=f(\overline{z})$.

Из изложенных выше двух приемов построения графика функции $F=f(\bar{z})$ более точным является первый, основанный на использовании гидрометрических данных.

На применении постулата неизменяемости основаны также способ построения кривых свободной поверхности проф. А. Н. Рахманова, способ опорных кривых инж. Н. М. Бернадского и графо-аналитический способ акад. Н. Н. Павловского [22].

3. Способ проф. А. Н. Рахманова

Пусть имеются графики $F=f(\bar{z})$, построенные для всех участков рассматриваемого водотока, известен расход Q и отметка $\bar{z}_к$ в крайнем створе последнего участка. Задаются значением средней отметки $\bar{z}$ уровня воды на последнем участке и по графику $F=f(\bar{z})$ находят F и $\Delta=FQ^2$. При этом средняя отметка на данном участке $\bar{z}=\bar{z}_2+\frac{\Delta}{2}$. Если полученное значение средней отметки совпадает с первоначально принятым значением $\bar{z}$, то Δ определено правильно; при расхождении задаются новым значением $\bar{z}$, берут по графику F и вычисляют Δ и расчетное $\bar{z}$, пока принятое и вычисленное $\bar{z}$ не совпадут.

Тогда уровень в начале участка $z_1=\bar{z}+\frac{\Delta}{2}=z_2+\Delta$ принимается за конечный уровень для следующего участка и делается аналогично подбор $\bar{z}$ для следующего участка.

Кроме способа непосредственного суммирования и вышеупомянутых способов, основанных на применении постулата неизменяемости модуля сопротивления, для построения кривых свободной поверхности в естественных водотоках применяются графические способы Н. В. Мастицкого и И. И. Херхеулидзе [22].

2—Е. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ И ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ

2—28. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

Гидравлический прыжок представляет собой явление скачкообразного перехода потока из бурного состояния (при $h'<h_к$) в спокойное состояние (к глубине $h''>h_к$) (фиг. 2—63).

Глубины h' и h'' до и после прыжка носят название взаимных, или сопряженных глубин, а разность их $h''-h'=a$ определяет собой высоту прыжка.

1. Прыжок в условиях плоской задачи

Применение к потоку до и после прыжка уравнений закона количества движения приводит к следующему основному уравнению гидравлического прыжка, связывающему живые сечения потока до (ω_1) и после (ω_2) прыжка:

$$\frac{\alpha Q^2}{g\,\omega_1}+\omega_1 y_1=\frac{\alpha Q^2}{g\,\omega_2}+\omega_2 y_2, \qquad (2—83)$$

где y_1 и y_2 — глубины погружения центров тяжести сечений ω_1 и ω_2;

α — коэффициент количества движения, равный в среднем 1,023.

Выражение (2—83) для любой глубины потока называется прыжковой функцией и обозначается $\theta(h)$:

$$\theta(h)=\frac{\alpha Q^2}{g\,\omega}+\omega y.$$

Уравнение прыжка показывает, что для взаимных глубин h' и h'' величины прыжковой функции одинаковы, т. е. $\theta(h')=\theta(h'')$.

Прыжковая функция имеет вид, изображенный на фиг. 2—61, и имеет минимум при критической глубине $h=h_к$. График прыжковой функции дает возможность легко находить взаимные глубины h' и h''.

Для прямоугольной формы русла взаимные глубины определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} h'&=\frac{h''}{2}\left[\sqrt{1+8\left(\frac{h_к}{h''}\right)^3}-1\right];\\ h''&=\frac{h'}{2}\left[\sqrt{1+8\left(\frac{h_к}{h'}\right)^3}-1\right].\end{aligned}\right\} \qquad (2—84)$$

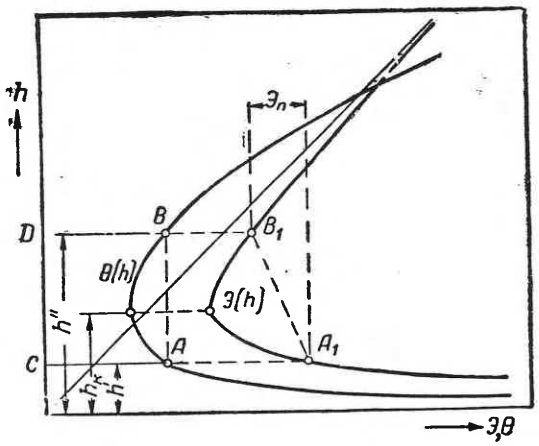
Длина гидравлического прыжка определяется по эмпирическим формулам:

формула Павловского

$$l_п=2{,}5\,(1{,}9\,h''-h'); \qquad (2—85)$$

формула Чертоусова

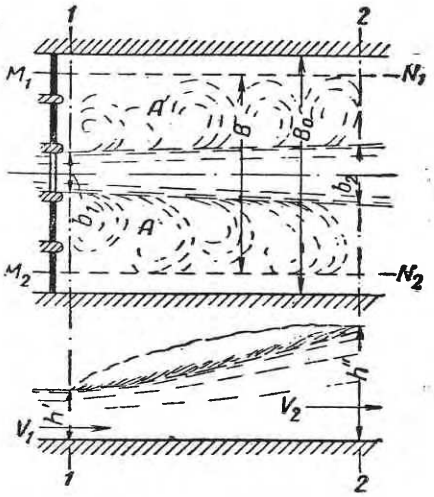
$$l_п=10{,}3\,h'\left(\sqrt{П_к}-1\right)^{0{,}81}. \qquad (2—86)$$



Фиг. 2—61. Кривые прыжковой функции $\theta(h)$ и удельной энергии сечения $Э(h)$

2. Прыжок в условиях пространственной задачи

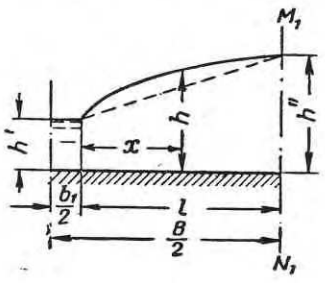
В практике работы гидротехнических сооружений иногда приходится иметь дело в нижнем бьефе сооружений с растеканием потока в плане (фиг. 2—62), т. е. со случаем пространственной задачи. В этом случае в нижнем бьефе сооружений можно выделить основную часть потока (активную зону) и второстепенную часть (пассивную зону). В активной зоне поток имеет поступательное движение и большие скорости, в пассивной зоне наблюдаются водовороты и вальцы.



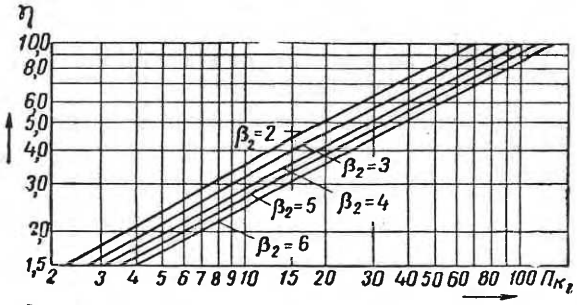
Фиг. 2—62

Для рассмотрения гидравлического прыжка в условиях пространственной задачи между сечениями *1—1* и *2—2* обозначим глубину и ширину основного потока в сечении *1—1* через h' и b_1, а в сечении *2—2* через h'' и b_2 (в этом случае глубины h' и h'' будут взаимными).

М. З. Абрамов [22], применив к отсеку прямоугольного русла, ограниченному сечениями *1—1* и *2—2* и двумя параллельными вертикальными плоскостями M_1N_1 и M_2N_2 закон количества движения, считая по всей ширине сечения *2—2* глубину одинаковой и равной h'' и приняв для изменения глубины h между сечениями *1—1* и *2—2* параболический закон $h=h'+(h''-h')\left(\frac{x}{l}\right)^m$ (фиг. 2—63), получил следующее уравнение:



Фиг. 2—63



Фиг. 2—64. График для определения глубин в условиях пространственной задачи

$$\frac{2\Pi_к(1-\eta\beta_1)}{\eta\beta_1}=1-\eta^2\beta_2+(\beta_2-1)\left[1+\frac{2(\eta-1)}{m+1}+\frac{(\eta-1)^2}{2m+1}\right], \qquad (2—87)$$

где $\frac{b_2}{b_1}=\beta_1$; $\frac{B}{b_1}=\beta_2$ и $\frac{h''}{h'}=\eta$.

Это уравнение является основным уравнением прыжка в условиях пространственной задачи. В условиях плоской задачи $\beta_1=\beta_2=1$ и уравнение превращается в уравнение (2—83).

Коэффициент β_1, характеризующий расширение основного потока в пределах области прыжка, практически можно принимать $\beta_1=1$. Коэффициент β_2 следует принимать:

при $\frac{B_0}{b_1}\geqslant 10$ $\quad\beta_2=5\div 6$,

при $\frac{B_0}{b_1}<10$ $\quad\beta_2=3\div 4$,

где B_0 — ширина водотока в нижнем бьефе.

Для величины m можно принять среднее значение $m=0{,}25$. Уравнение (2—87) имеет сложный вид, и поэтому решать его приходится путем последовательного приближения или графически при помощи графика на фиг. 2—64.

При том же значении $\Pi_к$, $m=0{,}25$, $\beta_1=1$ и $\beta_2=5$ бóльшая взаимная глубина h'' в пространственных условиях получается приблизительно в 1,5 раза меньше, чем в плоских, т. е.

$$h''\approx\frac{2}{3}\,h_0'',$$

где h_0'' — бóльшая взаимная глубина в условиях плоской задачи.

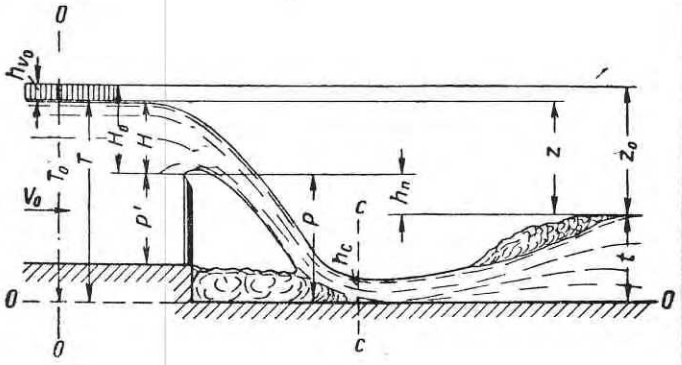
Д. И. Кумин[1] предложил для расчета пространственного прыжка несколько иное решение,[2] данное им отдельно для «узких» и «широких» бьефов.

2—29. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ

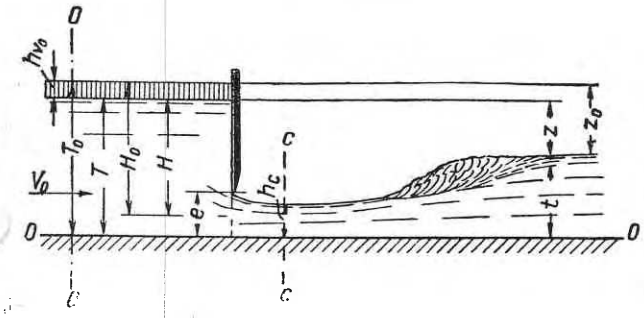
Основными схемами гидросооружений по форме сопряжения бьефов являются: схема водослива (фиг. (2—65) и схема истечения из-под щита (фиг. 2—66).

[1] Д. И. Кумин, Сопряженные глубины гидравлического прыжка в пространственных условиях, „Гидротехническое строительство" № 2, 1950.

[2] По техническим причинам изложение этого решения не смогло попасть в настоящую главу.



Фиг. 2—65



Фиг. 2—66

Ниже принята следующая система обозначений:

H — напор на водосливе (или над центром отверстия при истечении из-под щита);

$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$, где v_0 — скорость подхода;

z — перепад (разность отметок уровней в верхнем и нижнем бьефах);

$$z_0 = z + \frac{v_0^2}{2g};$$

p — высота порога водослива с нижнего бьефа;

p' — высота порога водослива с верхнего бьефа;

T_0 — средняя удельная энергия потока в сечении $0—0$ верхнего бьефа относительно наинизшей точки сжатого сечения.

Для случая водослива

$$T_0 = p + H_0,$$

для случая истечения из-под щита

$$T_0 = \frac{e}{2} + H_0,$$

где e — высота открытия щита;

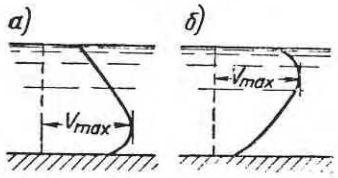
t — бытовая глубина в нижнем бьефе;

$h_п = H - z$ — глубина подтопления водослива;

q — удельный расход сооружения (на 1 *пог. м* ширины).

Все формы сопряжения можно подразделить на две основные группы:

а) сопряжения, при которых в нижнем бьефе сооружения наблюдается донный режим с характером эпюры скоростей по фиг. 2—67,*а* (наибольшие скорости у дна);



Фиг. 2—67

б) сопряжения, при которых в нижнем бьефе устанавливаются поверхностный режим с эпюрой скоростей типа, приведенного на фиг. 2—67, *б* (наибольшие скорости у поверхности).

2—30. СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ С ДОННЫМ РЕЖИМОМ

1. Основные расчетные случаи

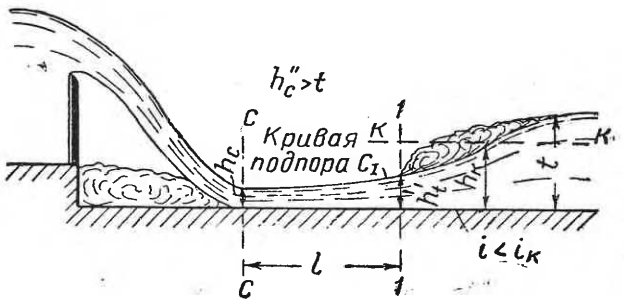
а) Бытовая глубина в нижнем бьефе больше критической $t > h_к$ и уклон меньше критического $i < i_к$ (спокойный режим).

Сопряжение сжатой глубины $h_c < h_к$ (при бурном режиме) с бытовой глубиной $t > h_к$ (при спокойном режиме) возможно только прыжком.

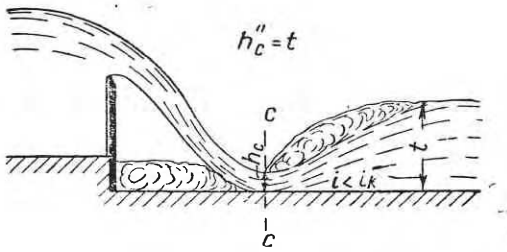
При этом возможны три случая сопряжения.

1. Глубина, сопряженная со сжатой, больше бытовой ($h''_c > t$). В этом случае будет отогнанный прыжок с кривой подпора типа c_I от глубины h_c до глубины h'_t, сопряженной с бытовой глубиной $t = h''$ (фиг. 2—68).

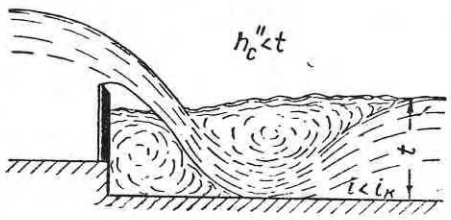
2. Глубина, сопряженная со сжатой, равна бытовой $h''_c = t$. В этом случае прыжок будет непосредственно у сжатого сечения (фиг. 2—69).



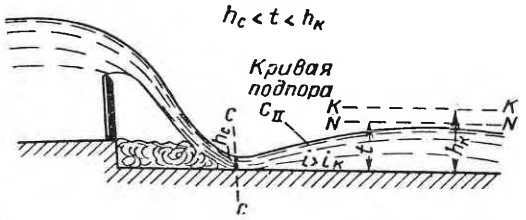
Фиг. 2—68



Фиг. 2—69



Фиг. 2—70



Фиг. 2—71

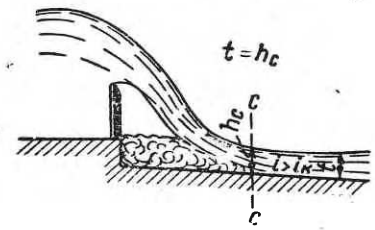
3. Глубина, сопряженная со сжатой, меньше бытовой ($h''<t$). В этом случае прыжок придвинется к водосливной стенке и затопит сжатое сечение. Прыжок в этом случае называется затопленным или надвинутым (фиг. 2—70).

При нулевом или обратном уклоне дна нижнего бьефа ($i=0$ или $i<0$) формы сопряжения те же, но вместо кривой подпора c_I на участке отгона получаются кривые c_0 и c'.

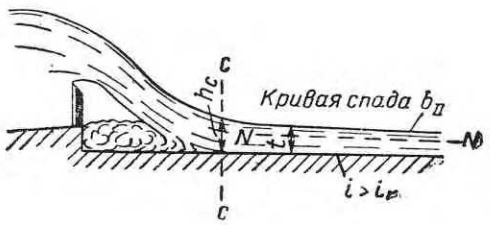
При истечении из-под щита (см. фиг. 2—66) возможны такие же формы сопряжения.

б) Бытовая глубина в нижнем бьефе меньше критической $t<h_к$ и уклон больше критического $i>i_к$ (бурный режим).

Так как сжатая глубина h_c и бытовая глубина t — обе меньше критической, то сопряжение будет без прыжка. Возможны следующие случаи.



Фиг. 2—72



Фиг. 2—73

1. $h_c<t$. Между сжатой глубиной h_c и бытовой глубиной t установится кривая подпора типа c_{II} (фиг. 2—71).

2. $h_c=t$. После сжатой глубины установится равномерный режим (фиг. 2—72).

3. $h_c>t$. Между глубинами h_c и t установится кривая спада типа b_{II} (фиг. 2—73).

2. Определение сжатой и сопряженной глубин

Сжатая глубина в нижнем бьефе h_c определяется из уравнения:

$$T = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g\varphi^2\omega_c^2}, \qquad (2—88)$$

где ω_c — площадь сжатого сечения;

φ — коэффициент скорости, определяемый по рекомендованной акад. Павловским табл. 2—36.

Для прямоугольного сечения последнее уравнение имеет вид:

$$T = h_c + \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_c^2},$$

где q — расход через единицу ширины сооружения.

Для h_c последнее равенство дает уравнение третьей степени, которое решается подбором или при помощи вспомогательных графиков.

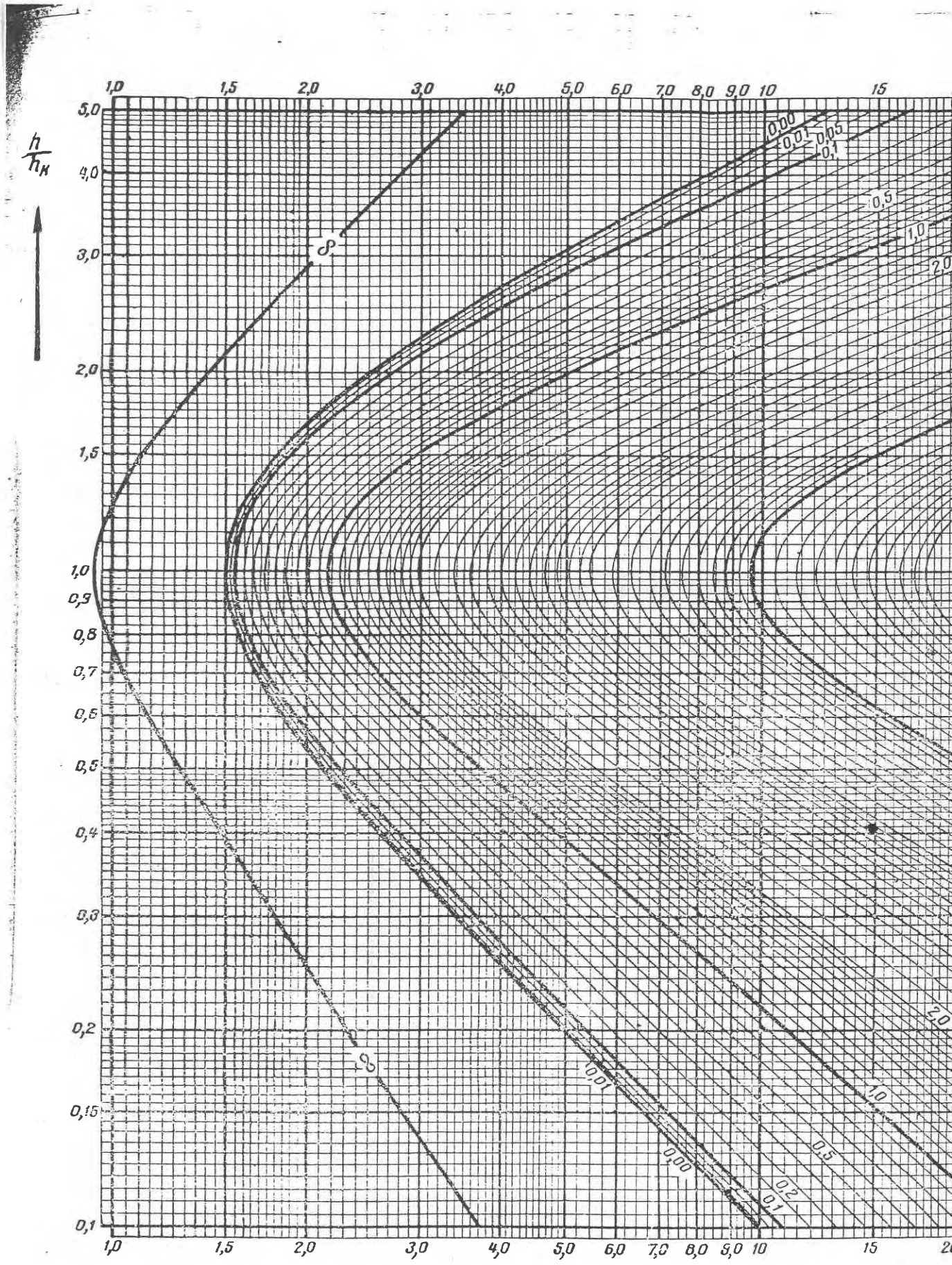
Таблица 2—36

Значения коэффициента φ

Схема сооружения	φ
Истечение из донных отверстий . . .	1,0 ÷0,95
Перепады без щитов	1,0
Перепады со щитами	1,0 ÷0,97
Водосливы плавной формы без щитов (с гладкой сливной поверхностью):	
а) при малой длине сливной поверхности	1,0
б) при средней длине	0,95
в) при большой длине	0,90
Водосливы плавной формы со щитами	0,95÷0,85

На фиг. 2—74 дан график для определения сжатой глубины h_c и сопряженной с ней h_c'' при прямоугольной форме русла, построенный по уравнению проф. А. А. Угинчуса [22].

На оси абсцисс графика отложены значения $\xi_0=\frac{T}{h_к}$, по оси ординат значения $\xi_c=\frac{h_c}{h_к}$. График содержит пять кривых для значений φ =1,0; 0,95; 0,90; 0,85 и 0,8 и кривую слева для определения $\xi_c''=\frac{h_c''}{h_к}$.



Примечание. На координатную сетку графика нанесены кривые равных значений функции $\frac{mh_к}{b}$ причем для нее по оси абсцисс отложены значения функции $\left(\frac{\theta}{mh_к}\right)^{0,333}$, а на $\left(\frac{}{m}\right.$

Зак. 125

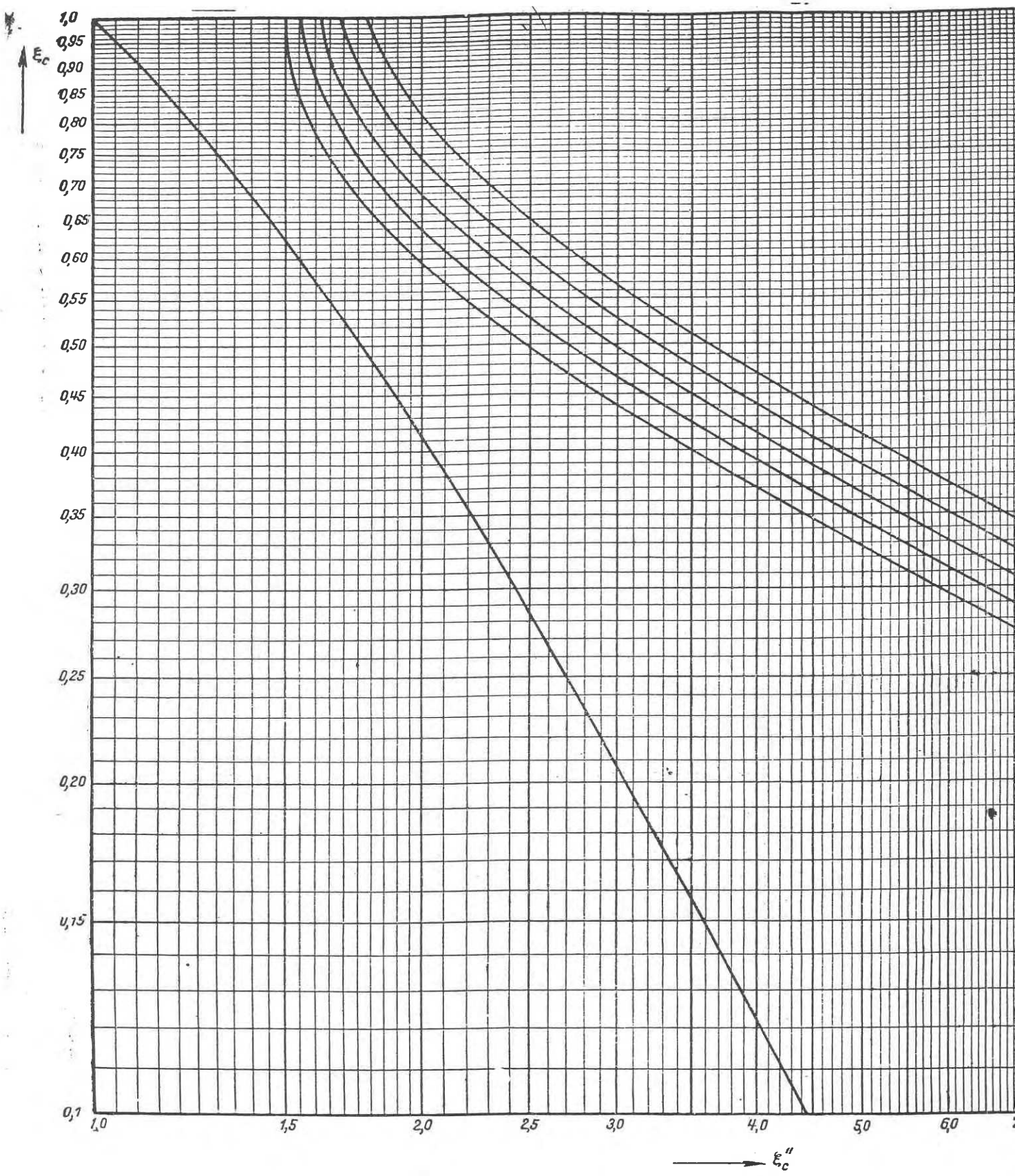
Фиг. 2—76. График для определения глубин при гидравлич

а) Кривая, отмеченная знаком ∞, соответствует предельному ругсу,

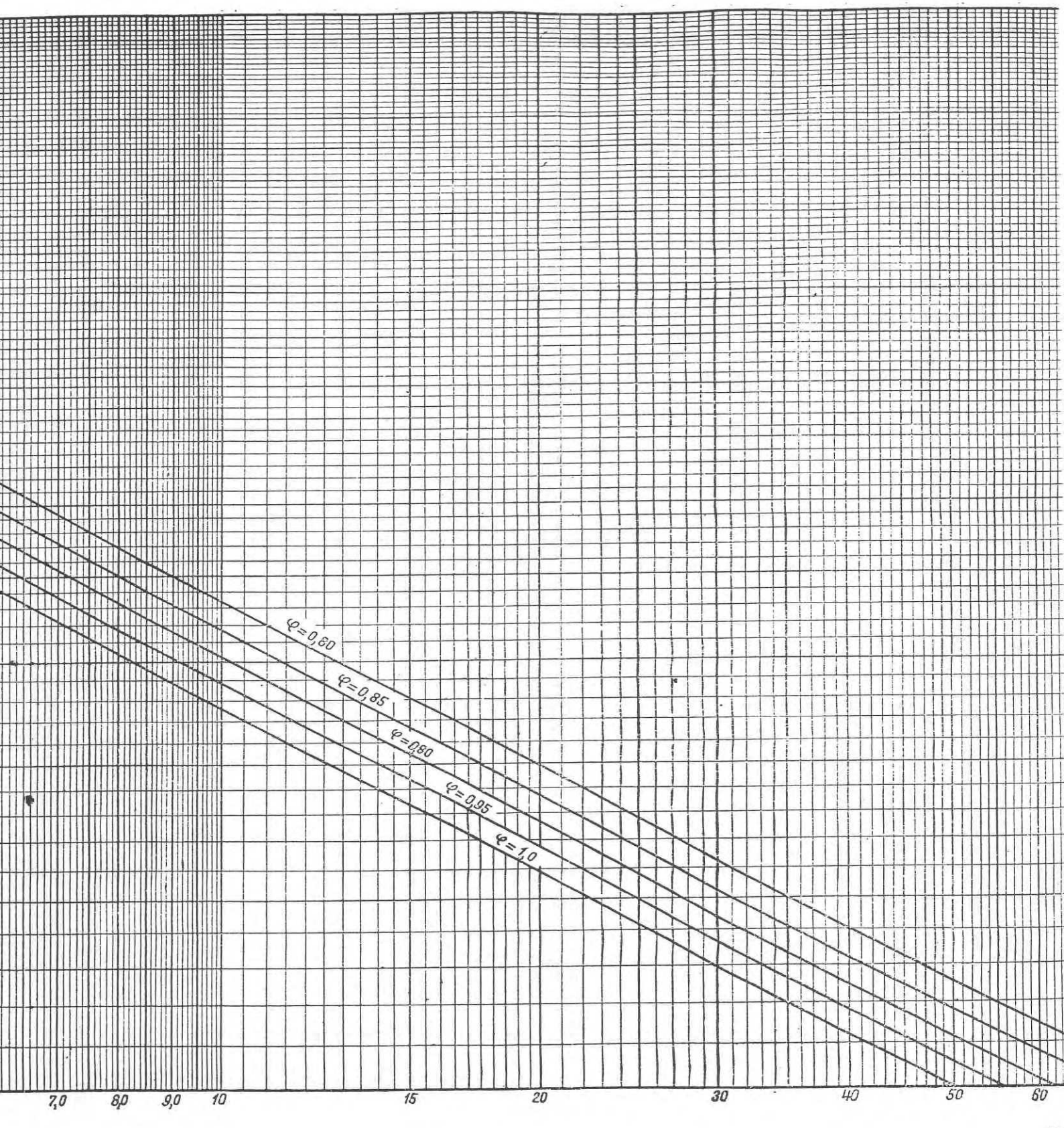
практическом прижке в призматических трапецоидальных руслах

Шкала для определения критических глубин

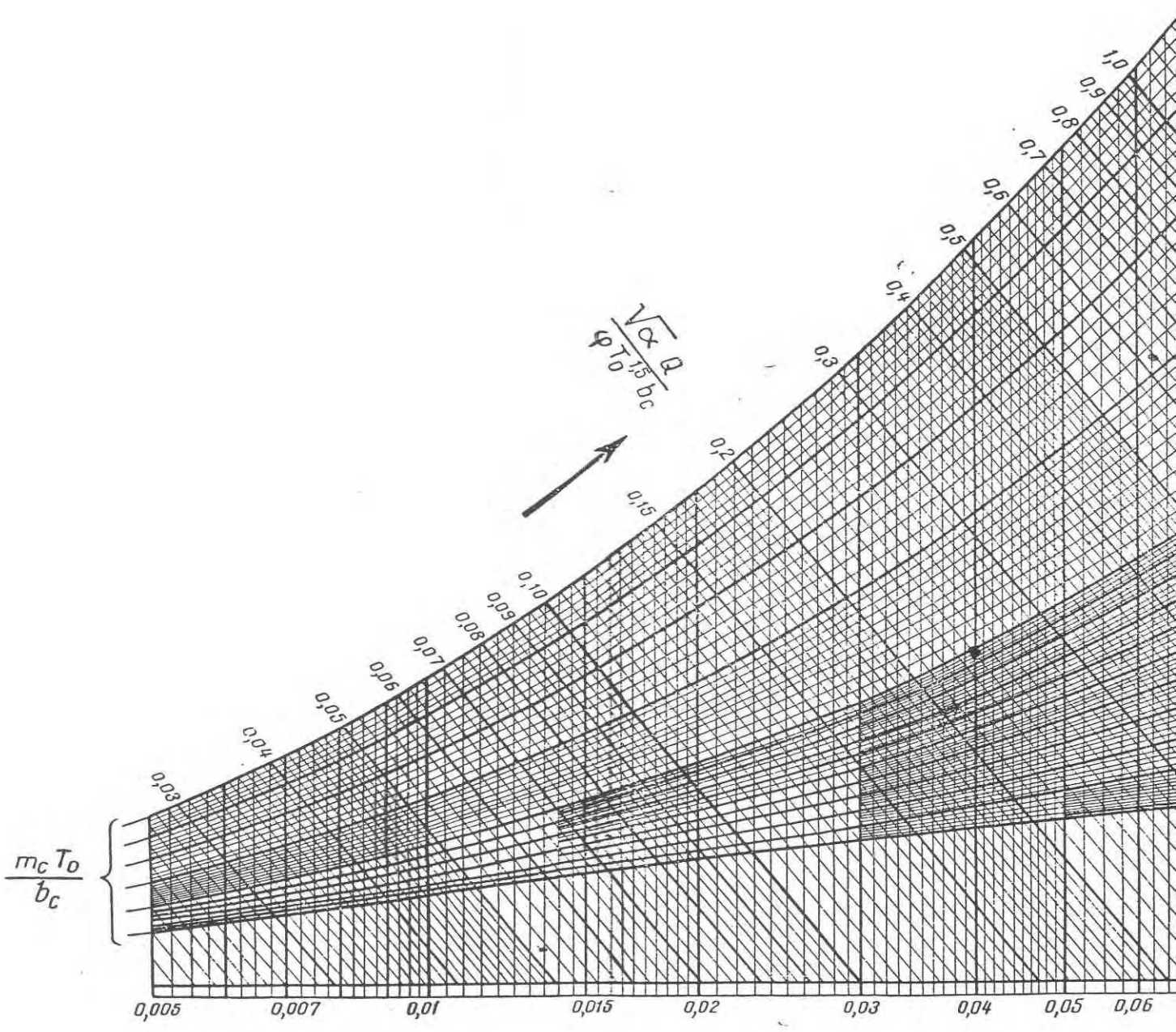
(для метровых размеров)



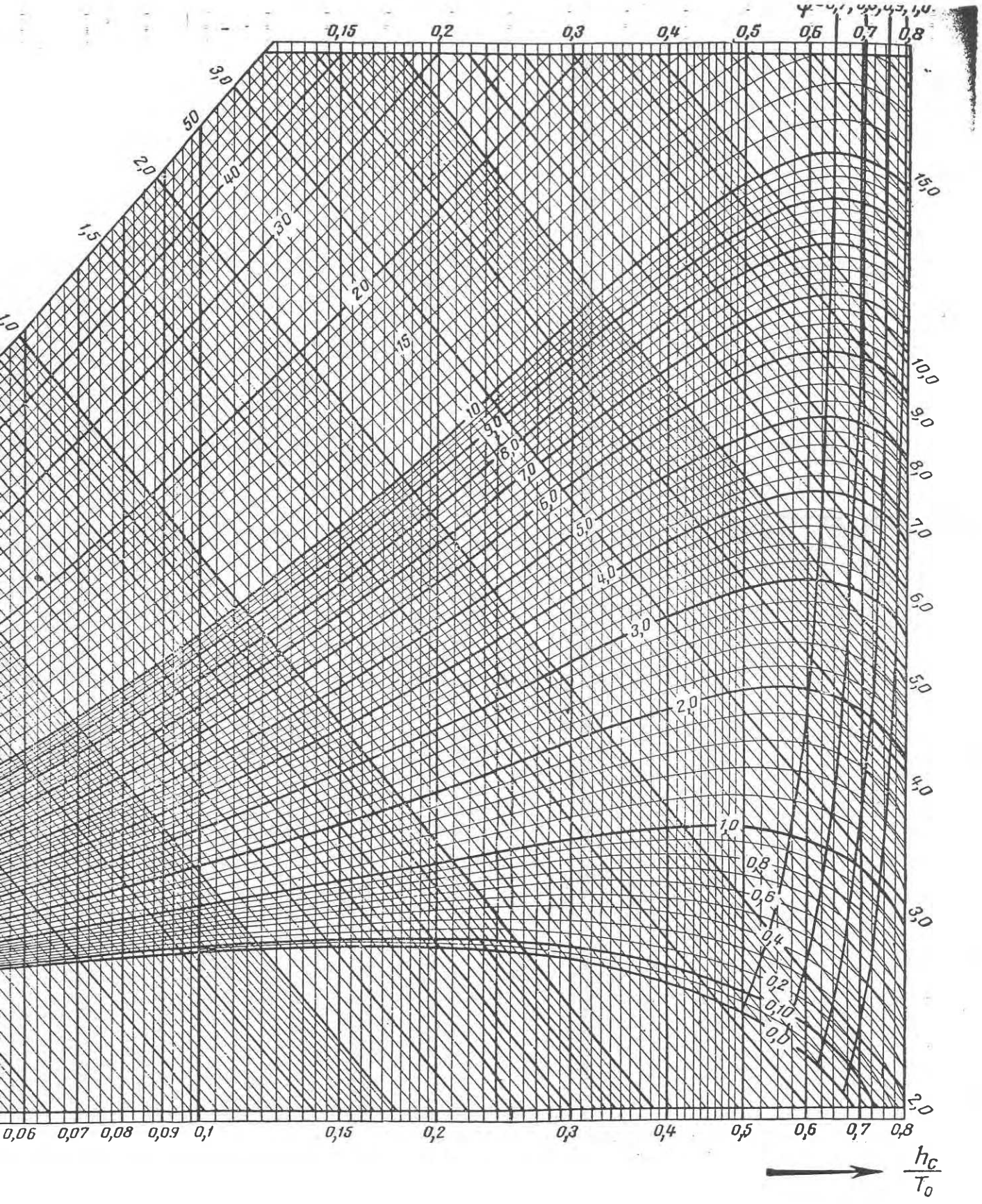
Фиг. 2—74. График для определения глубин в сжатом сечении и глуб



и глубин, взаимных с ними, в нижнем бьефе сооружений при прямоугольной форме отводящего русла



Фиг. 2—75. **График** *для определения глубин в сжатом сечении в нижнем бье*



снем бьефе сооружений при трапецоидальной форме отводящего русла

Пользование графиком сводится к следующему: по данным величинам T_0 и q находят $h_к$ по формуле (2—53′) и $\xi_0 = \frac{T}{h_к}$.

Через точку оси абсцисс, соответствующую полученному значению ξ_0, проводим вертикальную линию до пересечения с соответствующей заданному φ кривой и сносим эту точку на ось ординат, где находим ξ_c и затем $h_c = \xi_c h_к$.

Перенеся эту ординату ξ_c на левую кривую и опуская от нее перпендикуляр на ось абсцисс, получаем точку, определяющую ξ_c''. Сопряженная со сжатой глубина $h_c'' = \xi_c'' h_к$.

Определение сжатой глубины h_c в трапецоидальном сечении можно производить по графику проф. Рахманова А. Н. [22] на фиг. 2—75.

Для определения сжатой глубины h_c график на фиг. 2—75 построен в логарифмической косоугольной системе координат; по оси абсцисс отложены значения величины $\tau_c = \frac{h_c}{T_0}$, по оси ординат — соответствующие значения функции $A = \frac{\sqrt{\alpha}\, Q}{\varphi\, b_c T_0^{1,5}}$. Каждой кривой отвечает свое значение функции $B = \frac{mT_0}{b_c}$.

Пользование графиком заключается в следующем. По данным Q, T_0, b_c, m, φ и α вычисляют A и B и на графике находят точку пересечения наклонной линии A и кривой B. Абсцисса точек пересечения этих линий определяет собой искомое отношение τ_c, по которому и находят $h_c = \tau_c T_0$.

Далее вычисляют $h_к$ (по одному из приведенных в п. 2—19 способов) и находят $\xi_c = \frac{h_c}{h_к}$. Сопряженную глубину h_c'', характеризуемую отношением $\xi_c'' = \frac{h_c''}{h_к}$, находят или по приближенной формуле проф. Рахманова:

$$\xi_c'' = \frac{1}{0{,}17 + 0{,}83\,\xi_c} \qquad (2—89)$$

или по графику проф. Чертоусова М. Д. [22] на фиг. 2—76.

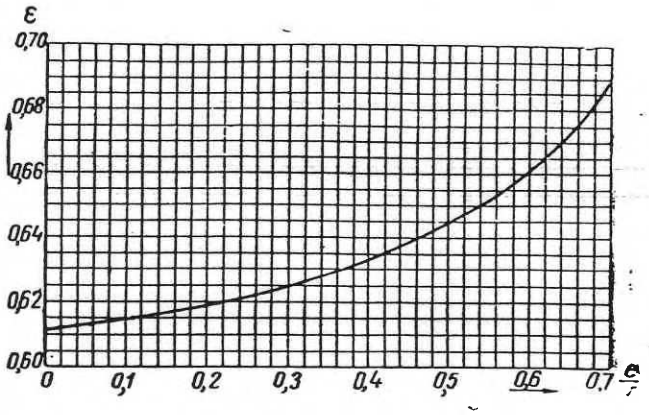
На оси абсцисс этого графика отложены значения $\frac{\theta(h)}{bh_к^2}$, а на оси ординат — относительные глубины ξ, определяемые из отношения $\xi_c = \frac{h_c}{h_к}$ и $\xi_c'' = \frac{h_c''}{h_к}$.

На графике дан ряд кривых, соответствующих разным значениям отношения $\frac{mh_к}{b}$.

2—31. ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ-ПОД ЩИТА

При выпуске потока из-под щита (см. фиг. 2—66) глубина в сжатом сечении h_c в условиях плоской задачи может быть определена по зависимости:

$$h_c = \varepsilon e,$$



Фиг. 2—77. График зависимости коэффициента вертикального сжатия $\varepsilon = f\left(\frac{e}{T}\right)$ *по Н. Е. Жуковскому*

где ε — коэффициент вертикального сжатия струи, зависящий от относительного открытия щита $\tau = \frac{e}{T}$ и определяемый по графику $\varepsilon = f\left(\frac{e}{T}\right)$, построенному на основе теоретического исследования проф. Н. Е. Жуковского (фиг. 2—77).

При обычных степенях открытия $\varepsilon = 0{,}62 \div 0{,}65$.

Расход через незатопленное щитовое отверстие прямоугольной формы шириной b определяется по формуле:

$$Q = \mu be\sqrt{2g(T_0 - \varepsilon e)} \qquad (2—90)$$

или

$$q = \mu e\sqrt{2g(T_0 - \varepsilon e)}, \qquad (2—90')$$

где $\mu = \varepsilon\varphi$ определяется по графику $\varepsilon = f\left(\frac{e}{T}\right)$ и таблице значений φ.

При глубине нижнего бьефа $t > h_c''$ щитовое отверстие затапливается.

У затопленного щитового отверстия непосредственно за щитом в сжатом сечении устанавливается глубина h, меньшая бытовой глубины нижнего бьефа t, и поэтому расход через затопленное щитовое отверстие определяется по формуле:

$$q = \mu e\sqrt{2g(T_0 - h)}. \qquad (2—91)$$

Глубина в сжатом сечении

$$h = \sqrt{t^2 - L\left(T_0 - \frac{L}{4}\right)} + \frac{L}{2}, \qquad (2—92)$$

где

$$L = 4\mu^2 e^2 \frac{t - h_c}{t\, h_c}.$$

В практике возможны следующие типы задач.

1. Незатопленное отверстие

а) Даны T, e, b; найти q.

По e и T находят $\tau = \frac{e}{T}$ и по графику Жуковского $\varepsilon = f(\tau)$. После чего по формуле (2—90) находят q.

б) Даны q, b и e; найти T.

Эта задача решается последовательным приближением или графически. Для этого, задаваясь рядом значений T, находят q и строят кривую $q=f(T)$, по которой и определяют T, соответствующее заданному q.

2. Затопленное отверстие

а) Дано T, b, e и t; найти q.

По отношению $\tau = \frac{e}{T}$ находят ε, h_c и L. Затем по формуле (2—92) вычисляют глубину у щита h и по формуле (2—91) находят q.

б) Даны q, b, e и t; найти T.

Эта задача решается последовательным приближением или графически. Для этого, задаваясь рядом значений T, находят последовательно ε, h_c, L и h и наконец q и строят кривую зависимости $q=f(T)$, по которой и находят T, соответствующее заданному значению расхода q.

2—32. РАСЧЕТ ВОДОБОЙНОГО КОЛОДЦА

Для гашения энергии потока, стекающего с водослива, и преобразования отогнанного прыжка в затопленный устраивают в дне углубление, образующее так называемый водобойный колодец.

Ниже приведены указания по выбору необходимой глубины d_0 и длины $l_к$ водобойного колодца для плоской задачи, т. е. когда колодец и отводящее русло имеют прямоугольную форму сечения постоянной ширины.

В качестве расчетного случая принята глубина в колодце $t_0'=h_c''$, т. е. предельный случай равенства глубин (фиг. 2—78, a). Из чертежа имеем:

$$t_0' = d_0 + t + \Delta z_0,$$

где Δz_0 — перепад при выходе из колодца.

Искомая величина

$$d_0 = h_c'' - t - (\Delta z_0 - h_v).$$

Заменяя

$$h_v = \frac{\alpha v^2}{2g} = \frac{\alpha q^2}{2g\, h_c''^2} = \frac{h_к^3}{2h_c''^2},$$

получаем окончательно уравнение для d_0 в виде:

$$d_0 = h_c'' - t - \Delta z_0 + \frac{h_к^3}{2h_c''^2}. \qquad (2—93)$$

Последнее уравнение решается подбором или графически. Быстрее и удобнее для его решения пользоваться предложенным проф. М. Д. Чертоусовым графиком (фиг. 2—79) [22].

Введем обозначения:

$$\frac{z_0 - \Delta z_0}{h_к} = \xi'; \quad \frac{T_0 + d_0}{h_к} = \xi_0'; \quad \xi_c'' = \frac{h_c''}{h_к}.$$

На фиг. 2—79 представлен график зависимости

$$\xi_0' = f(\eta),$$

где

$$\eta = \xi_c'' + \frac{1}{2\,\xi_c''^2}.$$

По заданным величинам q, z_0 и t находят Δz_0 и ξ_c'', по ξ_c'' находят η и по η находят на графике ξ_0' (для заданного φ). Тогда искомое значение глубины водобойного колодца

$$d_0 = \xi_0' h_к - T_0 \text{ или } d_0 = (\xi_0' - \xi_0) h_к,$$

где

$$\xi_0 = \frac{T_0}{h_к}.$$

Для обеспечения в нижнем бьефе затопленного прыжка стараются выполнить равенство $t' = \sigma h_c''$, где $\sigma = 1{,}05 \div 1{,}10$ — коэффициент запаса, характеризующий степень затопления прыжка. Тогда необходимая глубина водобойного колодца:

$$d = \sigma d_0 + (\sigma - 1) t. \qquad (2—94)$$

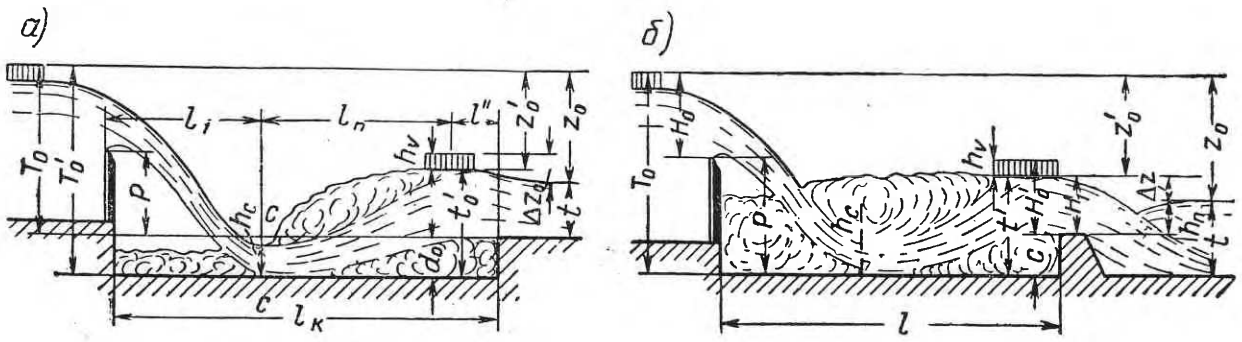
Для определения длины водобойного колодца проф. М. Д. Чертоусов [22] рекомендует пользоваться соотношением

$$l_к = l_1 + \beta l_п,$$

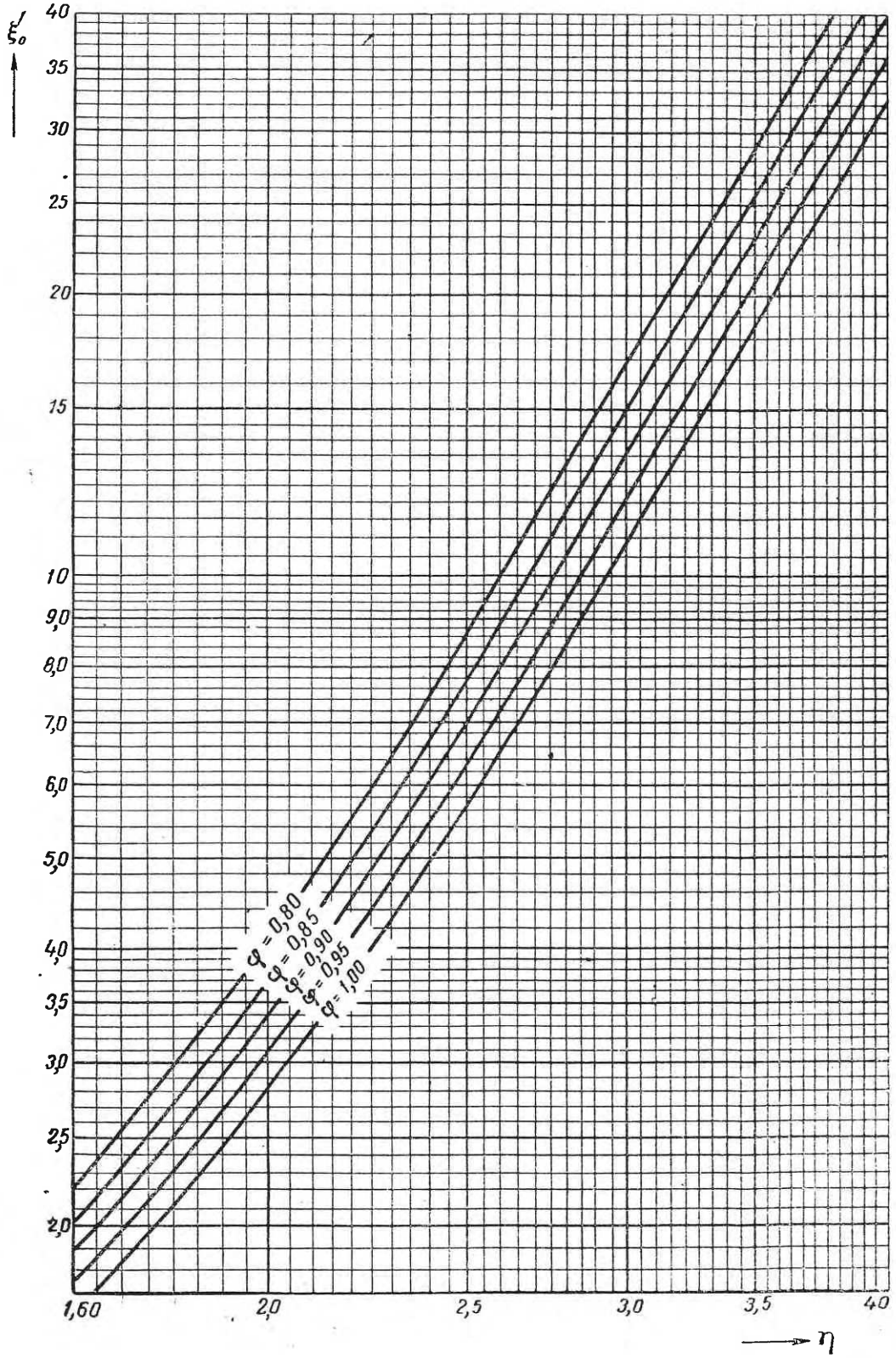
где $\beta = 0{,}7 \div 0{,}8$;

$l_п$ — длина прыжка, определяемая по формуле (2—85) и (2—86);

l_1 — длина падения струи (см. фиг. 2—78).



Фиг. 2—78



Фиг. 2—79. График зависимости $\xi'_0 = f(\eta)$ *(для определения глубины водобойного колодца)*

2—33. РАСЧЕТ ВОДОБОЙНОЙ СТЕНКИ

Для гашения энергии, кроме водобойных колодцев, заглубленных в дно нижнего бьефа, применяют возвышающиеся над дном водобойные стенки (см. фиг. 2—78, *б*).

Для сопряжения по типу затопленного прыжка глубина воды перед водобойной стенкой должна удовлетворять равенству:

$$t' = \sigma h_c'',$$

где h_c'' — глубина, сопряженная со сжатой;

σ — коэффициент, характеризующий степень затопления прыжка.

Из рисунка видно, что необходимая высота водобойной стенки

$$c = t' - H_1 = \sigma h_c'' - H_1,$$

где H_1 — напор на водобойной стенке при переливе через нее расхода q, как через водослив практического профиля, определяемый из формулы $q = mb\sqrt{2g}\,H_{1,0}^{3/2}$;

m — коэффициент расхода водослива; для прямоугольного и трапецоидального профиля $m \approx 0{,}42$;

$$H_1 = H_{1,0} - \frac{v_0^2}{2g}.$$

Если полученная величина $c > t$, то водобойная стенка будет работать как незатопленный водослив; если $c < t$, то водобойная стенка будет работать как затопленный водослив и в формулу q надо ввести коэффициент затопления $\sigma = f\left(\frac{h_п}{H_1}\right)$ (см. табл. 2—16) и повторить весь расчет.

Высоту водобойной стенки c, работающей как незатопленный водослив, можно определять при помощи графика (фиг. 2—79). На графике по оси абсцисс отложены значения

$$\eta = \frac{c_0}{h_к} + \frac{1}{k},$$

где $c_0 = h_c'' - H_1$ — высота водобойной стенки, обеспечивающая критическую форму сопряжения;

$$k = \frac{h_к}{H_{0,1}} = \sqrt[3]{2\alpha m^2}.$$

По оси ординат отложены соответствующие η значения $\xi_0 = \frac{T}{h_к}$. График содержит пять кривых для различных коэффициентов φ. Пользование графиком сводится к отысканию значения η, отвечающего заданному отношению ξ_0 и φ.

Высота водобойной стенки

$$c_0 = h_к\left(\eta - \frac{1}{k}\right).$$

Высоту водобойной стенки, работающей как затопленный водослив ($c < t$), можно определять по графику проф. М. Д. Чертоусова на фиг. 2—80 [22]. На оси абсцисс графика отложены значения B, на оси ординат — значения $\eta_н$; здесь

$$B = k\xi_\Delta;\quad \xi_\Delta = \frac{\Delta z}{h_к};\quad \eta_н = \frac{\Delta z}{H_1}.$$

График содержит серию кривых, отвечающих различным значениям $A = \frac{\xi_c''}{\sqrt{k}}$. Нахождение высоты водобойной стенки c_0 осуществляется следующим образом.

По заданным q, T_0, φ и m находим относительную глубину сжатого сечения ξ_c' (см. график на фиг. 2—74), относительный перепад $\xi_\Delta = \frac{\Delta z}{h_к}$ и вычисляем значения функций A и B, после чего по графику фиг. 2—80 находим $\eta_н$.

После этого находим $H_1 = \frac{\Delta z}{\eta_н}$ и $c_0 = h_c'' - H_1$ или прямо

$$c_0 = h_к\left(\xi_c'' - \frac{\xi_\Delta}{\eta_н}\right).$$

Найденную при помощи графиков на фиг. 2—79 и 2—80 высоту водобойной стенки необходимо несколько увеличить по уравнению:

$$c = c_0 + (\sigma - 1)h_c'',$$

где $\sigma = 1{,}05 \div 1{,}10$.

Длина водобойного колодца, образованного водобойной стенкой, определяется так же, как было указано в предыдущем параграфе.

Удар жидкости о водобойную стенку. Если на пути струи или потока, движущегося со скоростью v и имеющего площадь сечения ω, имеется стенка или порог, стоящие нормально к потоку, то поток давит на стенку с силой P, которую можно определить по формуле:

$$P = \frac{\gamma}{g}\omega v^2.$$

При расположении стенки под углом θ к направлению потока

$$P = \frac{\gamma\omega v^2}{g}\sin\theta,$$

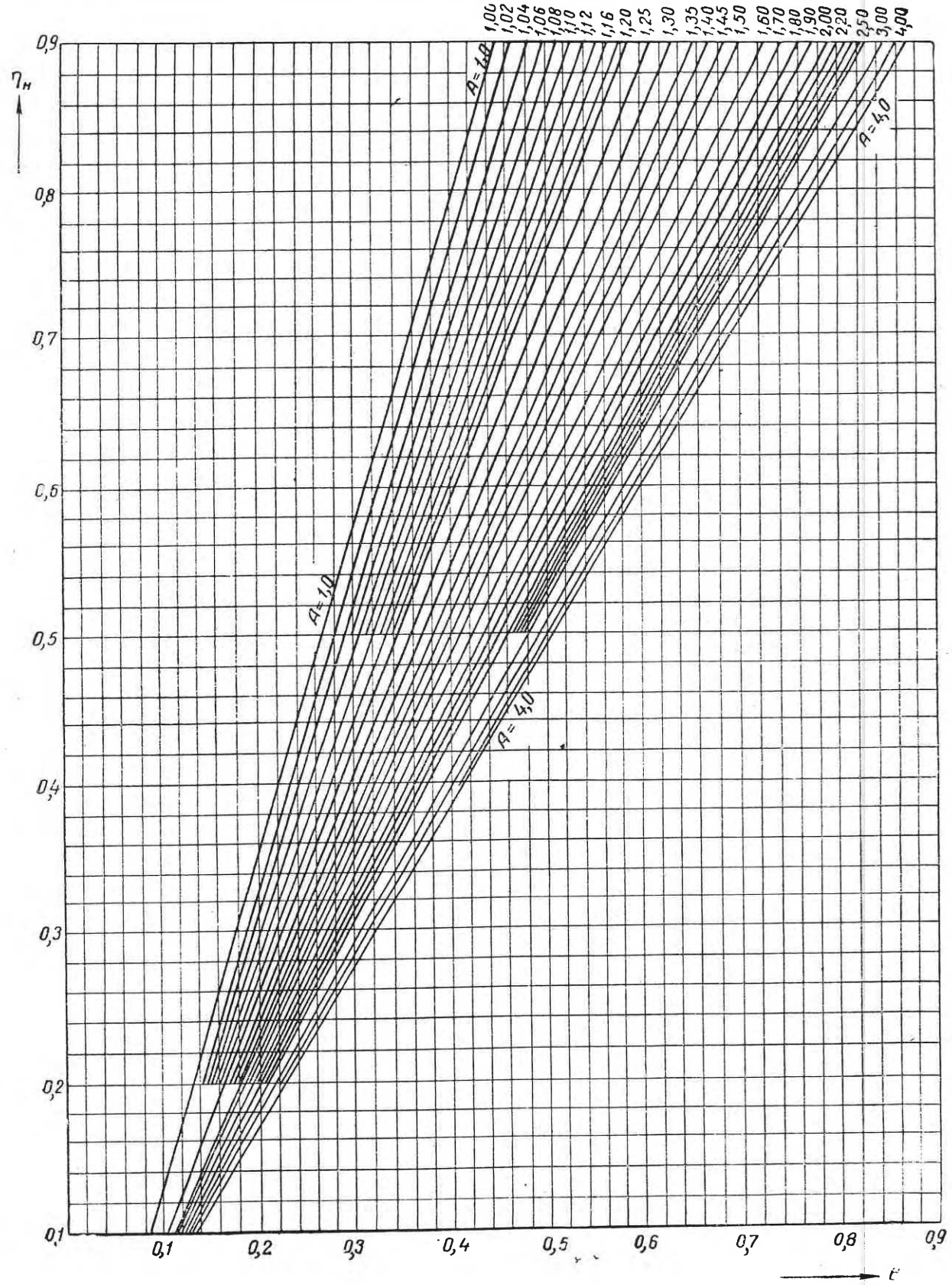
где θ — острый угол, образуемый направлением струи с плоскостью стенки.

По этим формулам может быть определено давление потока на порог, водобойную стенку, гаситель и т. п.

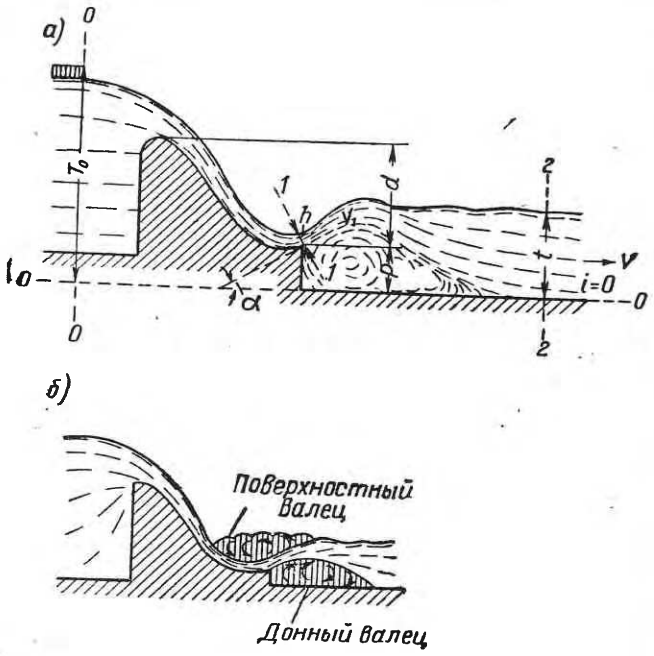
2—34. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ РЕЖИМОМ

Поверхностный режим сопряжения наблюдается ниже водосливных плотин при устройстве водослива с горизонтальным или приподнятым носком и уступом в нижнем бьефе.

При глубинах в нижнем бьефе, меньших высоты носка, наблюдается одна из трех разобранных выше (см. п. 2—30) форм донного режима.



Фиг. 2—80. График зависимости $\eta_н = f(B)$ *(для определения высоты водобойной стенки)*



Фиг. 2—81

При повышении глубины нижнего бьефа выше носка образуется форма сопряжения (фиг. 2—81,*а*), называемая незатопленным поверхностным прыжком, которая характерна донным вальцом и отсутствием обычного для прыжка поверхностного вальца.

При дальнейшем повышении глубины нижнего бьефа образуется сопряжение (фиг. 2—81, *б*), называемое затопленным поверхностным прыжком, характерное наличием двух вальцов — донного и поверхностного.

Режим сопряжения без поверхностного вальца называют первым критическим режимом. Режим, сопровождающийся образованием второго вальца на поверхности струи, называют вторым критическим режимом.

Опытные данные Д. И. Кумина [9] позволили связать гидравлические элементы, отвечающие первому критическому режиму, следующей эмпирической зависимостью:

$$\xi_1 = 1{,}74\,\eta\,(\xi_0 - 0{,}49\,\beta - 1{,}30) + 1{,}78\,\beta + 0{,}22, \quad (2—95)$$

где $\xi_1 = \dfrac{t_1 + p}{h_к}$;

t_1 — бытовая глубина, отвечающая первому критическому режиму;

p — высота уступа;

$$\xi_0 = \frac{T_0 - p}{h_к}; \quad \eta = \frac{p}{d};$$

d — превышение гребня водослива над сливным ребром уступа (фиг. 2—81,*а*);

$$\beta = \frac{b}{B},$$

b — ширина водослива;

B — ширина отводящего русла.

В условиях плоской задачи

$$\beta = 1 \text{ и } \xi_1 = 1{,}74\,\eta\,(\xi_0 - 1{,}79) + 2.$$

Приведенная зависимость дает возможность определить ξ_1 и по ней бытовую глубину t_1.

Для второго критического режима можно пользоваться эмпирической зависимостью, установленной на основе опытов Д. И. Кумина, имеющей вид:

$$\xi_2 = [1{,}96\,\eta + 0{,}1\,(1 - \beta)\,(2 - \eta)]\,(\xi_0 - 0{,}45\,\beta - 1{,}30) + 1{,}90\,\beta + 0{,}4, \quad (2—96)$$

где $\xi_2 = \dfrac{t_2 + p}{h_к}$;

t_2 — бытовая глубина, отвечающая второму критическому режиму.

В условиях плоской задачи $\beta = 1$, и последнее соотношение принимает вид:

$$\xi_2 = 1{,}96\,\eta\,(\xi_0 - 1{,}75) + 2{,}30. \quad (2—97)$$

Из последних соотношений можно определить величину ξ_2, а затем найти и глубину t_2, отвечающую образованию второго критического режима.

2—Ж. ПЕРЕПАДЫ И БЫСТРОТОКИ

На оросительных каналах и сбросных каналах ГЭС, проходящих через места с большим уклоном, для преодоления больших разностей в отметках дна устраивают специальные так называемые сопрягающие сооружения. Такими сооружениями являются перепады (фиг. 2—82), создающие сосредоточенное падение дна в одном створе или быстротоки (рис. 2—89), с помощью которых разность отметок в дне канала распространяется на некоторую длину, зависящую от уклона быстротока.

В состав перепада обычно входят следующие основные части:

1) входная часть;
2) стенка падения;
3) водобойная часть;
4) выходная часть.

Входная часть представляет собой обычно водослив с широким порогом или практического профиля.

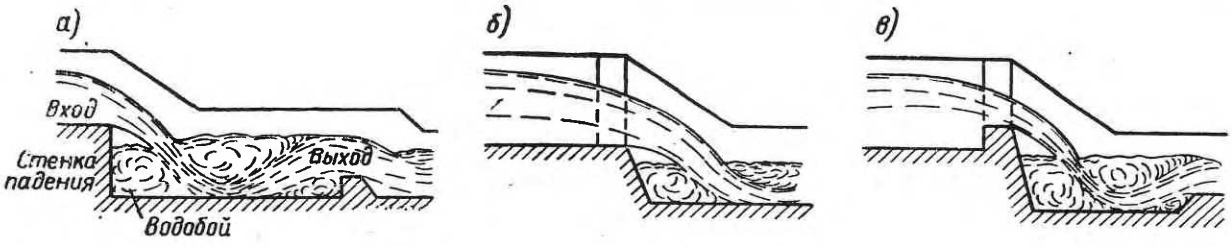
При относительно постоянном расходе водосливу придается прямоугольная форма; при изменении расхода прямоугольный водослив снижает горизонт в канале, что является его недостатком.

Поддержание в канале горизонта воды на относительно постоянном уровне достигается при помощи затворов на пороге перепада или устройством водослива трапецоидальной формы (фиг. 2—83), обеспечивающего саморегулирование горизонта воды в канале без участия обслуживающего персонала.

Перепады с такими водосливами называются щелевыми.

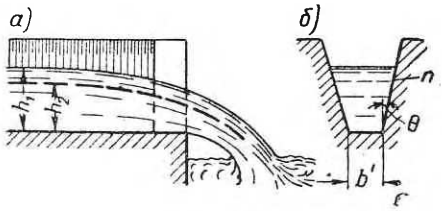
Стенка падения в перепадах делается вертикальной (фиг. 2—84, *а*), наклонной (фиг. 2—84, *в*) или ступенчатой формы; в последнем случае перепад получает название многоступенчатого.

Водобойная часть перепадов осуществляется в виде водобойного колодца или водобойной стенки.



Фиг. 2—82

Выходная часть перепада осуществляется в виде водослива с широким порогом или практического профиля.



Фиг. 2—83

2—35. ОДНОСТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕПАД

При расчете входной части одноступенчатого перепада возможны следующие основные случаи.

1. Водослив с широким порогом

При длине боковых стенок водослива $l \geqslant 2H$ (фиг. 2—84,*а*) и пороге водослива на уровне дна канала (или с небольшим подъемом против отметки дна) входная часть перепада работает как водослив с широким порогом.

Основная расчетная формула расхода, учет затопления и бокового сжатия производится по формулам, приведенным в п. 2—13 для водослива с широким порогом.

2. Водослив практического профиля

Если боковые стенки водослива имеют небольшую толщину, а порог находится на уровне дна канала (фиг. 2—84,*б*) или несколько приподнят (фиг. 2—84,*в*), то стенку падения принимают за водослив практического профиля. Коэффициент расхода при этом принимают, как для полигональных профилей, в пределах $m=0{,}42 \div 0{,}45$. Придавая приподнятому порогу плавные скругления, коэффициент расхода можно довести до $m=0{,}48 \div 0{,}50$.

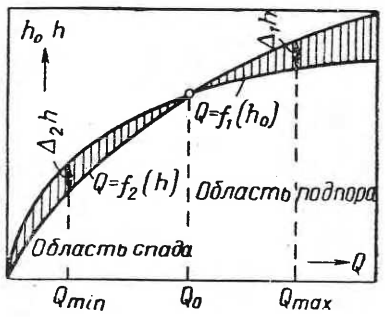
Затопление учитывается коэффициентом, определяемым по графику на фиг. 2—35 для водосливов практического очертания.

Ширина водослива b определяется по расчетному расходу Q_0 и бытовой глубине в канале h_0. Если расход канала постоянен, то для водослива без порога (фиг. 2—84,*б*) расчетный напор H должен быть равен бытовой глубине в канале h_0.

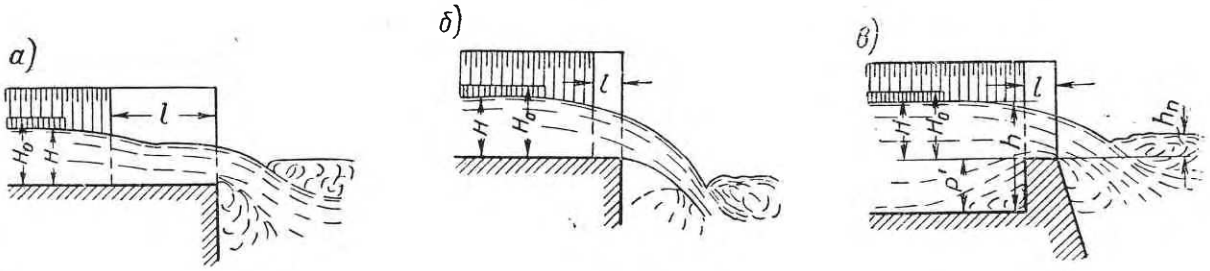
Если водослив осуществлен с порогом, то ширина перепада определяется по напору H, удовлетворяющему равенству $h_0=H+p'$.

При переменном расходе в канале ширину перепада выбирают с таким расчетом, чтобы средний расчетный напор на водосливе H давал расчетную глубину в канале h_0. При этом колебания горизонта в канале окажутся минимальными.

При $Q<Q_0$ в канале при подходе к перепаду (с прямоугольным входом) будет спад, при $Q>Q_0$ — подпор (фиг. 2—85).



Фиг. 2—85. График изменения глубин в канале перед перепадом



Фиг. 2—84

3. Щелевой перепад

При расчете щелевого перепада обычно задаются двумя крайними расчетными расходами Q_1 и Q_2 или соответствующими им глубинами в канале h_1 и h_2.

Последние назначают, исходя из следующих соображений.

Если наибольшая глубина воды в канале равна h_{max}, а наименьшая h_{min}, то расчетные значения глубин определяют по формулам:

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= h_{max} - 0{,}25\,(h_{max} - h_{min}),\\ h_2 &= h_{min} + 0{,}25\,(h_{max} - h_{min}). \end{aligned}\right\} \qquad (2-98)$$

При неизвестной h_{min} принимают ее от 0,33 до 0,50 h_{max}.

Задача заключается в установлении такой формы водослива, при которой напоры на водосливе H_1 и H_2 для расчетных расходов Q_1 и Q_2 были бы равны расчетным глубинам в канале h_1 и h_2 (условие отсутствия кривой спада в канале).

Если ширину трапецоидального водослива понизу обозначить через b (фиг. 2—83), толщину струи в створе стенки падения через ξH (где ξ — некоторый коэффициент, принимаемый обычно равным 0,8), а наклон боковых граней через $n=\operatorname{ctg}\theta$, то средняя ширина живого сечения в плоскости щели

$$b_{ср} = b + 2n\cdot 0{,}4H = b + 0{,}8nH.$$

Эту среднюю ширину принимают за рабочую ширину прямоугольного водослива, эквивалентного данному трапецоидальному. Для расходов Q_1 и Q_2 будем иметь следующие равенства:

$$\left.\begin{aligned} Q_1 &= MKb'_{ср}\,H_{1,0}^{3/2},\\ Q_2 &= MKb''_{ср}\,H_{2,0}^{3/2}, \end{aligned}\right\} \qquad (2-99)$$

где $M = m_{пл}\sqrt{2g}$;

K — коэффициент, учитывающий боковое сжатие.

Из этих уравнений находим:

$$b'_{ср} = \frac{Q_1}{MKH_{1,0}^{3/2}} = \frac{A_1}{K},$$

где

$$A_1 = \frac{Q_1}{MH_{1,0}^{3/2}};$$

$$b''_{ср} = \frac{Q_2}{MK_{2,0}^{3/2}} = \frac{A_2}{K},$$

где

$$A_2 = \frac{Q_2}{M H_{2,0}^{3/2}}.$$

Подставляя значение $b_{ср}$ получаем:

$$b + 0{,}8n\,H_1 = \frac{A_1}{K},$$

$$b + 0{,}8n\,H_2 = \frac{A_2}{K}.$$

Решая эту систему, имеем:

$$n = \frac{1{,}25}{K}\cdot\frac{A_1 - A_2}{H_1 - H_2} \qquad (2-100)$$

$$b = \frac{1}{K}\cdot\frac{H_1 A_2 - H_2 A_1}{H_1 - H_2}. \qquad (2-101)$$

2—36. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕПАД

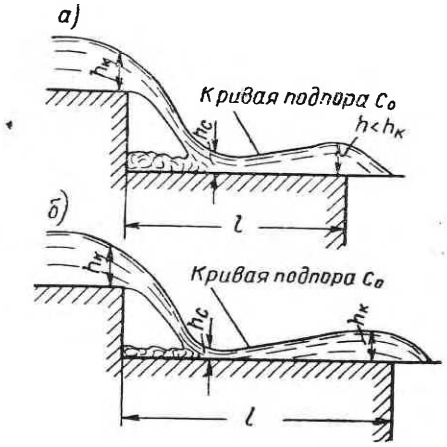
1. Перепад без водобойных стенок

Входная часть в многоступенчатом перепаде рассчитывается так же, как и в одноступенчатом перепаде, поэтому специальному расчету здесь подлежит лишь длина горизонтальной ступени перепада.

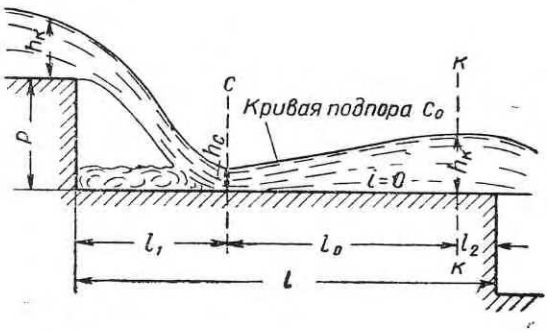
В месте падения струи на первой ступени в потоке образуется сжатое сечение с глубиной h_c. После сжатой глубины на горизонтальной ступени образуется кривая подпора типов, показанных на фиг. 2—86 и 2—87. Если длина ступени l недостаточна, то кривая подпора дает в конце ступени глубину $h<h_к$ и удельная энергия потока в концевом сечении не будет минимальной. Это приведет к накоплению кинетической энергии в потоке и может вызвать перескакивание струи через следующие ступени перепада с возможным разрушением сооружения. Поэтому длину ступени l многоступенчатого перепада без водобойных стенок принимают такой, чтобы на ней разместилась кривая подпора от глубины h_c до глубины $h_к$ с небольшим запасом, т. е.:

$$l = l_1 + l_0 + l_2,$$

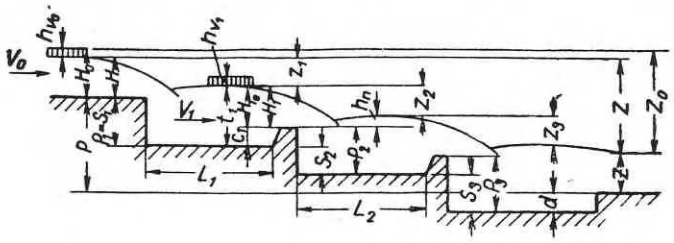
где l_1 — дальность полета струи;
l_0 — длина кривой подпора;
l_2 — запас длины ступени.



Фиг. 2—86



Фиг. 2—87



Фиг. 2—88

Проф. В. Д. Журин рекомендует для дальности полета струи применять формулу:

$$l_1 = p + h_к, \qquad (2—102)$$

а длину кривой подпора l_0 определять по упрощенной формуле:

$$l_0 = \frac{1}{i_к}(0{,}75h_к - h_c), \qquad (2—103)$$

где $i_к$ — критический уклон.

Запас длины ступени принимают $l_2 = 2h_к$.

Таким образом, полная длина ступени многоступенчатого перепада без водобойных стенок получается равной:

$$l = p + 3h_к + l_0.$$

2. Перепад с водобойными стенками (многоколодезный) (фиг. 2—88)

Наличие водобойных стенок на многоступенчатом перепаде приводит его расчет к расчету ряда одноступенчатых перепадов. Неизвестной величиной при расчете являются высота водобойной стенки и длина ступени перепада. Обычно при расчете многоступенчатого перепада применяют две расчетные схемы: 1) с одинаковыми перепадами z и 2) с одинаковой высотой ступени s.

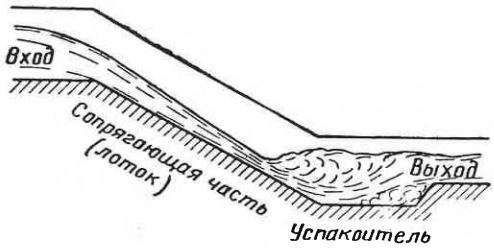
а) Первая схема. Пусть полный перепад составляет z_0, а число ступеней m, тогда перепад на каждой ступени будет $z_1 = z_2 = z_m = \frac{z_0}{m}$, где $z_0 = z + \frac{v_0^2}{2g}$.

На первой ступени и на последующие принимают $z_{1,0} = z_к = \frac{z_0}{m}$.

Для определения высоты p_1 первой стенки падения задаются рядом значений p_1, вычисляют соответствующие значения сжатой глубины h_c и взаимной с ней h_c'' и, наконец, глубины $t_1 = \sigma h_c''$, где $\sigma = 1{,}05 \div 1{,}10$ (см. п. 2—32). На фиг. 2—88 видно, что $t = H_0 + p_1 - z_{1,0}$.

Построив график $t_1 = f_1(p_1)$ по последнему уравнению (прямая линия) и $t_1 = \sigma h_c'' = f_2(p_1)$, находят точку пересечения этих двух линий $f_1(p_1)$ и $f_2(p_2)$, дающую искомое значение p_1 и t_1, после чего находят высоту водобойной стенки c (см. п. 2—33) и длину водобойного колодца приведенным выше способом.

Следующие ступени рассчитывают аналогично. При прямоугольной форме поперечного сечения перепада можно при определении c пользоваться графиками на фиг. 2—79 и 2—80.



Фиг. 2—89

б) Вторая схема. Обозначим общее падение перепада через p, тогда $s_1 = s_2 = s_m = \frac{p}{m}$; так как $p_1 = s_1 = \frac{p}{m}$, то зная p_1, находят T_0, глубины h_c и h_c'' (при помощи графика на фиг. 2—74) и $t_1 = \sigma h_c''$; затем определяют высоту водобойной стенки c_1, обеспечивающую глубину t_1.

Для следующих ступеней перепада высота стенки падения определяется из равенства:

$$p_{k+1} = s_{k+1} + c_k,$$

где k — номер ступени.

Последнюю ступень рассчитывают отдельно, исходя из условий сопряжения с горизонтом нижнего бьефа.

2—37. БЫСТРОТОКИ

Быстротоками называют сопрягающие сооружения в виде лотков с уклоном больше критического.

Быстротоки, так же как и перепады, применяют для преодоления на каналах больших разниц в отметках дна.

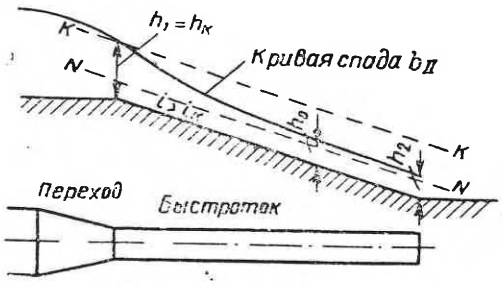
В состав быстротока входят следующие основные части (фиг. 2—89):

1) входная часть;
2) собственно быстроток (лоток быстротока);
3) успокоитель;
4) выход.

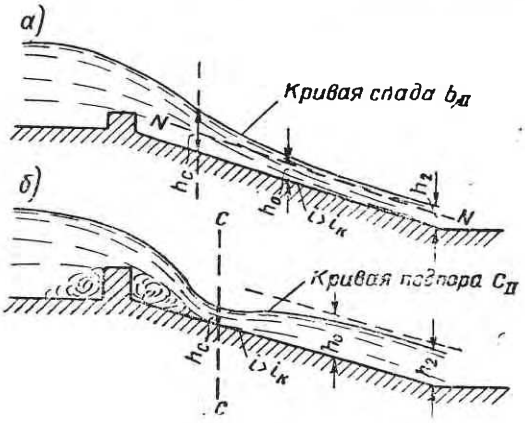
Входная часть быстротоков устраивается и рассчитывается так же, как и входная часть перепадов (см. п. 2—35).

Собственно быстроток делается в виде лотка прямоугольного или трапецоидального сечения с уклоном от $^1/_4$ до $^1/_{20}$. Ширину быстротока делают постоянной или переменной (с сужением вниз по течению).

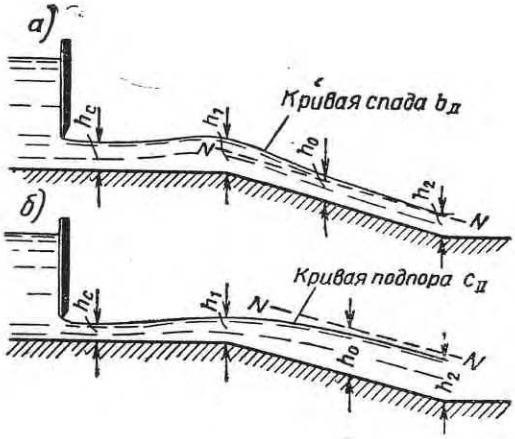
1. Быстроток с постоянной шириной по дну (фиг. 2—90)



Фиг. 2—90



Фиг. 2—91



Фиг. 2—92

На длине быстротока в зависимости от типа входной части устанавливается или кривая спада типа b_{II} или кривая подпора типа c_{II} (фиг. 2—91).

При входной части быстротока с горизонтальным дном или малым уклоном в начале быстротока устанавливается критическая глубина $h_к$, от которой пойдет кривая спада до бытовой глубины $h_0 < h_к$.

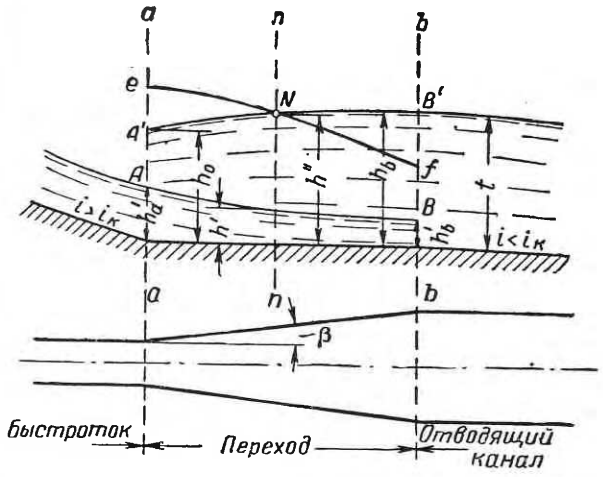
Если входная часть осуществлена в виде порога, то при $h_c > h_0$ на быстротоке будет кривая спада, а при $h_c < h_0$ будет кривая подпора типа c_{II}

Если входная часть быстротока осуществлена по схеме истечения из-под щита (фиг. 2—92), то в зависимости от глубины в конце переходного участка на быстротоке образуется или кривая спада (при $h_1 > h_0$) или кривая подпора (при $h_1 < h_0$).

Гидравлический расчет собственно быстротока заключается в нахождении глубины h_c или h_1 и построении кривой свободной поверхности на длине лотка.

2. Быстроток с переменной шириной по дну

Задача гидравлического расчета быстротока с переменной шириной по дну заключается в подборе ширины дна по длине быстротока по заданной постоянной глубине $h_0 < h_к$. Решение этой задачи было изложено в п. 2—25.



Фиг. 2—93

Успокоитель быстротока имеет назначением гашение энергии потока и создание сопряжения с нижним бьефом без опасности размыва в отводящем канале.

Сопряжение быстротока с отводящим каналом нижнего бьефа, имеющим бóльшую длину, чем быстроток, происходит при помощи расширяющегося участка, обычно с уклоном $i=0$ и небольшим углом расширения $\left(\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{8} \div \frac{1}{12}\right)$.

Возможны три основных случая сопряжения бурного потока в быстротоке со спокойным потоком в отводящем канале:

1) $h''_a > h_a$;

2) $h''_a = h_a$;

3) $h''_a < h_a$,

где h_a — глубина в начале переходного участка, соответствующая спокойному режиму;

h''_a — глубина, сопряженная с глубиной h'_a в конце быстротока.

Первый случай. $h''_a > h_a$. Сопряжение будет с отогнанным прыжком, который будет на переходном участке или в канале (фиг. 2—93).

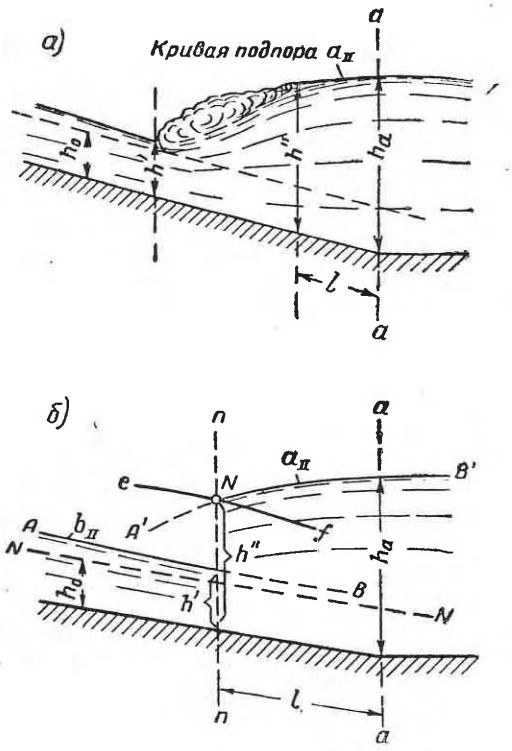
Зная положение кривой свободной поверхности при бурном состоянии (AB) и спокойном состоянии ($A'B'$), строят кривую глубин, сопряженных с глубинами кривой AB (кривая ef). Точка N пересечения кривых $A'B'$ и ef определяет собой место образования прыжка и взаимные глубины h' и h''.

Второй случай. $h''_a = h_a$. В этом случае будет критическая форма сопряжения на конце быстротока.

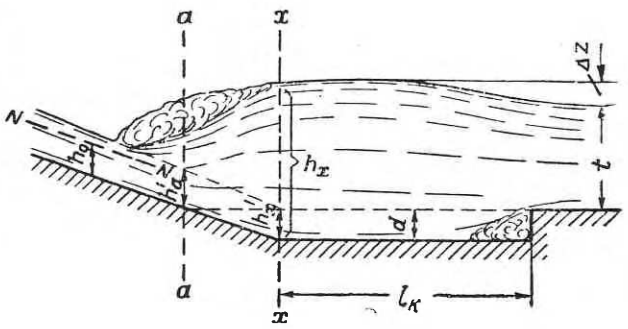
Третий случай. $h''_a < h_a$. В этом случае сопряжение будет в виде затопленного прыжка в конце лотка быстротока.

При этом место прыжка различно в зависимости от длины лотка быстротока.

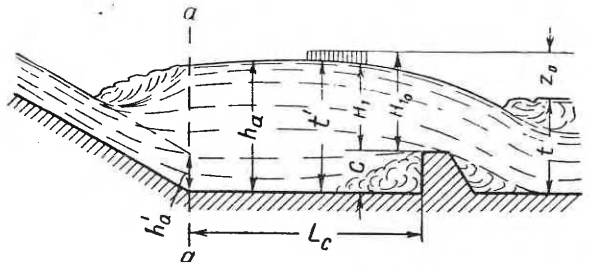
При большой длине лотка быстротока глубина в конце его h' (фиг. 2—94,*а*) будет весьма близка к нормальной глубине h_0 и расстояние прыжка от конца быстро-



Фиг. 2—94



Фиг. 2—95



Фиг. 2—96

тока определяется как длина l кривой подпора a_{II} между глубиной h'', сопряженной с h_0 и h_a.

При коротком лотке глубина $h'>h_0$, причем так как l неизвестно, то и h' и h'' неизвестны. В этом случае строят кривую подпора $A'B'$ типа a_{II} до глубины h и кривую ef сопряженных с h' глубин h''; пересечение этих кривых дает створ $n—n$, где и произойдет прыжок.

Следует всегда добиваться сопряжения быстротока с отводящим каналом путем затопленного прыжка.

При получении сопряжения первой или второй формы следует погасить избыток энергии на быстротоке либо устройством усиленной шероховатости в лотке, либо водобойным колодцем (или водобойной стенкой) в конце быстротока.

Усиленная шероховатость увеличивает глубину в лотке быстротока, в том числе и глубину в его конце h', и уменьшает сопряженную с ней глубину h''.

Если $h''<h_a$, то прыжок будет надвинут на быстроток и водобойный колодец не нужен. При $h''>h_a$ нужно устраивать водобойный колодец, глубина которого d (фиг. 2—95) должна обеспечивать выполнение равенства $h_x=\sigma h''_x$,

где h_x — глубина в водобойном колодце у конца лотка быстротока в сечении $x—x$ (фиг. 2—95);

h''_x — глубина, взаимная с глубиной h_x в сечении $x—x$;

$\sigma \approx 1{,}05 \div 1{,}10$ — коэффициент запаса.

Так как $h_x = t+d+\Delta z = \sigma h''_x$, то искомая глубина колодца $d=\sigma h''_x - t - \Delta z$, или с запасом $d=\sigma h''_x - t$.

Здесь Δz — перепад глубин при выходе из водобойного колодца.

При большой длине быстротока $h'_x=h'_a\approx h_0$ и $h''_x=h''_0$.

При малой длине быстротока h'_x и h''_x неизвестны и задача решается подбором: задавшись глубиной d, находят h'_x, h''_x и далее d, которую сопоставляют с ранее принятой и при несовпадении — пересчитывают.

Если гаситель устраивается в виде водобойной стенки (фиг. 2—96), то высота ее c должна удовлетворять условию $h_a=\sigma h''_a$.

Можно приближенно считать $h_a=t'=H_1+c$, откуда искомая высота стенки

$$c=\sigma h''_a - H_1.$$

Следует проверить не получается ли отогнанный прыжок за водобойной стенкой. Длина водобойного колодца

$$l_к \approx 0{,}8\, l_п,$$

где $l_п$ — длина прыжка, определяемая по формулам (2—85) и (2—86).

Проф. А. Н. Ахутин [2] рекомендует длину водобойного колодца определять в этом случае по формуле:

$$l_к = 3\sqrt{T_a\, d}\,, \qquad (2—104)$$

где T_a — удельная энергия в сечении $a—a$ (фиг. 2—96), отнесенная к наинизшей точке дна;

d — глубина водобойного колодца.

2—38. УЧЕТ АЭРАЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ БЫСТРОТОКОВ

В потоках с большими скоростями движения наблюдается насыщение движущейся воды воздухом, которое будет тем больше, чем больше скорость течения. Смесь

воды с воздухом называют гидросмесью. Основным фактором, влияющим на гидравлические элементы аэрированного потока, является количество содержащегося в воде воздуха, характеризуемое отношением объема воздуха к объему воды и воздуха. Это отношение называется коэффициентом воздухонасыщения и обозначается β'. Отношение объема воды к объему смеси называется коэффициентом водонасыщения β. Эти коэффициенты связаны между собой зависимостью:

$$\beta = 1 - \beta'.$$

Существующие в настоящее время приемы решения вопроса о движении аэрированных потоков основаны на следующих допущениях:

1) содержащийся в воде воздух несжимаем;

2) отсутствует скольжение пузырьков воздуха относительно воды, т. е. скорости движения пузырьков, воды и смеси одинаковы.

Эти допущения позволяют рассматривать аэрированную воду как несжимаемую среду и применять к ней законы гидравлики.

Для аэрированного потока, обозначаемого индексом a, мы будем иметь следующие основные уравнения:

$$Q_a = \omega_a v_a;$$

для обычного потока

$$Q = \omega v; \quad \omega = \beta \omega_a; \quad Q = \beta Q_a. \qquad (2—105)$$

Проф. А. А. Сабанеев считает, что потери напора при равномерном движении аэрированного потока подчиняются квадратичному закону сопротивления и к нему можно применять формулу Шези

$$v_a = C_a \sqrt{R_a i}, \qquad (2—106)$$

где C_a и R_a — соответственно коэффициент и гидравлический радиус аэрированного потока.

При этом гидравлические элементы потока при равномерном движении можно находить, как для чистой воды, но при повышенном значении коэффициента шероховатости $n' = \frac{n}{\beta}$.

Для определения скорости аэрированного потока при равномерном движении, как указывает проф. А. А. Ничипорович,[1] можно для деревянных лотков при $R_a < 0{,}3$ *м* применять эмпирическую формулу:

$$v_a = 55 R_a^{0{,}52} i^{0{,}4},$$

а для коэффициента водонасыщения

$$\beta = \frac{0{,}40}{R_a^{0{,}05} i^{0{,}26}}. \qquad (2—107)$$

Для бутовой кладки (при $i < 0{,}48$) проф. А. А. Ничипорович рекомендует следующие зависимости:

$$\left.\begin{aligned} v_a &= 37 R_a^{0{,}52} i^{0{,}4}; \\ \beta &= \frac{0{,}45}{R_a^{0{,}05} i^{0{,}26}}. \end{aligned}\right\} \qquad (2—108)$$

Для расчета неравномерного движения проф. А. А. Ничипорович предлагает рассматривать аэрированный поток, как фиктивный неаэрированный, аналогичный данному, но протекающий в стенках с повышенной шероховатостью $n' = \xi n$, причем для ξ в зависимости от уклона i рекомендуются следующие значения:

i	0,1÷0,2	0,2÷0,4	>0,4
ξ	1,33	1,33÷2,00	2,00—3,33

Меньшие значения коэффициента ξ относятся к $R_a = 0{,}1—0{,}3$, а бо́льшие значения — к $R_a < 0{,}1$ *м*.

2—39. УСИЛЕННАЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ НА БЫСТРОТОКАХ

Для уменьшения скорости и увеличения бытовой глубины на быстротоках применяют усиленную шероховатость.

Криволинейные зубья (фиг. 2—97) дают увеличение коэффициента шероховатости до $n = 0{,}122$.

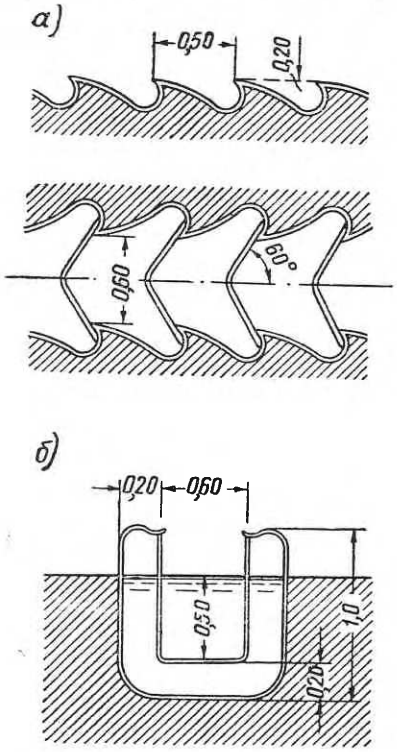
Для прямоугольных лотков с такими зубьями на основе лабораторных исследований была установлена следующая зависимость:

$$C = \frac{1}{\sqrt{0{,}0214 + \frac{0{,}00084}{R}}}, \qquad (2—109)$$

где R — гидравлический радиус.

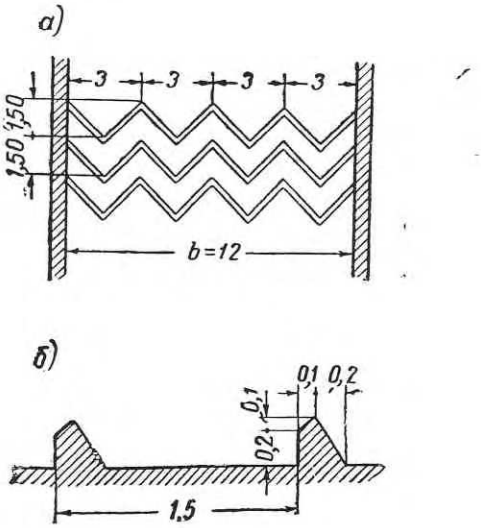
На плотоходах устраивают усиленную шероховатость в виде зигзагообразных выступов, имеющих в разрезе трапецоидальное сечение (фиг. 2—98).

При уклоне плотохода $i = 0{,}027$, высоте выступов $a = 0{,}30$ *м*, глубине воды до выступов $h = 0{,}8$ *м*, расстоя-



Фиг. 2—97

[1] А. А. Ничипорович, Быстротоки (гл. в курсе Н. И. Анисимова — Гидротехнические сооружения, т. I, 1934).



Фиг. 2—98

нии между выступами 1,5 *м* и $R=h_0$ коэффициент шероховатости имеет значение $n=0{,}068$.

Весьма хорошим примером быстротока с усиленной шероховатостью является плотоход между реками Лауцой и Даугавой (сконструированный инж. Крейслером) (фиг. 2—99).

Лоток прямоугольного сечения имеет ширину $b=2{,}66$ *м*, глубину $h=0{,}6 \div 1{,}0$ *м* и уклон $i=0{,}03$. Высота барьеров составляет $a=0{,}5$ *м*, расстояние между барьерами $l=4{,}25$ *м*; коэффициент шероховатости, по результатам наблюдений, оказался равным: $n=0{,}05$ при $\frac{a}{h}=0{,}5$ и $n=0{,}12$ при $\frac{a}{h}=0{,}8$.

Ниже приводятся данные результатов лабораторных исследований для различных типов усиленной шероховатости[1]. При этом обозначено:

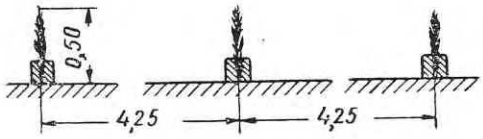
$$\frac{b}{h}=\beta \text{ и } \frac{h}{a}=\sigma.$$

а) Поперечные ребра из прямоугольных брусков (фиг. 2—100,*а*)

$$\frac{1\,000}{C}=47{,}5-1{,}2\sigma+0{,}1\beta,$$

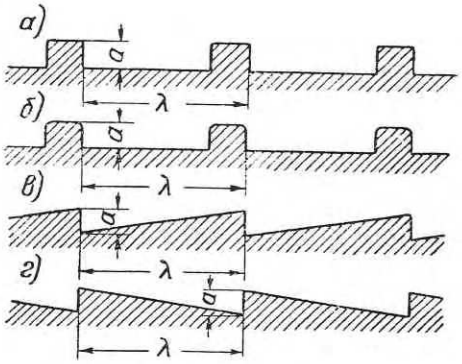
где C — коэффициент в формуле Шези.

б) Поперечные ребра из округленных брусков (фиг. 2—100,*б*)



Фиг. 2—99

[1] Е. А. Замарин, Искусственная шероховатость, Научные записки МИИВХ, 1935.



Фиг. 2—100

$$\frac{1\,000}{C}=50{,}5-3{,}3\sigma+0{,}2\beta.$$

Последние две зависимости даны для $8 \geqslant \sigma \geqslant 3$.

При уклонах, отличных от 0,15, величину $\frac{1\,000}{C}$, найденную по вышеприведенным формулам, нужно умножить на поправочный коэффициент k, взятый из табл. 2—37.

Таблица 2—37

Поправочный коэффициент k

i	0,04	0,07	0,10	0,15
k	0,9	1,0	1,06	1,0

в) Треугольные зубья, расположенные по течению (фиг. 2—100,*в*)

$$\frac{1\,000}{C}=A-0{,}67\sigma+10\sqrt[9]{\beta},$$

где величина A берется по табл. 2—38.

г) Зубья, расположенные против течения (фиг. 2—100,*г*)

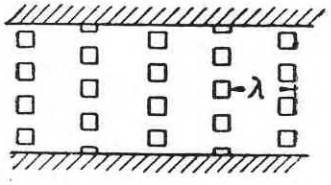
$$\frac{1\,000}{C}=A-1{,}33\sigma+10\sqrt[9]{\beta},$$

где величина A берется по табл. 2—38.

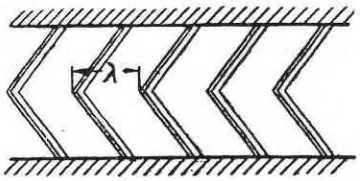
Таблица 2—38

Величины A

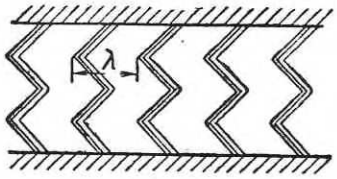
Тип зубьев \ Уклон	0,06	0,09	0,12
Зубья, расположенные по течению	19	21	22
Зубья, расположенные против течения	33	36	38



Фиг. 2—101



Фиг. 2—102



Фиг. 2—103

д) Шашки, расположенные по дну в шахматном порядке (фиг. 2—101)

$$\frac{1\,000}{C} = 52 - 5{,}1\sigma - 0{,}8\beta.$$

е) Одиночный зигзаг (фиг. 2—102)

$$\frac{1\,000}{C} = 85{,}8 - 3{,}3\sigma - 0{,}8\beta$$

$$(8 \geqslant \sigma \geqslant 3{,}5;\quad 6 \geqslant \beta \geqslant 1).$$

ж) Двойной зигзаг (фиг. 2—103)

$$\frac{1\,000}{C} = 116{,}1 - 6{,}1\sigma - 1{,}2\beta;\ (1{,}2 < \sigma < 5).$$

Для типов шероховатости «е» и «ж» при уклонах, отличных от i=0,15, величину $\frac{1\,000}{C}$ следует умножить на k (табл. 2—39).

Таблица 2—39

Значения коэффициента k

i	0,04	0,07	0,10	0,15
k	0,75	0,85	0,93	1,00

По эффективности гашения энергии типы усиленной шероховатости располагаются в таком порядке: «ж», «е», «а» и «б», «г».

Весьма эффективным типом усиленной шероховатости в лесосплавных лотках трапецоидального сечения с большим уклоном [7] оказались донные поперечные перегородки, снабженные поверху парой реек (см. гл. 33, фиг. 33—6). При R=0,4 они дают $n \approx 0{,}020$.

Гидравлический расчет усиленной шероховатости заключается в выборе такого типа ее, который обеспечивал бы скорость течения, не превышающую предельной — v_{max}.

По данным Q, i, b, v_{max} находят глубину потока h, гидравлический радиус R, отношение β и необходимое значение $\frac{1}{C}$ или коэффициент шероховатости по шкале (табл. 2—18), по которым и подбирают необходимый тип шероховатости.

2—40. КОНСОЛЬНЫЕ ПЕРЕПАДЫ

Консольный перепад обычно устраивают в конце каналов, лотков для сброса струи на возможно далекое расстояние. Консольный перепад состоит из лотка большого уклона, осуществляемого в виде консоли со струенаправляющим носком в конце ее (фиг. 2—104 и 105).

Преодолеваемое консолью падение обозначим через s_1, падение ниже перепада — через s_2, а общее падение через s:

$$s = s_1 + s_2.$$

Обозначим отношение $\frac{s_1}{s} = n$, тогда $s_1 = ns$ и $s_2 = (1-n)s$.

Из чертежа на фиг. 2—105 можно составить такое уравнение:

$$il = ns + l' \sin\theta - H; \qquad (2\text{—}110)$$

при $\theta = 0$

$$il = ns - H.$$

Уклон консоли и размеры ее поперечного сечения должны давать наибольшую скорость течения по консоли не более допускаемой v_{max}, соответствующей равномерному режиму на консоли.

Дальность полета струи с носка

$$l_1 = 2\varphi^2 ns\cos\theta\left[\sin^2\theta + \sqrt{\sin^2\theta + \frac{h\cos\theta + 2s(1-n)}{2\varphi^2 ns}}\right]. \qquad (2\text{—}111)$$

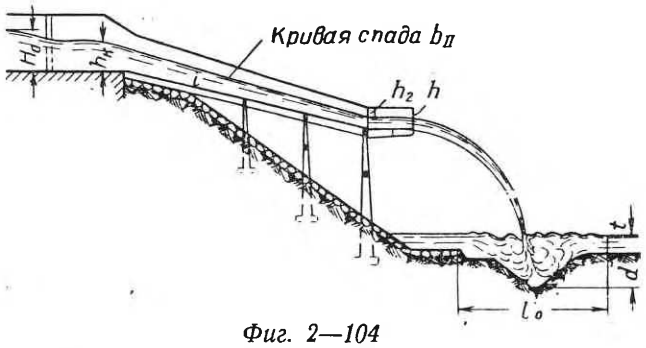
При горизонтальном носке

$$l_1 = \varphi\sqrt{2ns[h + 2s(1-n)]}. \qquad (2\text{—}111')$$

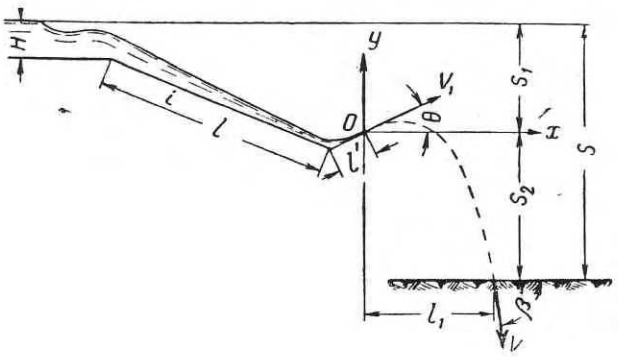
Если пренебречь величиной h, то

$$l_1 = 2\varphi\, s\sqrt{n(1-n)},$$

где φ — коэффициент, учитывающий потери напора от начального сечения до концевого сечения носка.



Фиг. 2—104



Фиг. 2—105

Исследование уравнения для l_1, выполненное инж. Б. А. Мацманом, приводит к следующим выводам [22].

При $\theta=0°$ наибольшая дальность полета струи получается при $n=0{,}50$; при $\theta=0°\div 30°$ наибольшая дальность полета соответствует значениям $n=0{,}5\div 1{,}0$.

На практике угол θ принимают от 0° до 15°, а n — около 0,50.

Обозначим через β угол, составляемый направлением струи с горизонтом при падении ее на дно (фиг. 2—106).

Тогда для горизонтальной и вертикальной составляющих скорости v будут равны:

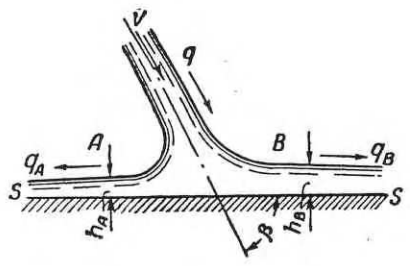
$$\left.\begin{aligned} v_x &= \varphi\sqrt{2gns}\cos\theta;\\ v_y &= -\sqrt{2g\varphi^2 ns\sin^2\theta + g[h\cos\theta + 2(1-n)s]};\\ v &= \sqrt{g\,[2s(1-n+n\varphi^2)+h\cos\theta]};\\ \operatorname{tg}\beta &= \sqrt{\frac{2\varphi^2 ns\sin^2\theta + h\cos\theta + 2s(1-n)}{2\varphi^2 ns\cos^2\theta}}. \end{aligned}\right\} \quad (2\text{—}112)$$

При $\theta=0$ и $h\approx 0$

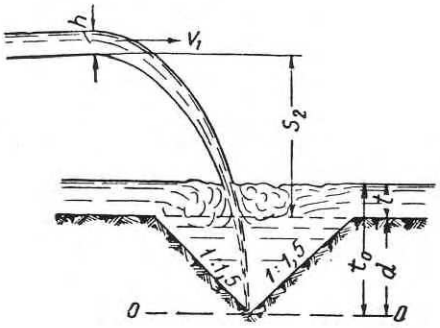
$$v=\sqrt{2gs(1-n+n\varphi^2)} \text{ и } \operatorname{tg}\beta=\frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{1-n}{n}}.$$

Вышеприведенные зависимости дают дальность l_1 полета струи, а также величину и направление скорости v у дна нижнего бьефа.

На практике распространен простой прием определения глубины воронки размыва, образуемой падающей на грунт струей; этот прием основан на том, что глубина наибольшего размыва d в нижнем бьефе рассчитывается аналогично глубине водобойного колодца и должна удовлетворять (фиг. 2—107) равенству:



Фиг. 2—106



Фиг. 2—107

$$\sigma\, h_c'' = d + t,$$

где h_c'' — глубина, сопряженная с глубиной h_c в сжатом сечении;

σ — коэффициент, характеризующий степень затопления прыжка (см. п. 2—32); $\sigma=1{,}05\div 1{,}10$.

Полная глубина воды в воронке размыва $t_0=t+d$.

Удельную энергию T_0 следует в этом случае брать в конце струенаправляющего носка и определять по формуле:

$$T_0 = s_2 + h + d + \frac{\alpha v_1^2}{2g}. \quad (2\text{—}113)$$

Воронку размыва принимают треугольной формы с откосами 1 : 1,5 или 1 : 1,75.

Ввиду того что этот прием расчета очень примитивен и не учитывает рода грунта, следует вводить некоторый запас, определяя наибольшую глубину как

$$d' = \varepsilon d,$$

где

$$\varepsilon > 1.$$

Так, например, для плотного лёсса принимают $\varepsilon=2$. Проф. М. С. Вызго рекомендует значения $\varepsilon = 2\div 2{,}7$.

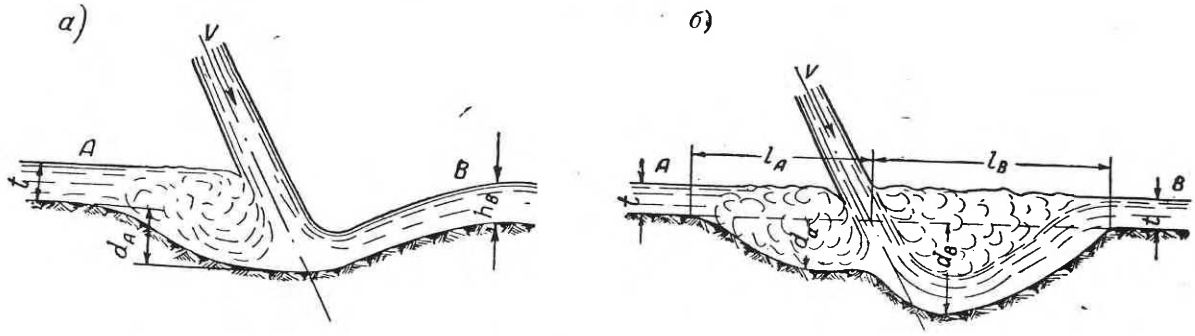
Инж. Б. А. Мацман предложил следующий прием расчета воронки размыва.

Струя, ударяясь о дно нижнего бьефа (см. фиг. 106) под углом β (β выражается в радианах), разделяется на две самостоятельные струи A и B, текущие в противоположные стороны, с расходами q_A и q_B, причем $q=q_A+q_B$. Распределение расходов Мацман принимает по такому закону:

$$q_A = \frac{\beta q}{\pi} \text{ и } q_B = q\left(1-\frac{\beta}{\pi}\right).$$

Допуская, что средние скорости в струях равны между собой и равны v, можно найти глубины потока h_A и h_B слева и справа от места удара:

$$h_A = \frac{q_A}{v} \text{ и } h_B = \frac{q_B}{v}. \quad (2\text{—}114)$$



Фиг. 2—108

Приняв h_A и h_B за сжатые глубины h_c, можно определить глубины размыва d_A и d_B аналогично приведенному выше расчету.

Инж. Б. А. Мацман устанавливает три фазы размыва:

а) интенсивность размыва струями A и B одинакова (фиг. 2—108,*а*);

б) глубина размыва струей A достигает величины d_A, достаточной для затопления струи A, и слева образуется поверхностный валец, поглощающий избыток энергии, после чего дальнейший размыв слева прекратится;

в) глубина размыва струей B достигает величины d_B, достаточной для затопления струи B, и поверхностный валец придвигается к струе (фиг. 2—108,*б*). В запас глубину размыва следует находить в предположении, что весь расход основной струи течет в направлении струи B.

Длина воронки размыва $l=l_A+l_B$.

Для глубины воронки размыва в нижнем бьефе при несвязном грунте проф. А. Н. Патрашев на основе теоретических исследований приходит к такой зависимости:

$$t_0 = 3{,}9q^{0{,}5}\left(\frac{z_0}{d_{10}}\right)^{0{,}25}, \qquad (2—115)$$

где z_0 — удельная энергия потока в конце струенаправляющего носка относительно свободной поверхности нижнего бьефа, т. е.

$$z_0 = s_2 + h - t + \frac{\alpha v_1^2}{2g}; \qquad (2—116)$$

d_{10} — действующий диаметр зерен грунта в *мм* (меньше которого в грунте 90% зерен по весу);

q — удельный расход.

Проф. М. С. Вызго, исходя из теории гидравлического прыжка, получил следующую формулу для определения глубины воронки размыва:

$$t_0 = \sigma_a\, k q^{0{,}5}\, z_0^{0{,}25}, \qquad (2—117)$$

где σ_a — коэффициент аэрации струи, определяемый по табл. 2—40;

k — коэффициент, зависящий от свойств грунта в нижнем бьефе и от угла β (см. табл. 2—40).

Если $v < v_{доп}$ $\left(\text{где } v = \frac{q}{1{,}4\,h''}\right.$, причем h'' — глубина, взаимная с глубиной h_c в сжатом сечении на уровне воды в нижнем бьефе), то $k=1{,}34$.

Если $v > v_{доп}$ (где $v_{доп}$ — допускаемая скорость), то коэффициент k принимают по табл. 2—40 в зависимости от величины угла β, выраженного в градусах.

Таблица 2—40

Значения коэффициента k

Характеристика грунта \ $\beta°$	0	12	25	40	60	90
Обычные грунты и скальные грунты (после длительного размыва)	1,4	1,7	2,0	2,4	2,7	3,3
Очень слабые грунты (плывуны)	1,4	1,8	2,4	2,8	3,3	4,5

Численные значения коэффициента аэрации σ_a следует назначать в зависимости от величины скорости v и глубины h в концевом сечении струенаправляющего носка по данным табл. 2—41.

Таблица 2—41

Значения коэффициента аэрации σ_a

h в *м* \ v в *м/сек*	5	10	15	20	25
0,2	0,70	0,64	0,62	0,61	0,60
0,5	0,88	0,71	0,66	0,63	0,62
0,7	1,00	0,90	0,70	0,66	0,64

2—3. ШАХТНЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Шахтный водосброс представляет собой водослив кругового очертания в плане (воронку), сбрасывающий воду в нижний бьеф через вертикальную шахту и отводной туннель (фиг. 2—109,*а*).

Шахтный водосброс состоит из следующих основных частей:

а) собирательной воронки с плоским гребнем (фиг. 2—109,*б*) или без плоского гребня (фиг. 2—109,*в*);

б) переходного участка — шахты переменного диаметра;

в) вертикальной шахты;

г) колена, соединяющего шахту с отводящим туннелем;

д) отводящего туннеля (горизонтального или с уклоном).

Пропускная способность шахтного водосброса определяется по формуле:

$$Q = m\,2\pi R\,\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \qquad (2—118)$$

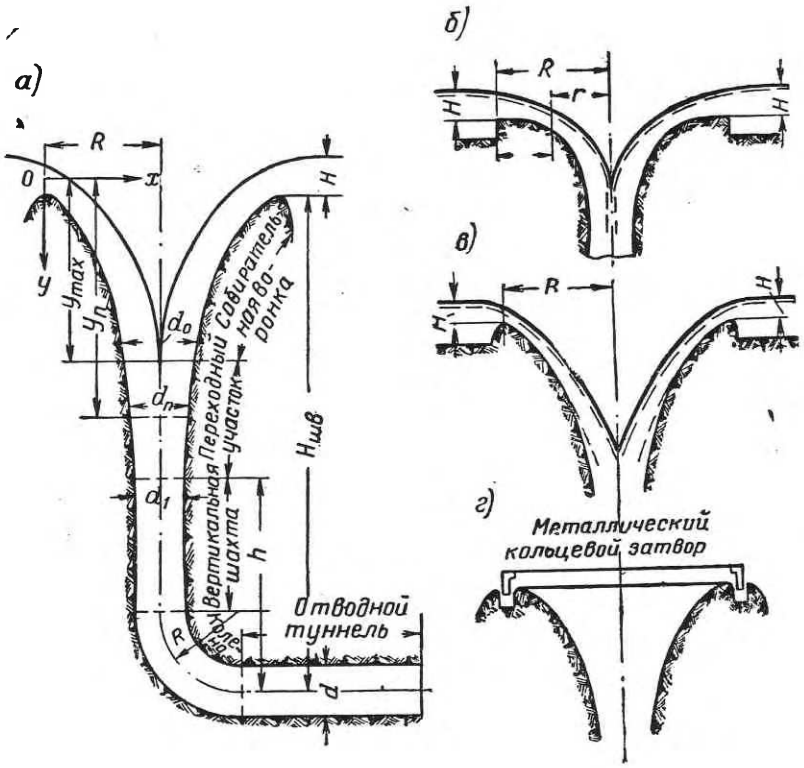
где m — коэффициент расхода;
R — радиус воронки;

$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g};$$

H — напор на гребне воронки;
v_0 — скорость подхода к воронке.

Коэффициент расхода шахтного водосброса по опытам канд. техн. наук Н. Л. Ролле [18] можно определять по формуле:

$$m = A\,\xi^{\alpha},$$



Фиг. 2—109

Таблица 2—42

Профиль входной воронки	A	α	Предельные значения ξ
1. Тонкая стенка и конически сходящаяся . . .	0,383	0,078	2,25—20
2. Параболического очертания (без подводящего участка)	0,367	0,086	5,6 —25
3. Параболического очертания с криволинейным подводящим участком при наличии противоводоворотных устройств	0,309	0,080	4,5 —25
4. Воронка с плосконаклонным коническим участком с плавным входом	0,348	0,017	4,5 —25,0
5. Воронка с плосконаклонным коническим участком без закругленного входного ребра	0,279	0	5,6 —25

где A — коэффициент, зависящий от профиля входной воронки, определяемый по табл. 2—42;
α — показатель степени, определяемый также по табл. 2—42.

2—41. РАСЧЕТ ВХОДНОЙ ВОРОНКИ

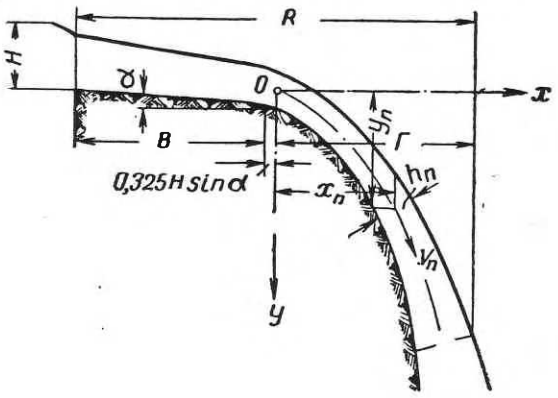
1. Воронка с плоским гребнем (по проф. А. Н. Ахутину [4])

Воронка с плоским гребнем (фиг. 2—110) применяется при условии $R \geqslant 7H$. Радиус воронки при наличии на гребне бычков определяется по формуле:

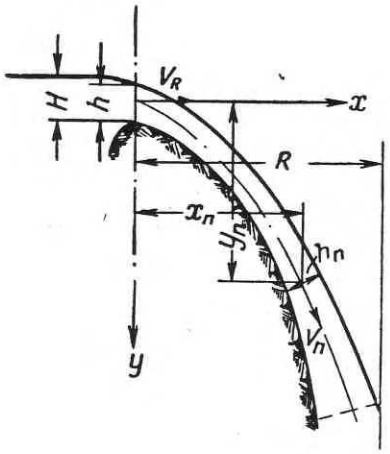
$$R = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{Q}{\varepsilon\, m\sqrt{2g}\,H^{3/2}} + n_0\, b_6\right), \qquad (2—119)$$

где n_0 — число бычков;
b_6 — ширина бычка в верхней части гребня;
ε — коэффициент сжатия, равный в среднем 0,90.

Длина плоского гребня B устанавливается в пределах $3{,}5H \leqslant B \leqslant (0{,}4 \div 0{,}5)R$, а угол наклона плоского гребня α устанавливается в пределах $\alpha = 6° \div 9°$.



Фиг. 2—110



Фиг. 2—111

Средняя скорость в конце плоского гребня $v_г$ определяется по формуле:

$$v_г = \frac{Q}{2\pi r \cdot 0{,}65 H}, \qquad (2—120)$$

где $r = R—B—0{,}325\ H \sin\alpha$;

$0{,}65H$ — глубина потока в конце плоского гребня (по данным опытов).

Очертание параболического участка получается путем построения центральной струйки и отложения от нее по нормали в обе стороны $\frac{h_п}{2}$ (где $h_п$ — толщина струи), что дает очертание параболической поверхности воронки и поверхности потока.

Ось центральной струйки строится по уравнению:

$$y = \frac{g x^2}{2 v_г^2 \cos^2 \alpha} + x \operatorname{tg} \alpha, \qquad (2—121)$$

где x изменяется в пределах от 0 до $0{,}9r$.

Толщина струи на параболическом участке

$$h_п = \frac{Q}{2\pi (r - x_п) v_п}. \qquad (2—122)$$

Средняя скорость в любой точке центральной струйки:

$$v_п = \sqrt{v_г^2 + 2g y_п + 2 v_г \sin\alpha \sqrt{2g y_п}}. \qquad (2—123)$$

Пересечение в воронке свободных поверхностей потока определяет место схода струй y_{max}, в котором движение происходит со скоростью:

$$v_y = 0{,}98 \sqrt{2g\, y_{max}}. \qquad (2—124)$$

Требуемый диаметр воронки при y_{max} определяется по формуле:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_y}},$$

где v_y — см. выше.

2. Воронка без плоского гребня

Воронка параболического очертания без плоского гребня (фиг. 2—111) применяется при условии $2H < R < 5H$.

Радиус воронки определяется по формуле (2—118).

Средняя скорость на гребне определяется по формуле:

$$v_R = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0{,}75 H}. \qquad (2—120')$$

Ось центральной струйки строится по уравнению:

$$y = \frac{g x^2}{2 v_г^2}. \qquad (2—125)$$

Средняя скорость в любой точке центральной струйки

$$v_п = \sqrt{v_R^2 + 2g y_п}. \qquad (2—126)$$

Расчет толщины струи $h_п$, построение параболического участка и определение диаметра d_0 воронки в месте схода струй производится так же, как и в воронке с плоским гребнем.

2—42. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО УЧАСТКА ШАХТЫ, ШТОЛЬНИ И ОТВОДЯЩЕГО ТУННЕЛЯ

Начальное сечение переходного участка устанавливается в зависимости от диаметра воронки d_0. Если диаметр воронки больше диаметра отводящего туннеля d, то для плавного перехода к шахте устраивается переходный участок, на котором диаметр постепенно изменяется от d_0 до d.

Для определения диаметра переходного участка вычисляется скорость в любом сечении $v_п = 0{,}98 \sqrt{2g y_п}$, после чего диаметр $d_п$ в соответствующем сечении определяется выражением:

$$d_п = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_п}}. \qquad (2—127)$$

В месте, где $d_п = d$, переходный участок или продолжается дальше или переходит в вертикальную цилиндрическую шахту. Диаметр отводящего туннеля выбирается из условий нормальной работы всей системы и проверяется на пропуск строительного расхода.

Расчет штольни и отводящего туннеля шахтного водосброса ведется на напор h, отсчитываемый от начала цилиндрического участка шахты, где $d_п = d$ (см. фиг. 2—109). Если суммарная потеря напора в штольне и отводящем туннеле составляет h_w и если $h_w = h$, то переходный участок переводится в цилиндрическую шахту с диаметром d, равным диаметру отводящего туннеля.

Если $h_w < h$, отводящий туннель будет работать неполным сечением со скоростью не более:

$$v_{о.т} = \frac{4Q}{\pi d^2} + \sqrt{2g(h - h_w)}. \qquad (2—128)$$

При значительном повышении расхода сверх расчетного шахтный водосброс может быть затопленным.

Расход при затоплении определяется по формуле:

$$Q_{зат} = Q\sqrt{\frac{H_{ш.в}}{h_w}}, \qquad (2—129)$$

где $H_{ш.в}$ — общая высота шахтного водосброса;
h_w — суммарные потери напора на всей длине штольни и отводящего туннеля при пропуске расчетного расхода Q.

Суммарные потери напора при напорном движении по длине штольни и отводящего туннеля h_w состоят из потерь по длине h_l и местных потерь h_ζ :

$$h_w = h_l + h_\zeta.$$

Потери по длине

$$h_l = \frac{4L}{C^2 d} v^2,$$

где d — диаметр отводящего туннеля;
L — длина шахты, колена и отводящего туннеля;
v — средняя скорость в отводящем туннеле при работе его полным сечением;
C — коэффициент в формуле Шези.

Местные потери:

$$h_\zeta = \sum \zeta \frac{v^2}{2g},$$

где $\sum \zeta$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Значение ζ для колена зависит от отношения $\frac{R_0}{d}$,

где R_0 — радиус закругления (см. фиг. 2—109, *а*), и принимается

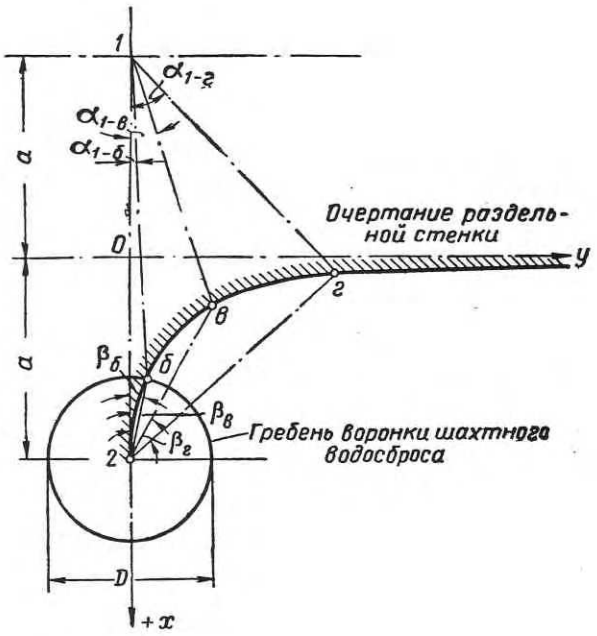
при $\frac{R_0}{d} = 2{,}5 \quad \zeta = 0{,}35,$

при $\frac{R_0}{d} = 4{,}0 \quad \zeta = 0{,}25.$

При наличии других местных потерь последние вычисляются с учетом соответствующего значения ζ.

2—43. ПОДВОД ВОДЫ К ВОРОНКЕ

При расположении воронки шахтного водосброса вблизи твердых стенок (берег, грань плотины, выемка) необходимо создать удовлетворительный подвод воды к воронке; для этого устраивают раздельную стенку, соединяющую гребень воронки с берегом; при наличии



Фиг. 2—112. Схема к расчету очертания раздельной стенки у шахтного водослива

на гребне воронки бычков ближайший к выемке бычок объединяется с раздельной стенкой.

Если ось $y—y$ (фиг. 2—112) представляет собой прямую линию вертикальной стенки берега или выемки в плане, a — расстояние от центра воронки до оси $y—y$, то очертание раздельной стенки устанавливается по предложенному канд. техн. наук А. И. Севко уравнению:

$$\beta - \alpha_1 = \gamma. \qquad (2—130)$$

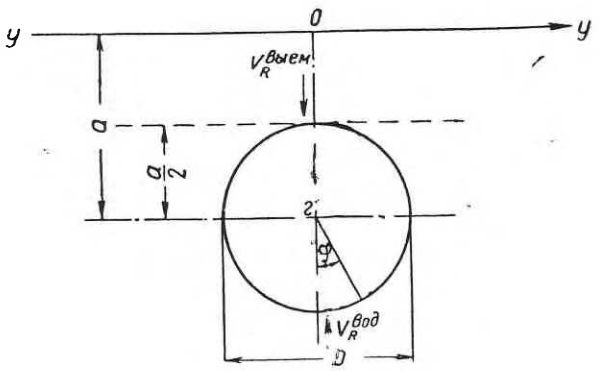
Здесь β и α_1 — углы, определяющие точку кривой раздельной стенки в плане в градусах, причем вершина угла β помещается в центре воронки, а угол α_1 в точке *1* на оси $x—x$, перпендикулярной оси $y—y$, на расстоянии $2a$ от центра воронки;
γ — постоянный угол, устанавливаемый из условий конструктивной толщины раздельной стенки на гребне (точка *б*, фиг. 2—112) и изменяющийся в пределах от 5° до 15°.

Определив γ и задаваясь различными значениями угла α_1 — от 0° до 70°, по вышеприведенному уравнению определяют соответствующие величины угла β. Пересечение линий, проведенных из точек *2* и *1*, при различных углах β и α_1 дает ряд точек, определяющих очертание раздельной стенки или выемки.

При расположении воронки вблизи жесткой стенки, имеющей прямолинейное очертание по оси $y—y$ (фиг. 2—113), скорости на гребне в различных точках его не одинаковы и могут быть определены по формулам:

$$v_{R_{вод}} = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0{,}75H} \cdot \frac{2K_1}{K_1 + K_2}, \qquad (2—131)$$

$$v_{R_{выем}} = \frac{Q}{2\pi R \cdot 0{,}75H} \cdot \frac{2K_2}{K_1 + K_2}, \qquad (2—132)$$



Фиг. 2—113. Схема расположения воронки шахтного водослива у жесткой прямолинейной стенки

где $v_{R\ вод}$ и $v_{R выем}$ — скорости на гребне со стороны водохранилища и выемки по оси $x—x$

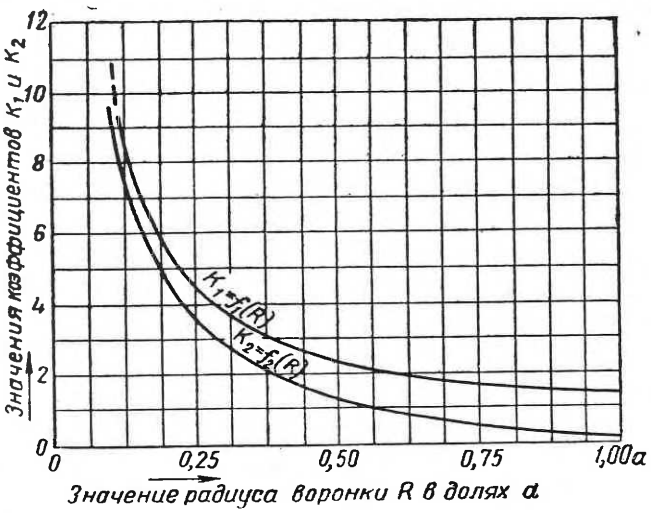
R — радиус воронки;

K_1 и K_2 — коэффициенты, определяемые по кривым на фиг. 2—114, в зависимости от радиуса воронки, выраженного в долях a.

Скорость в любой точке гребня может быть определена в функции угла φ:

$$v_{R_\varphi} = v_{R выем} + \frac{\pi - \varphi}{\pi}\left(v_{R\ вод} - v_{R выем}\right),$$

где φ изменяется в пределах от 0 до π.



Фиг. 2—114. График зависимости коэффициента K_1 и K_2 от величины относительного радиуса воронки $\frac{R}{a}$

Определив скорость v_{R_φ} в нескольких точках гребня, можно указанным выше способом построить параболический участок для каждого из выбранных сечений, определяемых углом φ. В этом случае воронка будет иметь асимметричную форму и ось шахты приблизится к выемке или жесткой стенке.

2—И. СИФОННЫЕ ВОДОСБРОСЫ

2—44. ВИДЫ СИФОННЫХ ВОДОСБРОСОВ

Сифонный водосброс представляет собой автоматически действующее сооружение, сбрасывающее воду из водохранилища в нижний бьеф через изогнутую трубу прямоугольного сечения, имеющую возвышающийся над уровнем водохранилища участок, работающую при значительном разрежении. В сифонах с затопленным выходным отверстием напор равен разности горизонтов верхнего и нижнего бьефов. В сифонах, расположенных на оголовках плотин или работающих без затопления выходного сечения, напор равен разности отметок верхнего бьефа и центра выходного отверстия.

По форме очертания трубы сифоны подразделяются:

а) на сифоны с зубцами на пороге (фиг. 2—115) типа Загэс с коэффициентом расхода $\mu \approx 0{,}7$;

б) на сифоны типа Смрчека (фиг. 2—116);

в) на сифоны с плавным очертанием трубы (фиг. 2—117) с коэффициентом расхода $\mu = 0{,}80 \div 0.83$;

г) на сифоны типа Миловича (фиг. 2—118) с коэффициентом расхода $\mu = 0{,}92$.

По соотношению сечений сифонной трубы различают сифоны:

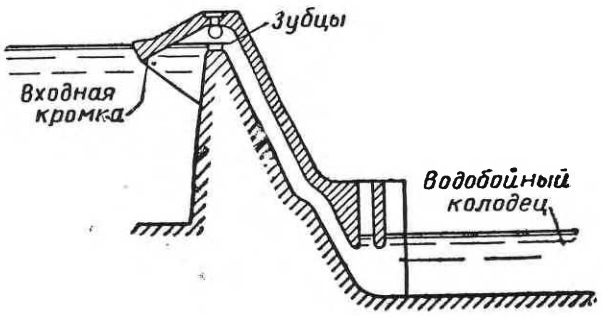
а) постоянного сечения;

б) переменного сечения.

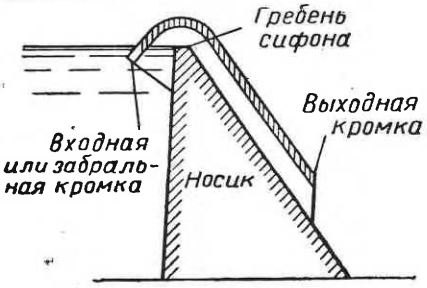
Сифонный водосброс состоит из следующих основных частей:

а) входной части сифонной трубы с переменным сечением;

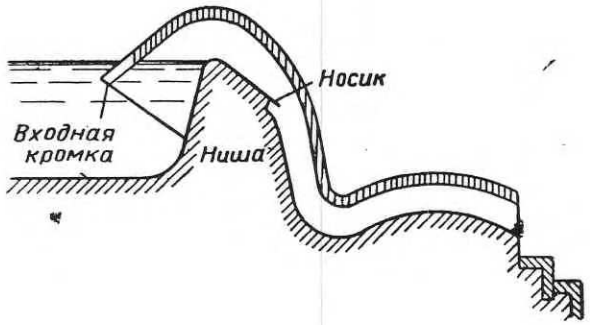
б) сифонной трубы постоянного или переменного сечения с дополнительными устройствами для ускорения самозарядки и выключения сифона;



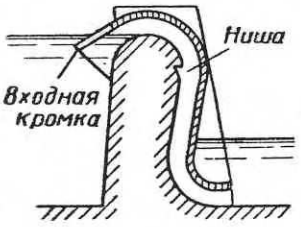
Фиг. 2—115



Фиг. 2—116



Фиг. 2—117



Фиг. 2—118

в) выходного участка сифонной трубы, оборудованного иногда различными устройствами для затопления выходного отверстия и гашения энергии выходящего потока.

При напорах до 8—10 *м* следует применять сифоны постоянного сечения или с расширением трубы к выходу.

При напорах более 10 *м* можно применять сифоны с сужением трубы к выходу. Число труб сифонной батареи и размеры их поперечного сечения определяются величиной расхода и конструктивными соображениями.

2—45. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИФОННОГО ВОДОСБРОСА

Гидравлический расчет сифонного водосброса состоит из:

а) определения пропускной способности водосброса или размеров трубы (при данном расходе);

б) определения скоростей и давлений в разных сечениях трубы;

в) определения формы сопряжения выходящей струи с нижним бьефом.

Пропускная способность Q сифонной трубы определяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \qquad (2—133)$$

где ω — площадь выходного сечения сифонной трубы;

$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$ — действующий напор;

H — геометрический напор, равный для сифонов с затопленным выходом разности уровней верхнего и нижнего бьефов, а для сифонов с незатопленным выходом — превышению горизонта верхнего бьефа над центром выходного сечения;

v_0 — скорость подхода;

μ — коэффициент расхода сифона.

Коэффициент расхода сифона μ определяется по формулам:

а) при затопленном выходном отверстии:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{k_m^2 + \sum \zeta k_n^2}}; \qquad (2—134)$$

б) при истечении в атмосферу:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \zeta k_n^2}}, \qquad (2—135)$$

где $\sum \zeta k_n^2$ — сумма всех коэффициентов местных сопротивлений и на трение по длине трубы, отнесенных к выходному сечению трубы;

k_n — отношение площади выходного сечения ω к площади рассматриваемого сечения ω_n, т. е. $k_n = \frac{\omega}{\omega_n}$.

$$k_m = \frac{\omega}{\omega_к};$$

$\omega_к$ — площадь живого сечения нижнего бьефа.

Для трубы постоянной ширины (b=const)

$$k_n = \frac{a}{a_n},$$

где a и a_n — высота выходного и рассматриваемого сечений.

Коэффициент сопротивления входа в сифонную трубу, отнесенный к сечению горла сифона, равен $\zeta_{вх}=0{,}1$.

Коэффициент сопротивления на закруглениях в трубе прямоугольного сечения определяется по формуле:

$$\zeta_з = \frac{L}{4R}\left[0{,}124 + 0{,}274\left(\frac{a}{R}\right)^{3{,}5}\right] = \frac{LA}{4R}, \qquad (2—136)$$

где L — длина закругления по оси;

R — радиус закругления.

Величина в прямых скобках (A) в зависимости от отношения $\frac{a}{R}$ дается в табл. 2—43.

При $\frac{a}{R} \leqslant 0{,}25$ коэффициент сопротивления на закруглении $\zeta_з = 0$.

Таблица 2—43

Значения величины A

a/R	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
A	0,13	0,18	0,25	0,40	0,64	1,01	1,55	2,27	3,23

Коэффициент сопротивления на трение по длине сифонной трубы или ее отдельных участков находится по формуле:

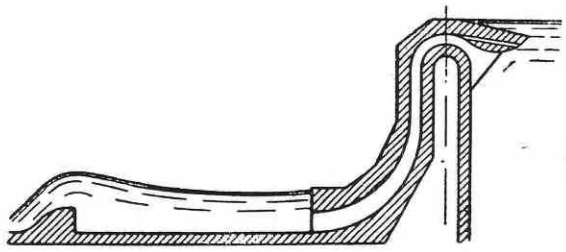
$$\zeta_{тр} = \frac{2gL}{C^2 R},$$

где L — длина участка трубы;

R — гидравлический радиус;

C — коэффициент Шези;

g — ускорение силы тяжести.



Фиг. 2—119

При переменном сечении трубы величины R и C берутся для среднего участка с площадью поперечного сечения $\omega_{ср}=ba_{ср}$. Тогда средний коэффициент сопротивления по длине:

$$\zeta'_{тр}=\frac{2gL}{C^2_{ср}\,R_{ср}}.$$

Коэффициент сопротивления на выход при затопленном выходном сечении определяется по формуле:

$$\zeta_{вых}=\left(1-\frac{\omega^2}{\omega^2_к}\right)=\left(1-k^2_m\right),$$

где

$$k_m=\frac{\omega}{\omega_к}.$$

Коэффициент сопротивления носика при расположении его на изгибе трубы без сужения последней определяется, как для закругления. При отсутствии изгиба трубы и наличии сужения коэффициент сопротивления определяется, как для случая местного сужения потока (табл. 2—44).

Таблица 2—44

Коэффициенты сопротивления сужения

ω_2/ω_1	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\zeta_{суж}$	0,50	0,50	0,42	0,34	0,25	0,15	0,0

В частном случае, при постоянном сечении трубы для напоров примерно до 10 *м*, действующий напор с учетом скорости подхода H_0 составляет:

для сифона с колодцем

$$H_0=\left(k^2_m+\Sigma\,\zeta\,k^2_n\right)\frac{v^2}{2g};$$

для сифона с выходом в атмосферу

$$H_0=\left(1+\Sigma\,\zeta\,k^2_n\right)\frac{v^2}{2g},$$

где v — средняя скорость в выходном сечении трубы ($v=v_{вых}$).

Сифон конструкции проф. А. Я. Миловича по гидравлическим свойствам является наилучшим (фиг. 2—119).

Во входной части сифона имеется воздухоподводящая труба, направление которой в месте выхода совпадает с направлением трубы сифона.

Коэффициент расхода сифона Миловича определяется по формуле:

$$\mu=\frac{Q}{\omega_г\sqrt{2g\,(H+\Delta h)}},\qquad(2—137)$$

где $\omega_г$ — площадь живого сечения в начале трубы с постоянным сечением, называемом горлом сифона;

H — напор, равный разности уровней верхнего и нижнего бьефов;

Δh — так называемый эффект расширения трубы, определяемый (на основе теории всасывающих труб и турбин) по формуле:

$$\Delta h=a\Delta H=\frac{m^2-1}{q\omega^2_{вх}\,m^2}Q^2,\qquad(2—138)$$

где

$$m=\frac{\omega}{\omega_{вх}}.$$

Сифон проф. А. Я. Миловича, по данным опытов канд. техн. наук В. И. Туманяна [20], дает коэффициент расхода, на 20—25% больший, чем сифоны других систем (достигает величины 0,92).

2—46. ДАВЛЕНИЕ В СИФОННОМ ВОДОСБРОСЕ

При расчете сифона следует определять величину среднего вакуума в сечении на гребне, причем этот вакуум не должен превышать 7,5—8,0 *м* с учетом положения сифонного водосброса над уровнем моря, т. е. абсолютное давление не должно быть менее 2,0—2,5 *м*.

Среднее давление в любом сечении сифона на оси трубы определяется по формуле:

$$\frac{p_n}{\gamma}=\frac{p_a}{\gamma}+h_1-z_1\pm z_n+\frac{v^2_0}{2g}-\frac{v^2_n}{2g}\left(1+\sum_1^n\zeta\,k^2_n\right),\qquad(2—139)$$

где $\frac{p_n}{\gamma}$ — среднее давление в рассматриваемом сечении в *м* вод. ст.;

$\frac{p_0}{\gamma}$ — атмосферное давление в *м*;

v_0 — скорость подхода воды ко входу в сифон;

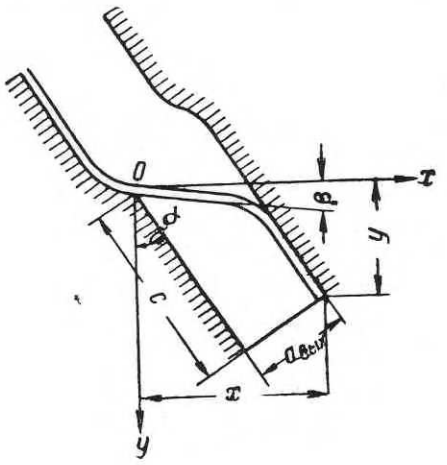
h_1 — превышение горизонта верхнего бьефа над гребнем сифона;

z_1 — расстояние от центра входного отверстия до горизонтальной оси, проходящей через гребень сифона;

z_n — расстояние от центра рассматриваемого сечения до оси, проходящей через гребень (положительное или отрицательное в зависимости от того, лежит ли центр рассматриваемого сечения ниже или выше этой оси);

$\sum_1^n\zeta k^2_n$ — суммарный коэффициент сопротивления участка от входа до рассматриваемого сечения.

Давление с учетом распределения скоростей в криволинейном потоке по закону площадей можно точнее



Фиг. 2—120

определять по формуле, предложенной канд. техн. наук В. И. Туманяном [20]:

$$\frac{p}{\gamma} = E_2 - \frac{a^2}{2} - \frac{r_0 \; v_n^2 a^2 \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1\right)}{4g\, r_2^2 \left(\ln \frac{r_2}{r_1}\right)^2} \left[1 + \left(\sum \zeta\right)_{2-3}\right], \quad (2-140)$$

где

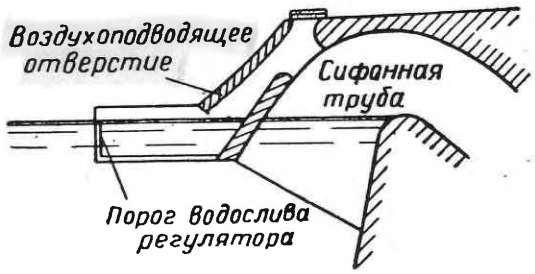
$$E_2 = \frac{p_a}{\gamma} \mp \Delta_1 - \alpha \left(\sum \zeta\right)_{1-2} \frac{v_n^2}{2g};$$

Δ_1 — разность отметок горизонта верхнего бьефа и гребня водослива сифона;

$\alpha \left(\sum \zeta\right)_{1-2} \frac{v_n^2}{2g} = h_{вх} + h_{суж}$ — сумма потерь на вход в трубу сифона и на сужение в забрале сифона;

v_n — средняя скорость в рассматриваемом сечении;

r_0 — радиус закругления оси трубы;



Фиг. 2—121

r_1 — радиус закругления гребня водослива;

r_2 — радиус внешней поверхности сифона;

a — высота сечения сифонной трубы;

$(\Sigma\zeta)_{2-3}$ — сумма местных потерь на участке *2—3*.

Величина спада горизонта верхнего бьефа перед сифоном определяется по формуле:

$$\delta z = \frac{v_{вх}^2 - v_0^2}{2g}. \quad (2-141)$$

При устройстве в сифонной трубе носика для отбрасывания струи к наружной стенке трубы (фиг. 2—120) угол наклона носика при заданном расстоянии его от выходного сечения или до уровня нижнего бьефа определяется уравнениями:

$$2v^2 \cos\beta\,(y\cos\beta - x\sin\beta) = gx^2; \quad (2-142)$$

$$y = l\cos\alpha - a_{вых}\sin\alpha; \quad (2-143)$$

$$x = l\sin\alpha + a_{вых}\cos\alpha. \quad (2-144)$$

Средняя скорость в сифоне

$$v = \varphi\sqrt{2gz},$$

где $\varphi = 0{,}6 \div 0{,}8$;

z — расстояние от гребня оголовка до носика по вертикали;

g — ускорение силы тяжести.

Величину y можно принимать в пределах от 0,3 H до 0,75 H (где H — напор в сифоне); наименьшие потери напора, вызываемые носиком, получаются при $y = (0{,}4 \div 0{,}5)H$.

Выключение сифона при прекращении притока воды происходит при помощи специального воздухоподвода (фиг. 2—121).

2—К. ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ [1]

2—47. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Приведенные в данном разделе способы гидравлического расчета применимы для различных водопропускных сооружений, как, например, трубчатых и туннельных водовыпусков, труб под насыпями дорог и каналов, донных и глубинных отверстий плотин, различных промывных труб, строительных туннелей и т. д.

Эти способы расчета даны на основе анализа и обобщения ряда лабораторных и теоретических исследований, проведенных в СССР за последние годы различными авторами (Д. И. Куминым, П. Ф. Кочеулловым, А. И. Шварцем, В. С. Муромовым и др.). Наиболее полно при этом использованы исследования доц. Н. П. Розанова в институте Водгео и МИСИ имени В. В. Куйбышева.

Расчеты приводятся для труб безнапорных (см. фиг. 2—122, 2—126) и с затопленным входом, т. е. так называемых полунапорных (см. фиг. 2—149), у которых входное сечение затоплено со стороны верхнего бьефа, а в самой трубе поток протекает со свободной поверхностью, и напорных (см. фиг. 2—152, 2—155).

Для безнапорных и полунапорных труб наиболее обоснованы экспериментальными и теоретическими данными расчеты для труб прямоугольного поперечного сечения; приведенные методы расчета безнапорных и полунапорных труб непрямоугольных «замкнутых» поперечных сечений (круглого, овоидального и т. д.) менее точны, так как такие трубы изучены еще мало и в области их расчета имеются еще неясные и спорные вопросы (о существовании зоны «двузначных глубин» при равномерном режиме, о возможности применения основного уравнения критических глубин при больших наполнениях и т. д.).

[1] Данный раздел написан ст. научн. сотр. канд. техн. наук Н. П. Розановым.

БЕЗНАПОРНЫЕ ТРУБЫ

2—48. КОРОТКИЕ НЕЗАТОПЛЕННЫЕ ТРУБЫ И ОТВЕРСТИЯ В ТОЛСТОЙ СТЕНКЕ

1. Критерии затопления

Незатопленными следует считать трубы[1], работающие в условиях, при которых уровень нижнего бьефа не влияет на расход через трубу; в противном случае трубы будут затопленными.

а) При уклоне трубы $0 \leqslant i < i_к$ ориентировочно можно принимать, что труба будет незатопленной, если

$$h_п \leqslant \sim (1{,}2 \div 1{,}25)\, h_к \text{ или } h_п \leqslant \sim (0{,}75 \div 0{,}77) H_0, \quad (2—145)$$

где $h_п$ — подтоп, т. е. разность отметок горизонта нижнего бьефа и дна в выходном сечении трубы (фиг. 2—122);

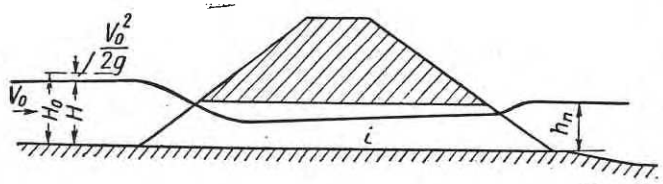
$h_к$ — критическая глубина для трубы (см. п. 2—19);

H_0 — напор над порогом трубы с учетом скорости подхода.

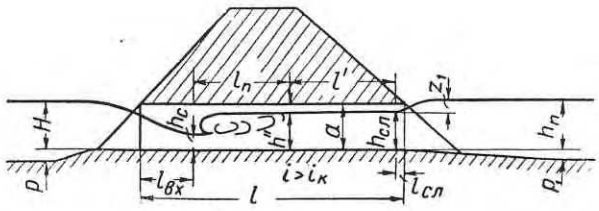
Зависимости (2—145) получены при $i \approx 0$.

б) При уклоне трубы $i > i_к$ для небольших относительных длин труб [порядка $l \leqslant (8 \div 15) H$] и уклонов, близких к критическим, для определения условий, при которых труба будет незатопленной, ориентировочно можно пользоваться зависимостями (2—145), в общем же случае при трубах прямоугольного поперечного сечения (фиг. 2—123) можно для этой цели рекомендовать следующий приближенный способ.

При заданном типе входного оголовка трубы принимается соответствующий коэффициент расхода m (см. ниже, п. 5—8). Для этого значения m и соответствующего значения $\sigma = \dfrac{bH}{B(H+p)}$* [где b — ширина (отверстие) трубы; B — ширина верхнего бьефа; p — высота порога со стороны верхнего бьефа; H — напор] по графику фиг. 2—124, построенному по данным исследований



Фиг. 2—122



Фиг. 2—123

Д. И. Кумина, определяется относительная сжатая глубина $\dfrac{h_c}{H_0}$, после чего, зная H_0, подсчитывают и h_c.

Можно определять h_c и при помощи аналогичного графика, приведенного на фиг. 2—125, получая с графика отношение $\dfrac{h_c}{h_к}$

Далее следует определить глубину h'' гидравлического прыжка, сопряженную с h_c **.

Для безнапорной трубы необходимо, чтобы h'' было меньше высоты трубы a, так как в противном случае для затопления ее понадобится такая глубина подтопа $h_п$, которая уже заставит трубу работать напорно.

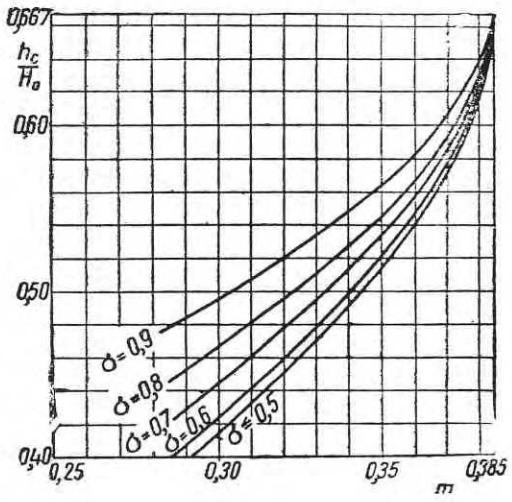
Далее следует определить длину прыжка $l_п$.

Зная длину трубы l, длину прыжка $l_п$ и определив длины участков входа $l_{вх}$ и слива $l_{сл}$ (фиг. 2—123) согласно указаниям п. 2, можно найти и расстояние l' между глубинами h'' и $h_{сл}$. Обычно без большой погрешности при этом можно принять:

$$h_{сл} \approx h'' + il'. \quad (2—146)$$

Более точно глубина $h_{сл}$ определяется путем построения кривой свободной поверхности на участке между глубинами h'' и $h_{сл}$ методами, известными из теории неравномерного движения (см. п. 2—22). Далее подбором по соответствующему графику Д. И. Кумина (фиг. 2—145, 2—146, 2—147) (см. ниже п. 2—50) находят перепад восстановления z_1 и глубину $h_п$. Если эта глубина будет не меньше фактической глубины в нижнем бьефе над порогом выходного сечения, то труба будет незатопленной.

При трубах непрямоугольного сечения ход расчета остается таким же, но расчетные зависимости для h_c, h'', $l_п$ и z_1 изменяются. Так как такие трубы должным образом не исследованы, приходится пока прибегать к довольно грубо приближенным приемам, например:

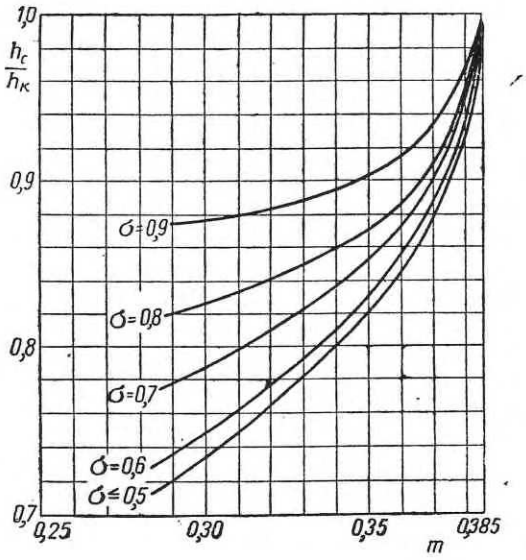


Фиг. 2—124. График зависимости $\dfrac{h_c}{H_0} = f(m, \sigma)$

[1] Приводимые для небольших относительных длин труб данные пригодны и для расчета отверстий малых мостов.

* При непрямоугольном сечении русла в верхнем бьефе следует принимать $\sigma = \dfrac{bH}{\Omega}$, где Ω — площадь живого сечения русла в верхнем бьефе перед трубой.

** В последнее время канд. техн. наук Г. И. Косяковой проведены исследования гидравлического прыжка (сопряженные глубины, длина прыжка) в руслах с большим уклоном дна (до 0,32)



Фиг. 2—125. График зависимости $\frac{h_c}{h_к} = f(m, \sigma)$

1) при определении h_c использовать графики фиг. 2—124 и 2—125, принимая вместо $\frac{h_c}{H_0}$ или $\frac{h_c}{h_к}$ значения $\frac{\omega_c}{\omega_{н_0}}$ или $\frac{\omega_c}{\omega_к}$ т. е. вводя вместо глубин — площади живых сечений при соответствующих наполнениях, а также полагая $\sigma = \frac{\omega_н}{\Omega}$;

2) перепад восстановления z_1 определять, пользуясь зависимостью:

$$\frac{Q^2}{g}\left(\frac{1}{\omega_{сл}} - \frac{1}{\Omega_{н.б}}\right) = \Omega_{н.б}\, y_{н.б} - \Omega'_{н.б}\, y'_{н.б}, \quad (2—147)$$

где Q — расход;
g — ускорение силы тяжести;
$\omega_{сл}$ — площадь живого сечения при глубине $h_{сл}$;
$\Omega_{н.б}$ — полное живое сечение в нижнем бьефе;
$\Omega'_{н.б}$ — живое сечение в нижнем бьефе, соответствующее уровню в конце трубы;
$y_{н.б}$ и $y'_{н.б}$ — глубины погружения центров тяжести сечений $\Omega_{н.б}$ и $\Omega'_{н.б}$

2. Предельные длины коротких труб

Короткими будут такие незатопленные с нижнего бьефа трубы, у которых длина трубы не оказывает влияния на пропускную способность:

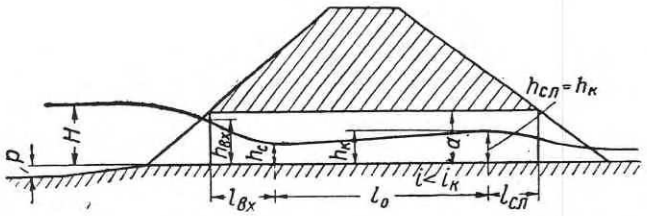
а) При уклоне трубы $i \approx 0$ короткой будет труба, длина которой удовлетворяет условию:

$$4H \leqslant l \leqslant (64 - 163m)\, H, \quad (2—148)$$

где H — напор (см. фиг. 2—122);
m — коэффициент расхода [см. формулы (2—155) или (2—156)];
или

$$4H \leqslant l \leqslant (106 - 270m)\, h_к, \quad (2—149)$$

где $h_к$ — критическая глубина в трубе.



Фиг. 2—126

б) При уклоне $0 < i < i_к$, приближающемся к $i_к$ значения верхнего предела l по формулам (2—148), (2—149) следует увеличить примерно на 30%.

в) При уклоне $i > i_к$ и $l \geqslant 4H$ коэффициент расхода не зависит от длины трубы, т. е. последняя в гидравлическом отношении работает как «короткая», и, следовательно, в этом случае нет различия между «короткой» и «длинной» трубой.

г) В общем случае для определения верхнего предела для коротких труб следует при заданных условиях определять длину кривой подпора l_0 (фиг. 2—126) между глубинами h_c и $h_к$.

При этом глубину h_c можно определять по графикам фиг. 2—124 и 2—125 (а при непрямоугольном поперечном сечении трубы, как и раньше, приближенно принимая вместо $\frac{h_c}{h_к}$ или $\frac{h_c}{H_0}$ значения $\frac{\omega_c}{\omega_к}$ или $\frac{\omega_c}{\omega_{н_0}}$); критическую глубину — соответственно по формулам (2—57) или (2—53) (при непрямоугольном поперечном сечении трубы), а длина кривой подпора l_0 в трубе постоянной ширины определится одним из методов построения кривых свободной поверхности при неравномерном движении потока (см. п. 2—22).

Предельная длина короткой трубы будет: $l_0 + l_{вх} + l_{сл}$ (фиг. 2—126).

При этом на основании опытов Водгео можно принять (при $0 \approx i < i_к$)*:

$$l_{вх} \approx 53{,}3\,(0{,}385 - m)\, h_к \approx 32\,(0{,}385 - m)\, H; \quad (2—150)$$

$$l_{сл} \approx 2h_к \approx 1{,}2H. \quad (2—151)$$

При прямом уклоне трубы i, заметно отличающемся от нулевого, значения $l_{вх}$ по формуле (2—150) следует помножить на поправочный коэффициент δ:

$$\delta \approx 30i + 1. \quad (2—152)$$

Для более точного учета влияния уклона трубы $i > 0$ на $l_{вх}$ можно пользоваться формулой:

$$l_{вх} \approx (680i + 53{,}3)\,(0{,}385 + 0{,}63i - m)\, h_к \approx$$
$$\approx (420i + 32)\,(0{,}385 + 0{,}63i - m)\, H. \quad (2—153)$$

К такому определению верхнего предела для коротких труб следует прибегать в особых случаях, например, при большой шероховатости трубы; для обычных же случаев вполне приемлемы приближенные эмпирические формулы (2—148) и (2—149).

* При длинных трубах $l_{сл} \approx 3{,}3\, h_к \approx 2H$, а при $i > i_к$: $l_{сл} \approx (0 \div 0{,}8) h_к$; значения $l_{вх}$ и в этих случаях ориентировочно можно принимать по формулам (2—150) и (2—152), а точнее по (2—153).

3. Предельные длины труб, работающих как отверстие в толстой стенке

Для отверстий в толстой стенке

$$l < 4H. \qquad (2—154)$$

К ним обычно относятся отверстия малых мостов, которые иногда в гидравлическом отношении могут быть и короткими трубами.

4. Определение критического уклона

Критический уклон для трубы определяется по п. 2—20. Для трубы прямоугольного поперечного сечения $i_к$ можно определять по графику $i_к = f(Q, b, n)$, приведенному на фиг. 2—127. При этом Q—расход в $м^3/сек$, b — отверстие трубы в метрах, n — коэффициент шероховатости.

5. Общие формулы пропускной способности

Расчет пропускной способности трубы или отверстия малого моста прямоугольного поперечного сечения (определение расхода Q) в случае, если заданы отверстие b и полный напор H_0*, или определение отверстия b при заданных Q и H_0, производится по формуле:

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \qquad (2—155)$$

где все обозначения прежние.

В случае непрямоугольного сечения сооружения вместо формулы (2—155) можно приближенно применить формулу проф. А. А. Угинчуса [24]:

$$Q = m_к b_к \sqrt{2g}\, H_0^{3/2}, \qquad (2—156)$$

где $b_к = \frac{\omega_к}{h_к}$ — средняя ширина потока в сечении с критической глубиной;

$m_к$ — коэффициент расхода; остальные обозначения прежние.

Для быстрого определения $b_к$ различных поперечных сечений можно воспользоваться графиком, приведенным на фиг. 2—128.

6. Учет несовершенства сжатия потока

Учесть несовершенство сжатия потока в значениях коэффициентов расхода m формулы (2—155) и коэффициентов $m_к$ формулы (2—156) для случая нулевого уклона $i=0$ можно по приближенной формуле Д. И. Кумина:

$$m(\text{или } m_к) = m_\sigma + (0{,}385 - m_\sigma)F_\sigma, \qquad (2—157)$$

где m_σ — коэффициент расхода, зависящий от очертания стенок входного оголовка трубы, выбираемый согласно указаниям п. 7;

$$F_\sigma = \frac{\sigma}{3 - 2\sigma};$$

$$\sigma = \frac{\omega_н}{\Omega};$$

$\omega_н$ — сечение трубы, вычисляемое при глубине, равной напору над порогом H;

Ω — площадь живого сечения подводящего русла.

* В подавляющем большинстве случаев скоростью подхода представляется возможным пренебречь и принять $H_0 = H$.

7. Значения коэффициентов расхода при $i \approx 0$ для коротких труб

Значения коэффициентов расхода m_σ формулы (2—157) для прямоугольных коротких труб с уклоном $i \approx 0$ приведены ниже, в табл. 2—45.

При этом для входного оголовка № 8 (раструбного с вертикальными неныряющими стенками) при $\vartheta = 45°$ (см. схему в табл. 2—45) коэффициент расхода следует определять по формуле:

$$m_\sigma = 0{,}310 + 0{,}024\left(2{,}60\sqrt{\frac{s}{b_1}} - \frac{s}{b_1}\right), \qquad (2—158)$$

где все обозначения указаны на схеме в табл. 2—45.

Для оголовка № 9 (раструбного с вертикальными стенками, доходящими до берегов) рекомендуется формула:

$$m_\sigma = 0{,}310 + 0{,}065\cos^{1{,}5}\vartheta. \qquad (2—159)$$

Те же значения коэффициентов m_σ, указанные в табл. 2—45, можно без большой погрешности принимать для непрямоугольных труб, учитывая при этом, что для сравнительно «плавных» оголовков (№ 5—11 табл. 2—45) при наличии неплавного сопряжения открылков с трубой, например, при наличии выступов $A—A$ при сопряжении круглой трубы с раструбным оголовком (фиг. 2—140), значения коэффициентов m_σ, указанные в табл. 2—45, надо снижать примерно на 3%.

8. Учет влияния уклона трубы на коэффициент расхода

По данным опытов Института Водгео, ориентировочно можно принимать, что при уклонах $i>0$ для прямоугольных труб коэффициент расхода, определенный для $i=0$ (см. в пп. 6 и 7), на каждую 0,01 увеличения уклона по сравнению с нулевым уклоном следует увеличивать для наименее плавных оголовков на 3%, для наиболее плавных на 2%.

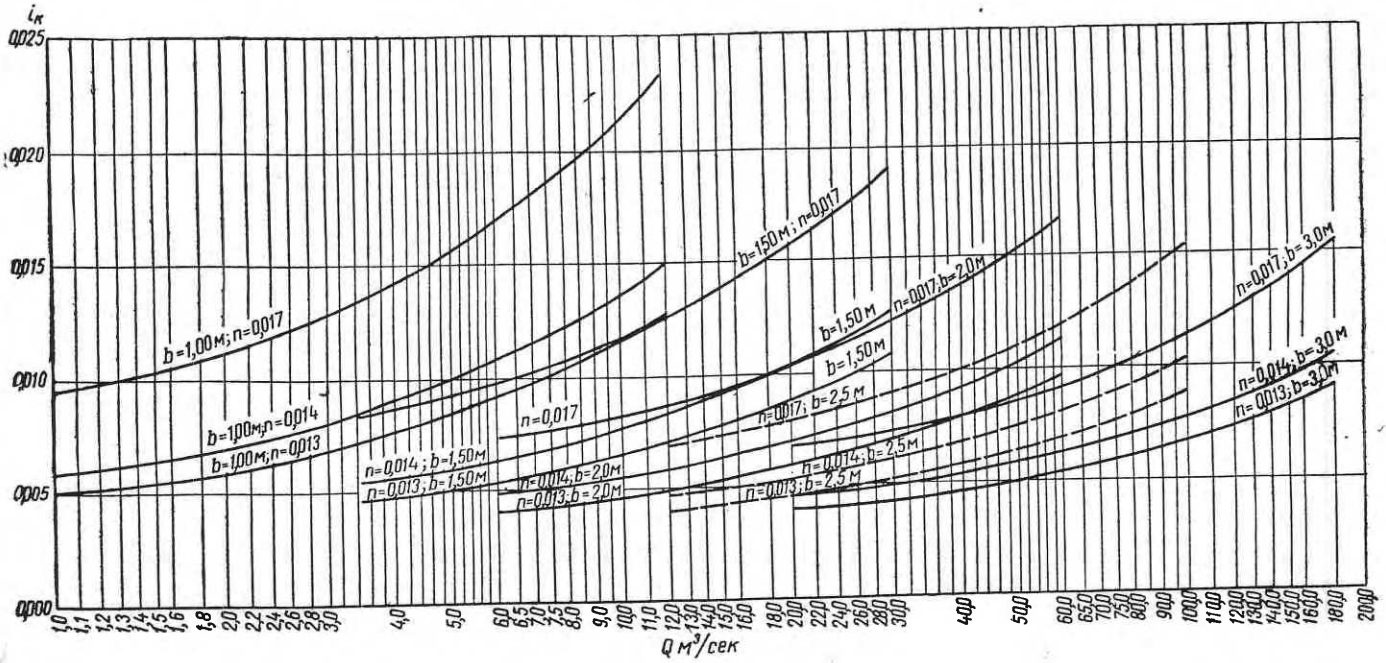
Для труб поперечных сечений, значительно отличающихся от прямоугольного, например, круглых, это увеличение следует принимать примерно в 1% на каждую 0,01 уклона.

9. Коэффициенты расхода отверстий в толстой стенке

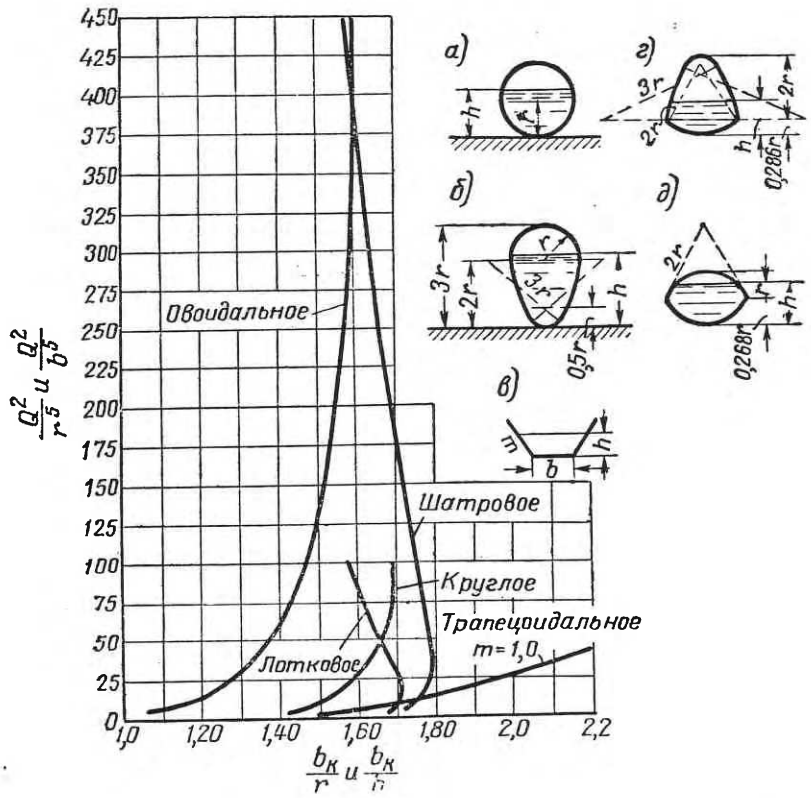
Для отверстий в толстой стенке, т. е. при $l<4H$, значения коэффициентов расхода, определенные, как указано в пп. 6, 7, 8, следует увеличить в среднем примерно на 2—3%.

10. Графики пропускной способности коротких труб

Пропускная способность прямоугольных коротких безнапорных труб может быть определена и при помощи графиков, приведенных на фиг. 2—141, по нижним частям кривых—ниже горизонтальных черточек. Графики составлены для $i=0$, оголовков № 4 и 6 и $\sigma=0$. В других случаях расход Q, определенный по графику, следует умножить на $\frac{m}{m_\sigma}$, где m — коэффициент расхода для данной трубы, определенный согласно указаниям



Фиг. 2—127. График зависимости $i_к=f(Q, b, n)$ для определения критического уклона при прямоугольном сечении

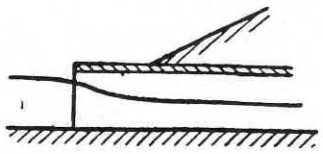
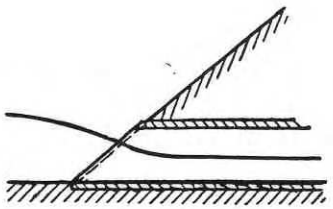
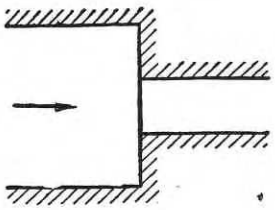
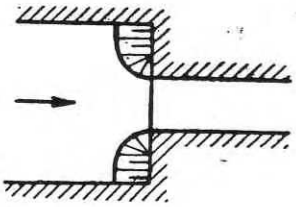
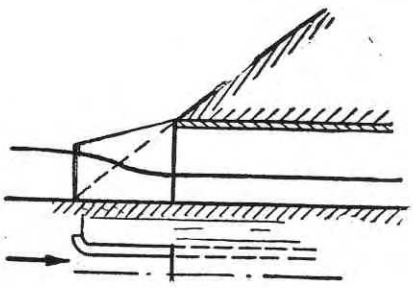


Фиг. 2—128. График для определения $b_к$ (по А. А. Угинчусу)

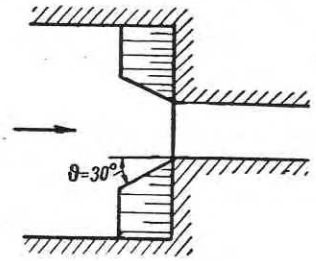
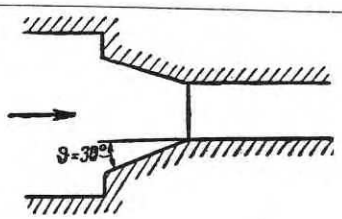
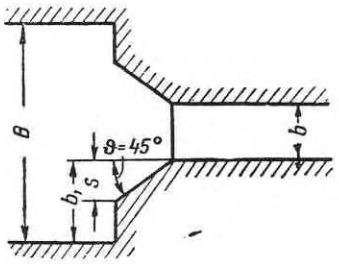
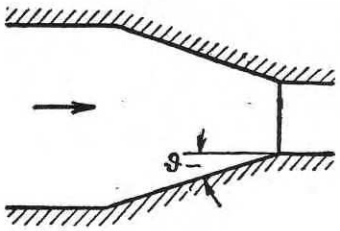
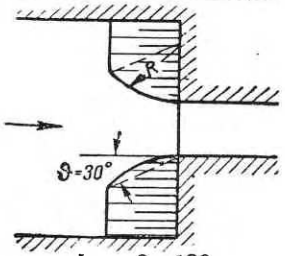
а — круглое сечение; *б* — овоидальное; *в* — трапецоидальное; *г* — шатровое; *д* — лотковое

Таблица 2—45

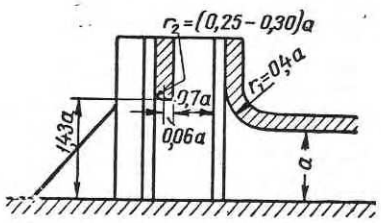
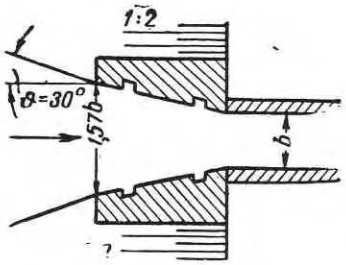
Значения коэффициента m_σ для коротких прямоугольных труб при уклоне $i \approx 0$

№ оголовка	Тип входного оголовка (входной части трубы)	Схема входной части трубы	m_σ	Примечание
1	Труба, выпущенная из откоса насыпи	 *Фиг. 2—129*	0,300	—
2	Воротниковый	 *Фиг. 2—130*	0,305	—
3	Портальный без конусов (устои с вертикальными обратными стенками)	 *Фиг. 2—131*	0,310	—
4	Портальный с конусами при откосах 1:1÷1:1,5 (устои с вертикальными обратными стенками)	 *Фиг. 2—132*	0,315	—
5	Коридорный	 *Фиг. 2—133*	0,330	—

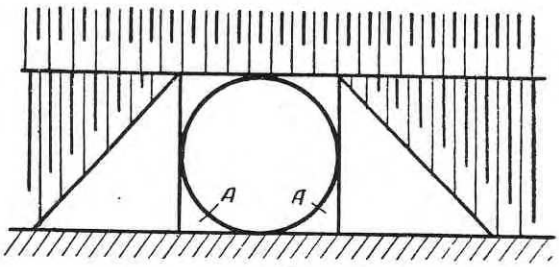
Продолжение табл. 2—45

№ оголовка	Тип входного оголовка (входной части трубы)	Схема входной части трубы	m_σ	Примечание
6	Раструбный с ныряющими стенками; $\vartheta=30°$ и откосы насыпи 1:1,5	 *Фиг. 2—134*	При $\frac{H}{a}>0,6$ 0,335 При $\frac{H}{a}<0,6$ 0,360	a— высота трубы H—напор над порогом
7	Раструбный с вертикальными стенками (неныряющими) при $\vartheta=30°$	 *Фиг. 2—135*	0,361	При наличии конусов перед открылками m_σ можно принимать таким же, как и при их отсутствии
8	Раструбный с вертикальными (неныряющими) стенками при $\vartheta=45°$	 *Фиг. 2—136*	По формуле (2—158)	
9	Раструбный с вертикальными стенками, доходящими до берегов	 *Фиг. 2—137*	По формуле (2—159)	—
10	Раструбный с круговыми (криволинейными) ныряющими стенками при $\vartheta=30°$ и откосе насыпи 1:1,5	 *Фиг. 2—138*	При $\frac{H}{a}>0,4$ как для оголовка № 6 и даже меньше при больших $\frac{H}{a}$. При $\frac{H}{a}<0,4$; 0,365	— —

Продолжение табл. 2—45

№ оголовка	Тип входного оголовка (входной части трубы)	Схема входной части трубы	m_σ	Примечание
11	Башенный	 	0,365	—

Фиг. 2—139



Фиг. 2—140

пп. 6—9, m_σ — коэффициент расхода по табл. 2—45 для оголовка № 4 или № 6 в зависимости от того, к какому из этих оголовков ближе подходит по значению m_σ заданный оголовок.

11. Максимальные скорости в трубах

Максимальная из средних по сечениям скорость в пределах сооружения прямоугольного сечения при известных расходе Q и размерах сооружения определяется из зависимости:

$$(v_{max})_{ср} = \frac{1}{\psi}\sqrt[3]{\frac{Qg}{b}}, \qquad (2—160)$$

а при непрямоугольном сечении из зависимости:

$$(v_{max})_{ср} = \frac{1}{\psi}\cdot\frac{Q}{h_к\, b_к}, \qquad (2—161)$$

где ψ — отношение критической скорости к максимальной из средних по сечениям в пределах сооружения; приближенно его можно заменить отношением минимальной глубины на выходе из сооружения к критической глубине; остальные обозначения прежние.

Значение ψ определяется по данным, приведенным в п. 13, $h_к$ — см. выше, в п. 2—19, и $b_к$ — по графику на фиг. 2—128.

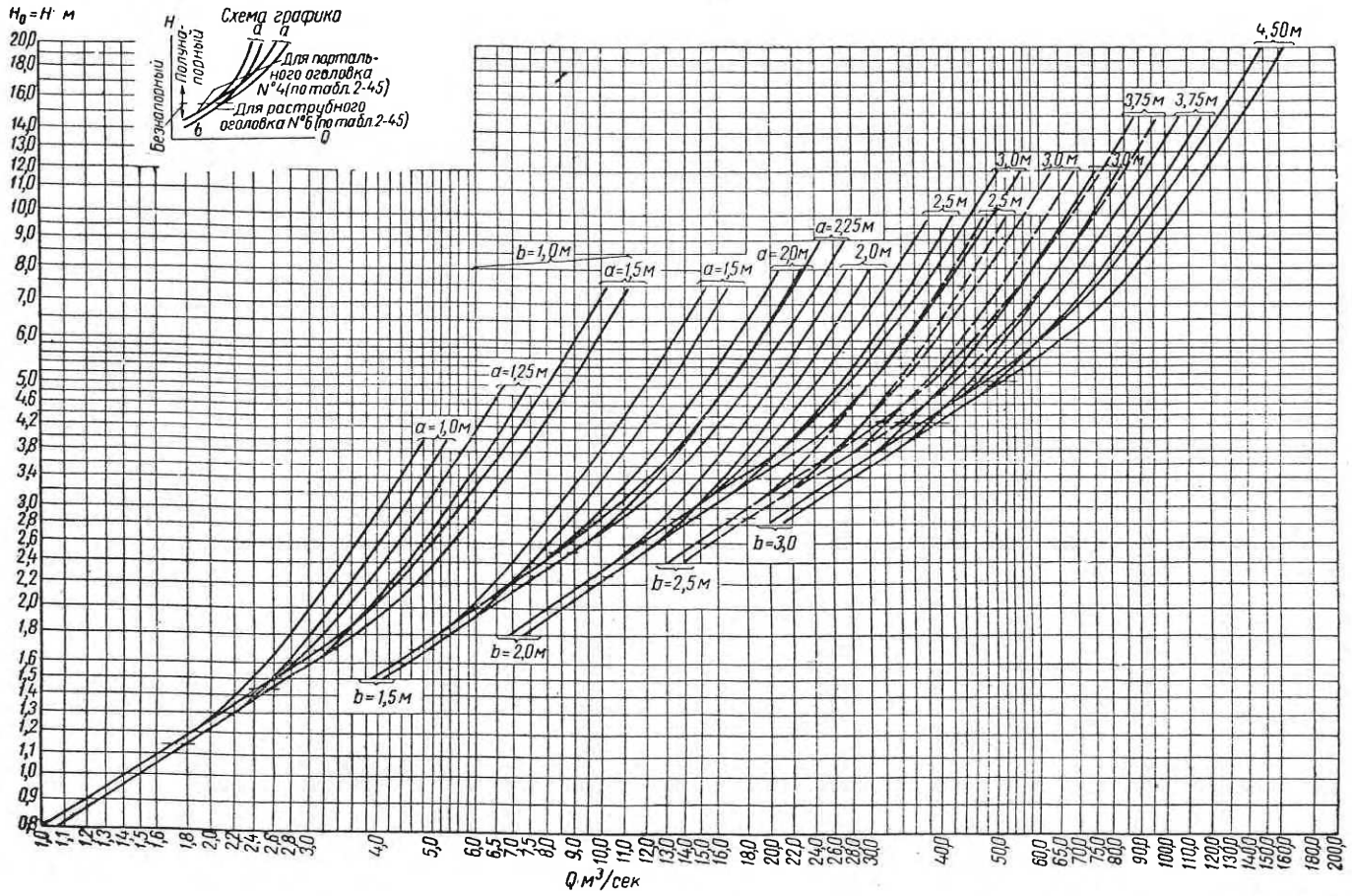
12. Расчет отверстий по максимальной допускаемой скорости

а) При расчете прямоугольного отверстия по максимальной средней по сечению допускаемой («неразмывающей») скорости в пределах трубы $v_{доп}$, величина отверстия b определяется из зависимости (2—160) с заменой $(v_{max})_{ср}$ на $v_{доп}$, а полный напор в верхнем бьефе H_0 по формуле:

$$H_0 = \frac{2\psi^2}{\sqrt[3]{2\,m^2}}\cdot\frac{v_{доп}^2}{2g}, \qquad (2—162)$$

где все обозначения прежние.

б) При трубах непрямоугольного поперечного сечения расчет удобно вести как поверочный: определить сначала сечение трубы в соответствии с обеспечением ее необходимой пропускной способности (см. пп. 5—9), а затем подсчитать по зависимости (2—161) значение $(v_{max})_{ср}$, которое должно быть меньше $v_{доп}$; если получится $(v_{max})_{ср} > v_{доп}$, поперечное сечение следует увеличить и расчет повторить.



Фиг. 2—141. График $Q=f(H_0, a, b, m)$ для безнапорных и полунапорных коротких труб прямоугольного сечения с горизонтальным дном ($i=0$) при совершенном сжатии ($\sigma=0$)

в) В нижнем бьефе скорости бывают больше, чем в сооружении на 25—40%, а в отдельных случаях на 70%. Поэтому расчет по $v_{доп}$ следует считать формальным. Вместо него целесообразно производить расчет сопряжения выходящего из сооружения потока с нижним бьефом и проектировать соответствующие устройства: гасители, растекатели, крепления (некоторые данные см. в пп. 2—30, 2—32 и 2—33).

13. Значения отношений ψ (глубины на выходе из трубы)

Средние значения ψ в формулах (2—160), (2—161) и (2—162) можно принимать следующими.

а) Для труб с уклоном $i<i_к$.

При «неплавных» входных оголовках (№ 1—4 табл. 2—45)

$$\psi \approx 0{,}75 \div 0{,}80; \qquad (2—163)$$

при достаточно плавных входных оголовках (№ 5—11 табл. 2—45)

$$\psi \approx 0{,}80 \div 0{,}85 \qquad (2—163')$$

б) Для труб с уклоном $i>i_к$ обычно (при не слишком малых их длинах) можно принимать $\psi = \dfrac{h_0}{h_к}$ для прямоугольных труб и $\psi = \dfrac{\omega_0}{\omega_к}$ — для труб непрямоугольного поперечного сечения. Здесь h_0 и ω_0 — глубина и площадь живого сечения при равномерном режиме (см. п. 2—17), $h_к$ и $\omega_к$ — критические глубина и площадь живого сечения (см. п. 2—19).

14. Глубина воды при входе в трубу

Отношение τ глубины воды при входе в трубу $h_{вх}$ (см. фиг. 2—126) к напору H в среднем можно принимать следующим:

а) для портальных и раструбных входных оголовков при прямоугольных сечениях труб и приближающихся к прямоугольным, при $i<i_к$

$$\tau = 0{,}88;$$

б) то же, но при $i>i_к$

$$\tau = 0{,}85;$$

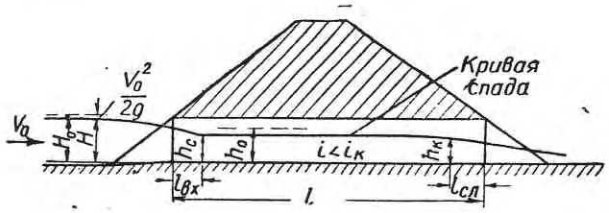
в) для портальных и раструбных входных оголовков при круглых и приближающихся к круглым сечениях труб $\tau = 0{,}90$;

г) для воротниковых входных оголовков $\tau = 0{,}79$.

2—49. ДЛИННЫЕ НЕЗАТОПЛЕННЫЕ ТРУБЫ

1. Предельные длины

Длинными являются такие трубы при $i<i_к$, длина которых влияет на их пропускную способность (фиг. 2—142). Труба будет длинной, если ее длина больше



Фиг. 2—142

верхнего предела для коротких труб, определяемого, как указано в п. 2—48, 2.

2. Критерии затопления

Условия незатопляемости для длинных труб те же, что и для коротких (см. п. 2—48, 1).

3. Гидравлический расчет длинных труб

Гидравлический расчет длинных труб можно производить следующим образом.

При заданном расходе Q прежде всего следует задаться поперечным сечением трубы (шириной b — при прямоугольной трубе), рассчитав приближенно трубу как короткую, а затем, несколько увеличив ее сечение, определить глубину h_c (или площадь ω_c — при непрямоугольном сечении) в конце участка входа (фиг. 2—142). Для этого следует воспользоваться соответствующим заданным условиям способом построения кривой спада (см. п. 2—22), определив глубину в ее начале h_c (или ω_c) и приняв в конце расчетного участка длиной $l_c = l - l_{вх} - l_{сл}$ глубину $h_{сл} = h_к$.

При этом значения $l_{вх}$ и $l_{сл}$ определяются в соответствии с указаниями п. 2—48, 2, а длина трубы l задана.

При большой относительной длине трубы (что обычно бывает при донных трубчатых водоспусках земляных и набросных плотин, туннельных водоспусках и строительных туннелях) и при $0<i<i_к$ без большой погрешности можно принять $h_c \approx h_0$, где h_0 — глубина равномерного движения в трубе.

После определения h_c (или ω_c) величина H_0 определится из формулы (2—155) или (2—156) с введением в правую часть этих формул коэффициента подтопления $\sigma_п$, определяемого по графику фиг. 2—143, построенному по данным канд. техн. наук Д. И. Кумина.

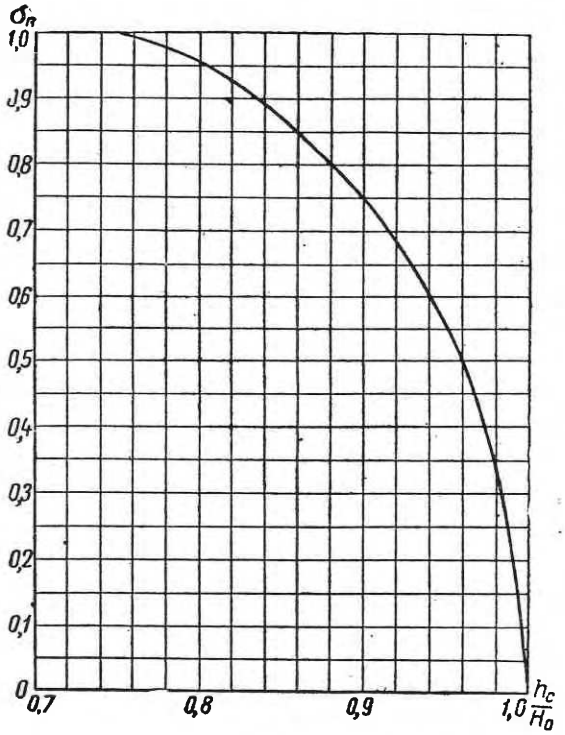
Таким образом, при прямоугольной трубе

$$Q = m \sigma_п b \sqrt{2g} H_0^{3/2}; \qquad (2—164)$$

при трубе непрямоугольного поперечного сечения

$$Q = m_к \sigma_п b_к \sqrt{2g} H_0^{3/2}. \qquad (2—165)$$

Коэффициенты расхода m (или $m_к$) принимаются при этом как для коротких труб (см. п. 2—48, 6—9). Так как $\sigma_п = f\left(\frac{h_c}{H_0}\right)$, а H_0 неизвестно (определяется), задачу

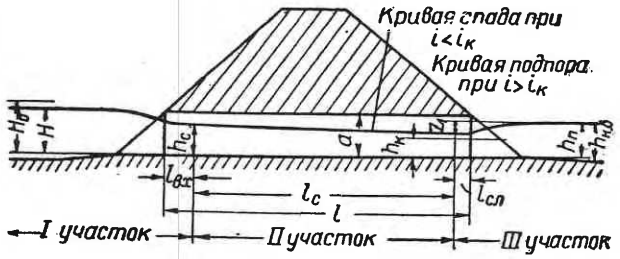


Фиг. 2—143. График зависимости $\sigma_п = f\left(\frac{h_c}{H_0}\right)$

приходится решать методом последовательных приближений. Обычно требуется не более двух-трех приближений. При трубах непрямоугольного сечения при определении $\sigma_п$ по графику фиг. 2—143 вместо $\frac{h_c}{H_0}$ следует принимать $\frac{\omega_c}{\omega_{H_0}}$. После определения H_0 подсчитывается $H = H_0 - \frac{v_0^2}{2g}$ (см. фиг. 2—142), если нельзя пренебречь скоростью подхода.

Если H получается слишком малым, т. е. размеры трубы приняты преувеличенными для данного расхода, или если, наоборот, H получается слишком большим (поперечное сечение слишком мало), причем труба уже не будет работать как безнапорная, а решено при данном Q сохранить безнапорный режим, то надлежит соответственно изменить размеры поперечного сечения трубы и повторить расчет.

Задача может быть решена и при заданной величине H. Решать ее надлежит методом последовательных приближений. В этом случае при известном Q, задаваясь $\sigma_п$, по формуле (2—164) или (2—165) находят b или $b_к$, а затем поперечное сечение трубы. После этого, строя кривую спада, определяют h_c (или ω_c) и проверяют, соответствует ли коэффициент $\sigma_п$ по графику фиг. 2—143 при полученном $\frac{h_c}{H_0}$ $\left(\text{или } \frac{\omega_c}{\omega_{H_0}}\right)$, принятому в первоначальном расчете. При несовпадении этих значений $\sigma_п$ сечение трубы изменяется и расчет повторяется.



Фиг. 2—144

4. Максимальные скорости и минимальные глубины

При длинных трубах сохраняются формулы (2—160), (2—161) для коротких труб со значениями ψ по (2—163), (2—163′). Увеличение скоростей в нижнем бьефе также возможно (см. п. 2—48,12).

2—50. ЗАТОПЛЕННЫЕ ТРУБЫ

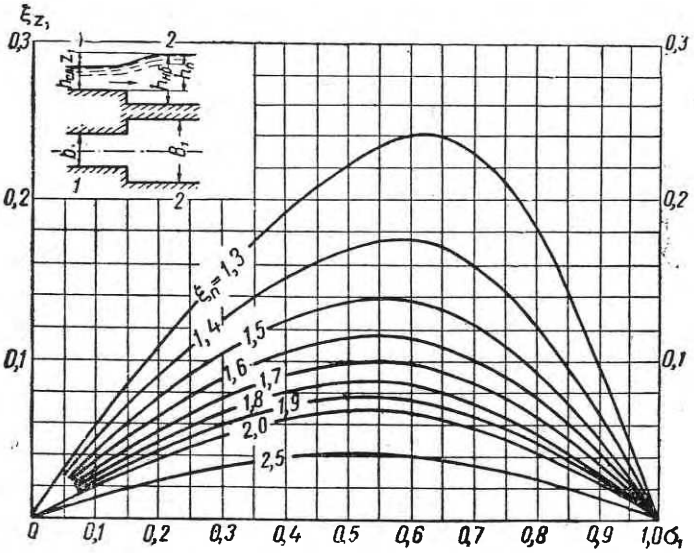
Наличие затопления трубы определяется в соответствии с указаниями п. 2—48, 1.

Затопленные трубы надлежит рассчитывать, рассматривая совместно три участка трубы, указанные на фиг. 2—144: *I* — участок входа, *II* — средний участок и *III* — участок сопряжения с нижним бьефом[1].

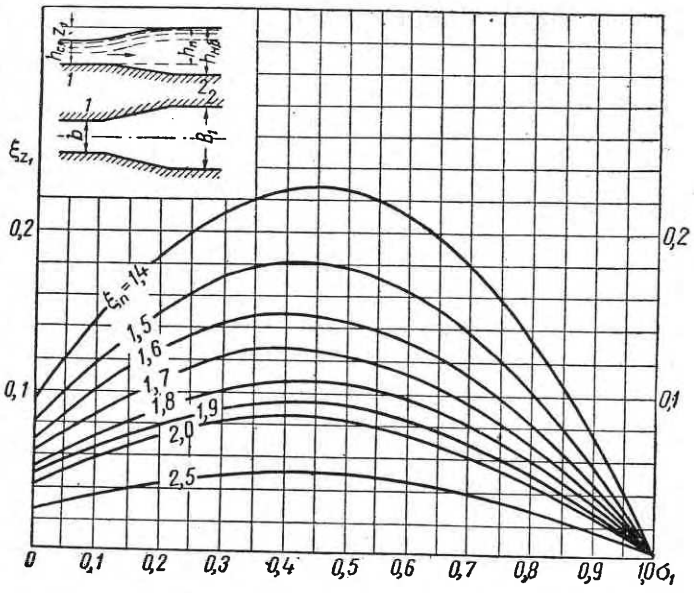
Для участков *I* и *II* полностью сохраняются зависимости и указания, данные в п. 2—49,3 для длинных труб, с той лишь разницей, что кривую свободной поверхности на среднем участке *II* длиной l_c надо строить не между глубинами h_c и $h_{сл}=h_к$, а между глубинами h_c и $h_{сл}>h_к$. Связь между глубинами $h_{сл}$ и $h_{н.б}$ (граничными глубинами участка *III*) в общем случае непрямоугольных поперечных сечений трубы и нижнего бьефа может быть приближенно выражена зависимостью (2—147).

При трубах прямоугольного поперечного сечения и прямоугольных поперечных сечениях нижнего бьефа[2] для участка *III* можно воспользоваться графиками Д. И. Кумина, приведенными на фиг. 2—145, 2—146 и 2—147. Эти графики позволяют определить перепад восстановления z_1 (см. фиг. 2—144), выраженный в долях $h_к$ $\left(\text{т. е. } \xi_{z_1}=\dfrac{z_1}{h_к}\right)$, в зависимости от параметра $\sigma_1=\dfrac{bh_п}{B_1 h_{н.б}}$ (обозначения — см. на фиг. 2—144, 2—145) и относительного подтопа $\xi_п=\dfrac{h_п}{h_к}$. Наименьшее значение $\xi_п$ на графиках принято равным 1,3—1,4; при меньших значениях $\xi_п$ влияние затопления очень невелико и его можно не учитывать.

Перепад восстановления по графикам Д. И. Кумина может быть определен для трех случаев: внезапного расширения нижнего бьефа (фиг. 2—145), относительно плавного (фиг. 2—146) и плавного (фиг. 2—147) сопряжений трубы с нижним бьефом. При этом внезапным расширением считается (фиг. 2—148) сопряжение плоскостью с уклоном не положе 1 : 2 или криволинейной поверхностью со средним уклоном не положе 1 : 1,5; при относительно плавном расширении соответственно уклоны 1 : 4—1 : 5 и 1 : 3, а при весьма плавном расширении — порядка 1 : 6—1 : 7.



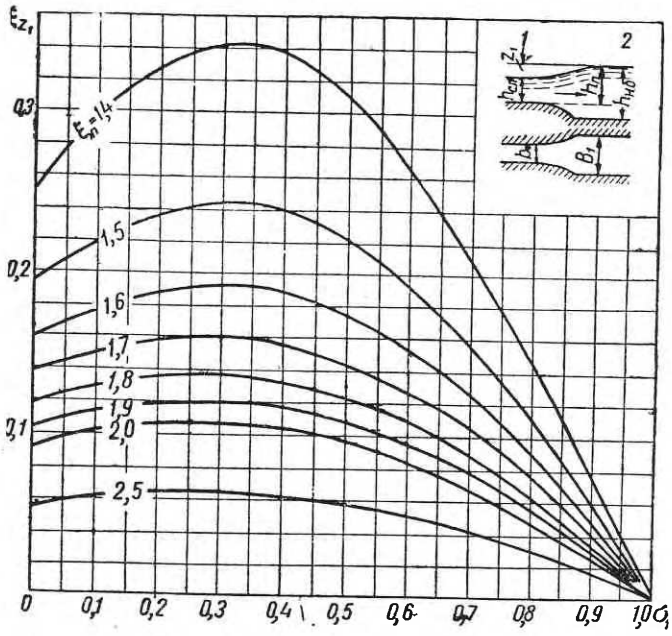
Фиг. 2—145. График для определения перепада восстановления при резком переходе от трубы (или водослива) к каналу



Фиг. 2—146. График для определения перепада восстановления при относительно плавном сопряжении трубы (или водослива) с каналом

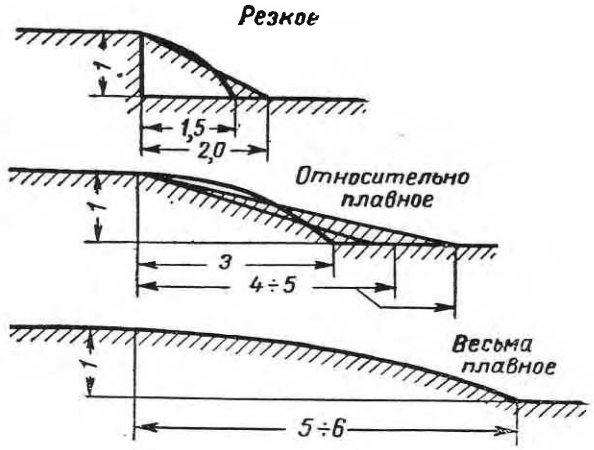
[1] В основу расчета положены предложения Д. И. Кумина по расчету затопленных водосливов с широким порогом с некоторыми изменениями и с учетом специфики работы труб.

[2] Непрямоугольные поперечные сечения нижнего бьефа приближенно в расчете могут быть заменены эквивалентными по площади прямоугольными.



Фиг. 2—147. График для определения перепада восстановления при весьма плавном сопряжении трубы (или водослива) с каналом

Ход расчета затопленной трубы зависит от того, какие величины заданы и какие являются искомыми, причем расчет удобнее вести, рассматривая участки в такой последовательности: *III, II, I,* т. е. переходя от нижнего бьефа к верхнему. Размерами трубы во всех случаях надо предварительно задаться. Если, например, при заданном расходе надо определить уровень верхнего бьефа (т. е. H), то сначала по зависимости (2—147)



Фиг. 2—148. Типы сопряжения трубы с нижним бьефом в вертикальной плоскости

(при трубе непрямоугольного поперечного сечения) или при помощи одного из графиков фиг. 2—145—2—147 (при прямоугольной трубе) определяется $h_{сл}=h_п-z_1$, затем строится кривая свободной поверхности на длине l_c (см. фиг. 2—144) и определяется глубина h_c*, после чего подбором по формуле (2—164) или (2—165) находят H_0, а затем и H.

Если задан напор H, а расход Q неизвестен, то надо для ряда значений Q проделать расчет, как указано выше, и построить кривую $Q=f(H)$; искомое Q определится по этой кривой графически при заданном H.

* При малых $\frac{l}{H}$ (например, при расчете отверстий малых мостов) влиянием потерь по длине l_c (см. фиг. 2—144) можно пренебречь, т. е. глубину $h_{сл}$ можно считать равной глубине h_c.

ТРУБЫ С ЗАТОПЛЕННЫМ ВХОДОМ

Затопление входа трубы со стороны верхнего бьефа произойдет тогда, когда глубина воды при входе $h_{вх}$ (см. фиг. 2—126) станет чуть больше высоты трубы a во входном ее сечении. Это, очевидно, произойдет при

$$H > \frac{a}{\tau}, \qquad (2—166)$$

где a — высота трубы,

$\tau = \frac{h_{вх}}{H}$ — для безнапорной трубы (см. п. 2—48,14).

2—51. КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРУБЫ

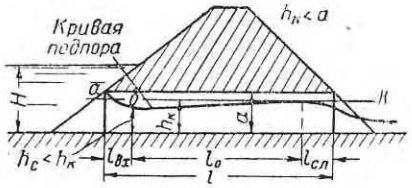
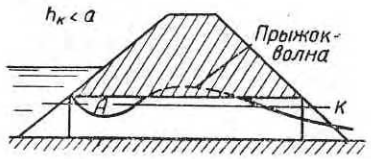
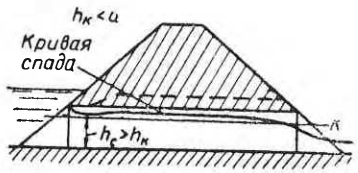
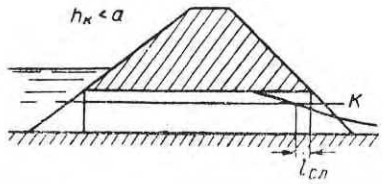
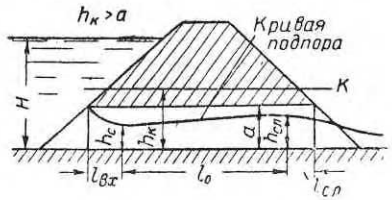
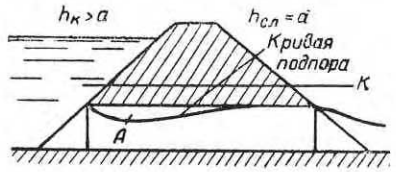
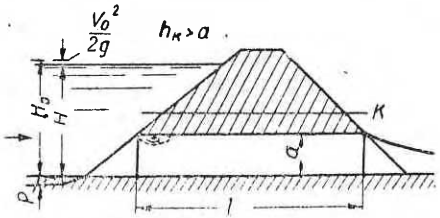
В табл. 2—46 приведены схематизированные формы кривых свободной поверхности потока в водопропускных трубах для случаев, когда глубина равномерного режима находится в области однозначных глубин (с указанием моментов перехода к напорной работе).

1. Трубы с уклоном $i<i_к$

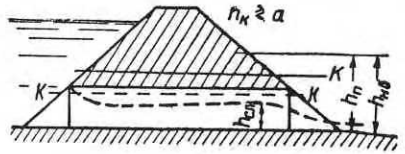
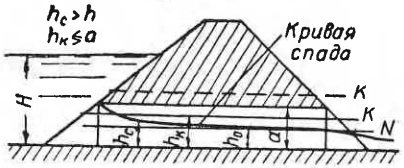
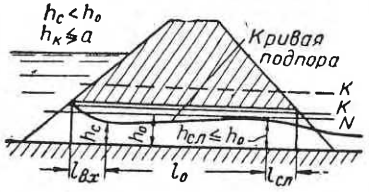
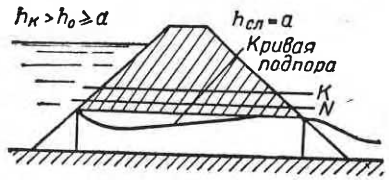
При уклоне трубы $i<i_к$ для выяснения того, какой режим установится в трубе заданных размеров при заданном отношении $\frac{H}{a}$ — полунапорный (схемы 1, 5 табл. 2—46), напорный (схемы 4, 7) или неустойчивый переходный (схема 2), при свободном истечении воды в нижний бьеф, следует различать два случая: $h_к<a$ (схема 1) и $h_к \geqslant a$ (схема 5).

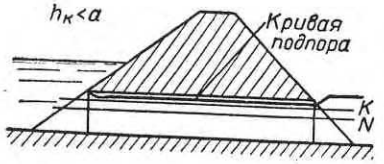
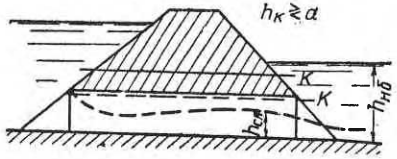
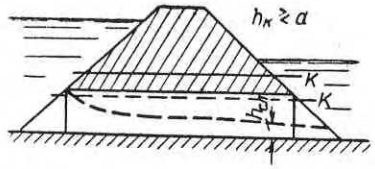
В трубах прямоугольного сечения возможны оба эти случая. Первый случай имеет место при небольших $\frac{H}{a}$ (до $\frac{H}{a} \approx 1{,}85 \div 2{,}2$ в зависимости от типа входного оголовка; чем более «неплавен» оголовок, тем больше это значение $\frac{H}{a}$); второй случай будет при бо́льших $\frac{H}{a}$, чем указанные. При трубах «замкнутых» поперечных сечений, ширина которых, начиная с некоторого расстo-

Таблица 2—46

№ схемы	Схема	Характеристика
	Уклон $0 \geqslant i < i_к$	
1	 *Фиг. 2—149*	Полунапорная короткая труба $h_к < a$
2	 *Фиг. 2—150*	Прыжок-волна в трубе (переходный случай к схемам 3 или 4) $h_к < a$
3	 *Фиг. 2—151*	Полунапорная длинная труба $h_к < a$
4	 *Фиг. 2—152*	Напорная труба с отделением струи от потолка в конце трубы $h_к < a$
	Уклон $0 \geqslant i < i_к$	
5	 *Фиг. 2—153*	Полунапорная труба $h_к > a$
6	 *Фиг. 2—154*	Переходный случай от полунапорного к напорному режиму $h_к > a$; $h_{сл} = a$
7	 *Фиг. 2—155*	Напорная труба $h_к > a$
8	*Фиг. 2—156*	Подтопленная с нижнего бьефа полунапорная труба $h_к < a$

Продолжение табл. 2–46

№ схемы	Схема	Характеристика
9	 *Фиг. 2–157*	Напорная труба, затопленная с нижнего бьефа $h_к \gtrless a$
	Уклон $i > i_к$	
10	 *Фиг. 2–158*	Полунапорная труба $h_c > h_0$ $h_к \leqslant a$
11	 *Фиг. 2–159*	Полунапорная труба $h_c < h_0$ $h_к \leqslant a$
12	 *Фиг. 2–160*	Переходный случай от полунапорного к напорному режиму $h_к > h_0 \geqslant a$ $h_{сл} = a$

№ схемы	Схема	Характеристика
	Уклон $i > i_к$	
13	 *Фиг. 2–161*	Подтопленная с нижнего бьефа полунапорная труба $h_к < a$
14	 *Фиг. 2–162*	Напорная труба, затопленная с нижнего бьефа $h_к \gtrless a$
15	 *Фиг. 2–163*	Напорная труба, затопленная с нижнего бьефа $h_к \leqslant a$

Примечание. Принятые обозначения: *K*—линия критической глубины; *N*—линия глубины равномерного режима.

яния от дна, убывает кверху и становится равной нулю при высоте трубы a (круглые, овоидальные трубы), $h_к < a$, т. е. всегда имеет место первый случай.

а) Случай $h_к < a$

В этом случае следует определить $h_к$ (см. п. 2—19), подсчитать h_c (см. ниже) в предположении полунапорно работающей трубы (схема 1) и определить длину кривой подпора — между глубинами h_c и $h_к$.

При определении l_0 — в соответствии с рассматриваемым случаем—можно воспользоваться методами, приведенными в п. 2—22. Следует заметить при этом, что при прямом уклоне $0 < i < i_к$ и трубах «замкнутых» поперечных сечений (например, круглых, овоидальных) обычным уравнением неравномерного движения (см. п. 2—22), в которое входит глубина равномерного режима h_0, воспользоваться нельзя, так как пропускная способность полунапорной трубы оказывается больше максимального расхода, пропускаемого трубой с данным уклоном при равномерном режиме, т. е. понятие h_0 теряет смысл. В этом случае рекомендуется пользоваться зависимостью [1]:

$$\frac{i}{\frac{x}{\sqrt{\gamma}}\, h_к}\, l = z_2 - z_1 - (1 - \bar{j})\,[\varphi(z_2) - \varphi(z_1)], \qquad (2—167)$$

где

$$\bar{j} = \frac{a\, i\, \bar{C}^2}{g} \cdot \frac{\bar{B}}{\bar{\chi}}; \quad \gamma = \frac{i_к}{i}; \quad z_2 = \frac{\xi_2}{\frac{x}{\sqrt{\gamma}}};$$

$$z_1 = \frac{\xi_1}{\frac{x}{\sqrt{\gamma}}}; \quad \xi_2 = \frac{h_2}{h_к}; \quad \xi_1 = \frac{h_1}{h_к};$$

x — гидравлический показатель русла; (см. [22] § 5);

$\varphi(z_2)$ и $\varphi(z_1)$ — определяются по таблицам (см. [22], табл. 1—14), остальные обозначения такие же, как в п. 2—22.

Можно пользоваться и методом И. И. Леви (см., например, [22], стр. 63 и 64).

Если длина $l' = l_0 + l_{вх} + l_{сл}$ (о значениях $l_{вх}$ и $l_{сл}$ см. ниже) будет больше длины трубы l, то теоретически в трубе должен быть устойчивый полунапорный режим. В противном случае труба зарядится и будет устойчиво работать напорно с местным отделением струи от потолка трубы в ее конце (схема 4, табл. 2—46).

Работа трубы как длинной полунапорной (схема 3) практически обычно оказывается невозможной, так как кривая спада на небольшой длине (считая от выходного сечения) коснется потолка трубы и труба станет работать по схеме 4; случай длинной полунапорной трубы становится реальным при высоте трубы, соответственно большей высоты входного сечения (см. пунктир на схеме 3)[2].

Следует иметь в виду, что в реальных условиях, при наличии косых волн в трубе и близости глубин потока к $h_к$, переход от короткой полунапорной трубы к длинной происходит при некоторой длине трубы $l''' < l'$. По эмпирической зависимости, полученной в МИСИ им. В. В. Куйбышева, по данным опытов с моделями прямоугольных труб при $i \approx 0$:

$$l''' \approx (41 - 36\mu_0)\, h_к, \qquad (2—168)$$

где μ_0 — коэффициент расхода, определяемый согласно п. 2—52, 1 (см. ниже табл. 2—47).

При $l''' < l < l'$ в обычных условиях (a=const) в трубе может иметь место неустойчивый переходный режим (схема 2) при периодическом прорыве воздуха в вакуумную зону A.

В указанных выше расчетах можно приближенно принимать:

$$l_{вх} \approx 1{,}4a, \qquad (2—169)$$

$$l_{сл} \approx 1{,}3a, \qquad (2—169')$$

где a — высота трубы.

По данным лабораторных опытов МИСИ им. В. В. Куйбышева, h_c следует определять по формуле:

$$\frac{h_c}{a} = 0{,}037\,\frac{H}{a} + 0{,}573\mu_0 + 0{,}182, \qquad (2—170)$$

где все обозначения прежние.

Формула (2—170) получена для прямоугольных труб при $\frac{H}{a} \leqslant 2{,}8$. Для труб с другими поперечными сечениями приближенно можно пользоваться той же формулой (2—170), принимая вместо $\frac{h_c}{a}$ величину $\frac{\omega_c}{\omega}$ (ω — площадь поперечного сечения трубы).

При расчетах труб с «замкнутыми» поперечными сечениями (круглых, овоидальных) следует иметь в виду, что с увеличением отношения $\frac{H}{a}$ значение критического уклона быстро возрастает и часто оказывается, что уклон трубы i, бывший для безнапорной трубы бо́льшим критического, становится при затопленном входе меньшим критического при некотором отношении $\frac{H}{a}$.

Кроме того, надо иметь в виду, что в круглых трубах значительные деформации потока при входе в трубу (выворачивание струй, подъем их к потолку и образование как бы двуслойного движения при полунапорном режиме) способствуют созданию у потолка трубы замкнутой области с вакуумом, при возникновении которой труба заряжается, даже если теоретически этой зарядки и не должно быть, притом и при $i > i_к$, но затем, если в область вакуума вихревым шнуром, образующимся в верхнем бьефе, засасывается воздух, труба снова разряжается.

б) Случай $h_к \geqslant a$

В этом случае длину кривой подпора l'_0 следует определять между глубинами h_c и a.

При длине трубы $l < l'' = l_{вх} + l'_0 + l_{сл}$ будет полунапорный режим (схема 5 табл. 2—46), а при $l > l''$ — напорный без местного отделения струи от потолка трубы в ее конце (схема 7).

Переходный случай будет, когда l близка к l'' (схема 6). Для определения $l_{вх}$, $l_{сл}$ и h_c в рассматриваемом случае, как и в предыдущем, можно пользоваться формулами (2—169), (2—169′) и (2—170).

Приближенная формула (2—168), очевидно, здесь применима лишь когда $h_к = a$.

[1] Эта зависимость пригодна не только для „замкнутых" сечений.

[2] Такой случай возможен, например, при частичном открытии затвора в водоспуске; для выяснения режима работы трубы здесь надо строить кривую спада, начиная от $h_к$ и двигаясь вверх по течению.

2. Влияние предшествующих условий работы трубы

Следует иметь в виду, что на режим потока в трубе оказывают влияние условия работы трубы, предшествовавшие условиям ее работы в рассматриваемый момент. Например, если в заданных условиях труба должна работать полунапорно, но при бывших до этого условиях она работала напорно, то она сможет еще некоторое время продолжать работать напорно, пока вакуум при входе не будет сорван воздухом, засасываемым со стороны верхнего бьефа вихревым шнуром. Если вообще устранить этот засос воздуха (что обычно не делается), то труба будет продолжать работать напорно и не разрядится.

3. Трубы с уклоном $i>i_к$

В случае прямоугольной трубы (или вообще трубы с поперечным сечением, не относящимся к разряду «замкнутых») с уклоном $i>i_к$ и неподтопленном выходе из нее со стороны нижнего бьефа напорная работа трубы становится возможной, лишь когда нормальная глубина h_0 больше высоты трубы (схема 12), однако, и в этом случае труба может работать полунапорно, если кривая подпора в трубе не достигнет ее потолка. Таким образом, для напорной работы здесь должны быть выполнены два условия:

$$h_0>a \text{ и } l>l^{IV},$$

где $l^{IV}=l_0''+l_{вх}+l_{сл}$, причем l_0'' — длина кривой подпора между глубинами h_c и a.

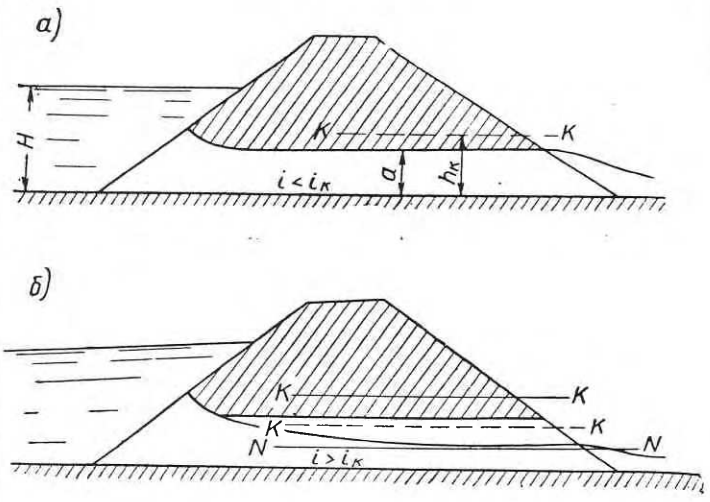
Приближенно здесь можно принимать $l_{вх}$ по формуле (2—169), h_c — по формуле (2—170), а $l_{сл}$ — равной нулю или очень небольшой, порядка до 0,5 a (как при схеме 11).

Для труб «замкнутых» поперечных сечений (например, круглых) при $i>i_к$ теоретически напорная работа трубы невозможна ($h_к<a$), однако, вследствие резкой деформации потока при входе, особенно при больших $\frac{H}{a}$, в трубе может иметь место неустойчивый переходный режим с временными «зарядками» трубы, как это было указано в п. 2—51, 1 «а». Следует также учитывать для таких труб отмеченное в п. 2—51, 1 «а» быстрое увеличение $i_к$ с увеличением $\frac{H}{a}$, вследствие чего при некотором $\frac{H}{a}$ уклон трубы i может стать меньше $i_к$, хотя до этого при меньших $\frac{H}{a}$ был больше $i_к$.

4. Трубы с «самозаряжающимися» оголовками

Труба с плавным «самозаряжающимся» оголовком (фиг. 2—164,*а*)[1] при $i<i_к$ при затоплении ее входа со стороны верхнего бьефа всегда будет работать напорно; полунапорную или частично напорную ее работу можно ожидать лишь при значительных уклонах $i>i_к$ с кривой спада в трубе (фиг. 2—164,*б*), если применен

[1] Оголовок должен быть достаточно плавно очерчен в вертикальном и горизонтальном разрезах. Некоторые типы самозаряжающихся оголовков приведены в главе XXVIII.



Фиг. 2—164

оголовок, не соответствующий данному большому уклону, полученный при i, близком к $i=0$.

5. Определение затопляющей глубины нижнего бьефа

Затопляющую глубину нижнего бьефа $h_п$, при которой полунапорно работающая при отсутствии этого подтопления труба зарядится, т. е. станет работать напорно, можно определить следующим образом.

а) При $h_к<a$ задачу следует решать методом последовательных приближений, применяя в общем случае зависимость (2—147), а для прямоугольных труб соответствующий график Д. И. Кумина (см. фиг. 2—145—2—147).

При этом расчете с некоторым запасом надо принимать $h_{сл}=a$. Напорно труба будет работать при глубине $h_п$, бо́льшей или равной $h_п$, найденной указанным расчетом.

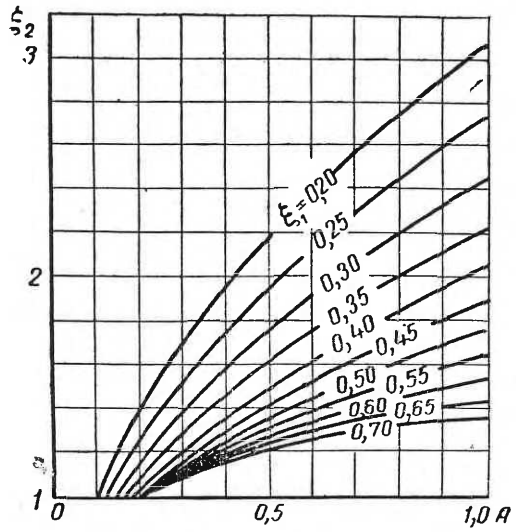
б) При $h_к\geqslant a$ (схема 9 табл. 2—46) следует сначала найти глубину $h_{сл}$ путем построения кривой свободной поверхности потока на участке $l—l_{вх}—l_{сл}$ методами, указанными в п. 2—51,1. Для не слишком коротких труб с $i>i_к$ при этом можно принять $h_{сл}=h_0$.

Затем надо найти глубину h'', сопряженную с $h_{сл}$ (для условий пространственной задачи). Если глубина подтопления $h_п$ будет больше h'', то труба подтопится и будет работать напорно. Глубину h'' можно приближенно определять методом Д. И. Кумина. По этому методу надо подсчитать значения

$$\xi_1=\frac{h_{сл}}{h_к};\quad n=\frac{h_к}{b} \text{ и } A.$$

Если $\beta_1>\frac{1}{1+1{,}5n}$, надо принимать $A=\beta_1$, если $\beta_1<\frac{1}{1+1{,}5n}$, принимать $A=\frac{1}{1+1{,}5n}$. Здесь $\beta_1=\frac{b}{B_1}$ (см. фиг. 2—145).

Далее, при известных ξ_1 и A определяется значение $\xi_2=\frac{h''}{h_к}$ по графику фиг. 2—165 или из формулы:



Фиг. 2—165. График сопряженных глубин при пространственном прыжке в прямоугольном русле: $\xi_2=f(\xi_1, A)$ (по Д. И. Кумину)

$$\frac{A}{\xi_1}+\frac{\xi_1^2}{2}=\frac{A^2}{\xi_2}+\frac{\xi_2^2}{2}. \qquad (2—171)$$

Если $h''=\xi_2 h_к$ будет меньше $h_п$, то труба подтопится и станет работать напорно.

6. Дополнительные критерии устойчивости режимов в трубе

а) В общем случае для устойчивой напорной работы трубы необходимо обеспечить затопление прыжка в начале трубы (фиг. 2—166). Приближенно уравнение прыжка в трубе (см. также [25]) любого поперечного сечения (пренебрегая влиянием уклона трубы, т. е. при $i=0$, силами трения на стенках в пределах прыжка, неравномерностью распределения скоростей и кривизной струй) имеет вид[1]:

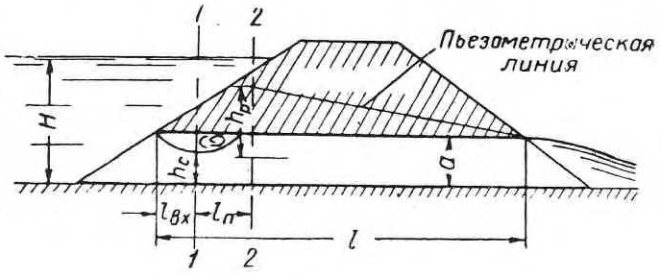
$$\frac{Q^2}{g\omega_c}+y_c\,\omega_c=\frac{Q^2}{g\omega}+h_p\,\omega \qquad (2—172)$$

или

$$h_p=\frac{Q^2}{g\omega}\left(\frac{1}{\omega_c}-\frac{1}{\omega}\right)+y_c\frac{\omega_c}{\omega}, \qquad (2—173)$$

где Q — расход;
g — ускорение силы тяжести;
ω_c — площадь сжатого сечения потока, определяемая для полунапорно работающей трубы (см. п. 2—51, 1«а»);
ω — площадь поперечного сечения трубы;
y_c — расстояние от поверхности потока в сжатом сечении до центра тяжести сечения ω_c;

[1] В [25] приводятся облегчающие расчет графики для круглого и составного (корытообразного) сечений водоводов (труб).



Фиг. 2—166

h_p — высота пьезометрического давления над центром тяжести сечения ω в конце прыжка, «сопряженная» с сжатой глубиной h_c.

В случае прямоугольного поперечного сечения при тех же допущениях:

$$h_p=\frac{Q^2}{gab}\left(\frac{1}{bh_c}-\frac{1}{ab}\right)+\frac{h_c^2}{2a}, \qquad (2—174)$$

где a — высота трубы;
b — отверстие;
h_c — сжатая глубина.

Для затопления прыжка необходимо, чтобы было

$$h_p' > \eta h_p, \qquad (2—175)$$

где h_p' — высота действительного пьезометрического давления над центром тяжести сечения трубы 2—2 (в конце прыжка), определяемая в предположении напорной работы трубы;
η — коэффициент запаса.

Приближенно (ввиду того что длина прыжка в трубе $l_п$ сравнительно невелика и детально не исследована) можно величину h_p' определять не для сечения 2—2, а для сжатого сечения 1—1 (фиг. 2—166), находящегося на расстоянии $l—l_{вх}$ от конца трубы, и коэффициент запаса принимать $\eta\approx 1{,}15\div 1{,}20$.

При определении длин трубы l' или l'' методом, указанным в п. 2—51, 1, условие (2—175) обычно выполняется с некоторым запасом, т. е. труба будет устойчиво работать при напорном режиме, и проверку по зависимости (2—175), как правило, можно не производить.

б) Если вакуум в сечении 1—1 (фиг. 2—166) устойчиво работающей напорной трубы не допускается, то по О. В. Андрееву [26] устойчивый напорный режим будет при:

$$H_п < H_н, \qquad (2—176)$$

где $H_п$ — глубина в верхнем бьефе, перед трубой, в предположении, что данная труба работает полунапорно;
$H_н$ — то же, но в предположении, что труба работает напорно.

Этот критерий, как и следовало ожидать, дает несколько большие значения длин труб l' или l'', устойчиво работающих напорно, чем критерий (2—175) для

предельного случая $\eta=1$*, но практически является приемлемым, так как вакуум во входной части трубы обычно не допускается.

2—52. РАСЧЕТ ПОЛУНАПОРНЫХ ТРУБ

1. Пропускная способность труб

Расчет пропускной способности труб при полунапорном режиме следует производить по формуле:

$$Q=\mu_0\,\omega\sqrt{2g\,(H_0-\eta a)}, \qquad (2—177)$$

где Q — расход;
a — высота трубы;
ω — площадь поперечного сечения трубы[1] (для прямоугольной трубы $\omega=ba$);
H_0 — полный напор над входным порогом трубы (с учетом скоростного напора);
g — ускорение силы тяжести;
μ_0 — коэффициент расхода;
η — отношение некоторой «определяющей» условной глубины $h_{оп}$ (большей, чем сжатая глубина h_c) к высоте трубы a.

Значения коэффициентов μ_0 и η для различных входных оголовков указаны в табл. 2—47[2].

Таблица 2—47

Значения коэффициентов μ_0 и η

№ входного оголовка (см. табл. 2—45)	Тип входного оголовка	Коэффициенты μ_0	Коэффициенты η
5	Коридорный	0,576	0,715
2	Воротниковый	0,591	0,726
1	Труба, выпущенная из откоса насыпи	0,596	0,726
4	Портальный с конусами	0,625	0,735
6	Раструбный с ныряющими стенками, $\vartheta=30°$	0,670	0,740

При расчете влияние уклона трубы i на ее пропускную способность обычно можно не учитывать, хотя с увеличением уклона i пропускная способность трубы несколько увеличивается. Для труб прямоугольного поперечного сечения это влияние уклона, по данным опытов, незначительно (для i — от 0 до 0,025). Для круглых труб опыты показали более заметное влияние уклона i на пропускную способность трубы, и для них лучше пользоваться формулой, учитывающей влияние i, а именно:

$$Q=\mu_0\,\omega\sqrt{2g\,[H_0-(0{,}708-2i)\,d]}\,, \qquad (2—178)$$

где d — диаметр трубы;
i — уклон, остальные обозначения прежние.

При этом для раструбного оголовка типа 6 в формуле (2—178) следует принимать $\mu_0=0{,}655$.

2. Максимальные скорости в трубе

Максимальные средние по сечению скорости в полунапорной трубе следует определять путем деления расхода Q на минимальную площадь живого сечения потока в трубе ω_{min}, каковой в большинстве случаев является площадь сжатого сечения ω_c (при прямоугольных трубах $\omega_c=h_c b$), определяемая, как указано в п. 2—51, 1«а», а в случае схемы 10 табл. 2—46 глубина $h_{сл}\approx h_0$.

В нижнем бьефе будет некоторое дополнительное увеличение скоростей, как и при безнапорных незатопленных трубах (см. п. 2—48, 12). Здесь также следует производить расчеты сопряжения вытекающей из трубы струи с нижним бьефом и проектировать соответствующие устройства для предотвращения опасных размывов.

2—53. РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБ

1. Пропускная способность незатопленных труб

Расчет напорной, незатопленной с нижнего бьефа трубы (схемы 4, 7 табл. 2—46) следует производить по формуле:

$$Q=\mu_н\,\omega_в\sqrt{2g\left(H_0+il-\eta_н a\right)}\,, \qquad (2—179)$$

где $\mu_н$ — коэффициент расхода;
$\eta_н$ — коэффициент, который в среднем можно ориентировочно принять равным 0,85;
$\omega_в$ — площадь поперечного сечения трубы на выходе; остальные обозначения прежние.

При трубе постоянного по длине поперечного сечения коэффициент расхода $\mu_н$ определяется по зависимости:

$$\mu_н=\frac{1}{\sqrt{1+\xi_{вх}+\xi_р+\xi_з+\dfrac{2gl}{C^2R}}}\,, \qquad (2—180)$$

где $\xi_{вх}$ — коэффициент сопротивления на вход;
$\xi_р$ — коэффициент сопротивления решетки;
$\xi_з$ — коэффициент сопротивления затвора (или затворов)[3];
C — коэффициент Шези;
R — гидравлический радиус;
l — длина трубы;
g — ускорение силы тяжести.

* И несколько меньшие (но близкие) l' или l'', чем по основному методу, приведенному в п. 2—51, 1—3.

[1] В случае, если ω меняется по длине трубы, приближенно (так как опытные данные относятся к постоянным ω вдоль трубы) можно принимать за ω площадь поперечного сечения трубы в сечении на длине $l_{вх}$ от начала трубы [при $l_{вх}$ по формуле (2—169)].

[2] Эти значения μ_0 и η получены для труб прямоугольного поперечного сечения, но приближенно могут быть приняты и для труб других поперечных сечений.

[3] При наличии затворов, расположенных непосредственно в пазах оголовка (см. оголовок 11 в табл. 2—45), потери энергии при наличии пазов для затворов непосредственно учитываются в $\xi_{вх}$ и отдельно вводить $\xi_з$ не надо. При отсутствии решеток и затворов (например, дорожные трубы) $\xi_р=0$ и $\xi_з=0$.

Для ориентировочных подсчетов в среднем можно принимать при нулевой или малой высоте порога p:

а) для труб без самозаряжающегося оголовка (оголовки № 1—10 табл. 2—45) при отсутствии расширения при входе в вертикальной плоскости $\xi_{вх} \approx 0{,}25$;

б) для труб с более плавными самозаряжающимися оголовками и для башенного оголовка № 11 (табл. 2—45) $\xi_{вх} \approx 0{,}15$.

В остальных случаях коэффициенты $\xi_{вх}$ можно ориентировочно принимать в соответствии с данными, приведенными в гл. 28.

2. Максимальные скорости при незатопленных трубах

Максимальная средняя по сечению скорость в трубе при $h_к > a$ может быть подсчитана по формуле:

$$(v_{max})_{ср} = \frac{Q}{\omega}, \qquad (2-181)$$

где Q — расход;

ω — площадь поперечного сечения трубы (в общем случае — минимальная площадь).

При $h_к < a$, когда происходит местное отделение струи от ее потолка, ориентировочно можно в среднем принять, пока довольно приближенно:

$$(v_{max})_{ср} \approx \frac{Q}{0{,}8\,\omega}. \qquad (2-182)$$

Некоторое увеличение скоростей в выходном сечении, во всяком случае сейчас же за этим сечением, по сравнению с получаемыми по формуле (2—181) должно иметь место и в первом случае ввиду довольно существенной кривизны струй. Поэтому осторожнее и в этом случае пользоваться не формулой (2—181), а формулой (2—182).

В нижнем бьефе при отсутствии затопления со стороны нижнего бьефа [при затопленном выходе скорость в трубе всегда следует определять по формуле (2—181)] будет иметь место дополнительное увеличение скоростей примерно такого же порядка, как и для труб полунапорных (см. п. 2—52, 2).

3. Пропускная способность затопленных труб

В случае затопленного со стороны нижнего бьефа выхода из трубы вместо формулы (2—179) следует пользоваться формулой:

$$Q = \mu_н\,\omega_в \sqrt{2g\,(H_0 + il - h_п)}, \qquad (2-183)$$

где $h_п$ — глубина в нижнем бьефе над порогом трубы в выходном сечении; остальные обозначения прежние.

При небольших подтоплениях эта формула должна давать некоторую погрешность ввиду местного понижения горизонта нижнего бьефа у выходного сечения трубы.

Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию и уточнению, как и вопрос уточнения $\mu_н$ в части определения коэффициента сопротивления на выходе[1].

Некоторые данные по этому вопросу приводятся в [8].

[1] В формуле (2 — 180) вместо $\xi_{вых} = 1$ надлежит поставить $\xi_{вых} < 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т. и Пикалов Ф. И., Гидравлика, Госэнергоиздат, 1950.
2. Ахутин А. Н., Специальный курс гидравлики., Гостехиздат, 1935.
3. Ахутин А. Н., Сборник задач по гидравлике, Стройиздат, 1941.
4. Ахутин А. Н., Шахтные водосливы, „Гидротехническое строительство" № 4, 1935.
5. Березинский А. Р., Пропускная способность водослива с широким порогом, Госстройиздат, 1950.
6. Березинский А. Р., Влияние бокового сжатия на пропускную способность водослива практического профиля, Труды гидравлической лаборатории Водгео, сборник № 2, Стройиздат, 1948.
7. Каплинский С. В. и Латышенков А. М., Лесосплавные лотки усиленной шероховатости, Лестехиздат, 1934.
8. Киселев П. Г., Справочник по гидравлическим расчетам, Госэнергоиздат, 1950.
9. Кумин Д. И., Сопряжение бьефов при поверхностном режиме. Стройиздат, 1949.
10. Латышенков А. М., Лобачев В. Г., Гидравлика, Стройиздат, 1945.
11. Латышенков А. М., Расчет каналов по способу единичных расходных характеристик, Труды гидравлической лаборатории Водгео, сборник № 3, Госстройиздат, 1952.
12. Лобачев В. Г., Обобщенный метод расчета каналов различных форм и шероховатостей, Стройиздат, 1939.
13. Михайлов К. А. и Богомолов А. И., Гидравлика, Дориздат, 1950.
14. Офицеров А. С., Расчет пропускной способности водослива практического профиля, Труды гидравлической лаборатории Водгео, сборник № 2, Стройиздат, 1948.
15. Павловский А. Н., Гидравлический справочник, Энергоиздат, 1937.
16. Розанов Н. П., Вакуумные водосливные плотины, Стройиздат, 1940.
17. Розанов Н. П., Формула для определения коэффициента полноты напора водослива практического профиля, Труды гидравлической лаборатории Водгео, сборник № 2 Стройиздат, 1948.
18. Ролле Н. Л., О коэффициенте расхода шахтных водосбросов, „Гидротехническое строительство" № 6, 1940.
19. Руднев С. С., Боковые водосбросы, Госэнергоиздат. 1941.
20. Туманян В. И., Гидравлика сифонных водосбросов, Госэнергоиздат, 1949.
21. Угинчус А. А., Общий способ нахождения критических глубин, „Гидротехническое строительство" № 8, 1948.
22. Чертоусов М. Д., Специальный курс гидравлики, Госэнергоиздат, 1949.
23. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений, Гидравлические расчеты водосливов, ВНИИГ, Госэнергоиздат, 1952.
24. Угинчус А. А., Обобщенная формула для гидравлического расчета водосливов с широким порогом различных форм, „Гидротехническое строительство" № 2, 1948.
25. Факторович М. Э., Неравномерное движение жидкости в безнапорных призматических (цилиндрических) закрытых водоводах, Известия ВНИИГ № 32, Госэнергоиздат, 1947.
26. Ярошенко В. А., Андреев О. В., Прокопович А. Г., Водопропускные трубы под железнодорожными насыпями, Труды ЦНИС МПС, Трансжеллориздат, 1952.
27. Угинчус А. А., Каналы и сооружения на них, Госстройиздат, 1953.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

3—1. РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

Центральное растяжение или сжатие имеет место тогда, когда на свободные концы стержня действуют внешние силы, направленные по оси стержня (фиг. 3—1). Если эти силы действуют навстречу друг другу, то будет иметь место сжатие ($-N$), в противоположном случае — растяжение ($+N$).

Нормальные напряжения σ распределяются по поперечному сечению стержня равномерно:

$$\sigma = \pm \frac{N}{F}, \qquad (3-1)$$

где F — площадь поперечного сечения стержня.

Относительная линейная деформация (фиг. 3—2)

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta l}{l}. \qquad (3-2)$$

где Δl — абсолютная деформация;
l — начальная длина стержня.

Величины σ и ε связаны между собой в пределах упругости материала зависимостью (закон Гука):

$$\sigma = \pm E\varepsilon \qquad (3-3)$$

или

$$\varepsilon = \pm \frac{N}{EF}, \qquad (3-4)$$

где E — модуль упругости.

Значения модуля упругости некоторых материалов приведены в табл. 3—1.

Относительная деформация стержня в поперечном направлении (фиг. 3—2).

$$\varepsilon' = \mp \frac{\Delta b}{b} = \mp \mu\varepsilon, \qquad (3-5)$$

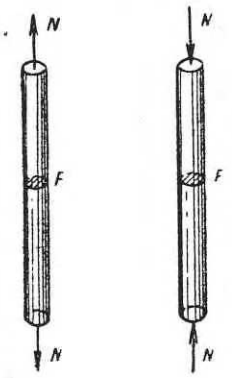
где μ — коэффициент Пуассона, величины которого для некоторых материалов приведены в табл. 3—2.

Таблица 3—1

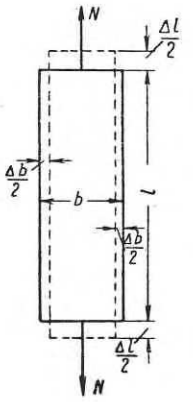
№ п/п	Материалы	Модуль упругости E в $кг/см^2$
1	Сырой лес	70 000
2	Полусухой лес	90 000
	Бетон марки:	
3	90	180 000
4	110	200 000
5	140	230 000
6	170	260 000
7	200	290 000
8	250	320 000
9	300	340 000
10	400	380 000
11	500	410 000
	Сталь:	
12	марки Ст. 5 повышенная	2 100 000
13	„ Ст. 4 нормальная	2 100 000
14	„ Ст. 3 „	2 100 000
	Сталь:	
15	марки Ст. 2 нормальная	2 100 000
16	„ Ст. 1 „	2 100 000
17	Сталь марки СТЛ2	2 100 000
18	„ „ СТЛ2 пониженная	2 100 000
19	Сталь марки СТЛ1	2 100 000
20	Чугун	750 000—1 050 000
21	Проволока стальная отожженная	2 000 000
22	Канат пеньковый	6 000—15 000
23	Стекло	7000 000
24	Гранит	490 000
25	Известняк	420 000
26	Мрамор	560 000
27	Песчаник	180 000
28	Лед (пресноводный)	40 000—45 000

Таблица 3—2

Название материалов	μ	Название материалов	μ
Сталь	0,25—0,30	Камни	0,20—0,34
Медь	0,31—0,34	Бетон	0,08—0,18
Бронза	0,32—0,35	Каучук	0,47
Чугун	0,23—0,27	Резина	0,5
Свинец	0,43	Пробка	0,00
Латунь	0,32—0,42	Фанера	0,07
Алюминий	0,32—0,36	Песок средней плотности и плотный	0,15—0,30
Стекло	0,25	Глина	0,20—0,40



Фиг. 3—1

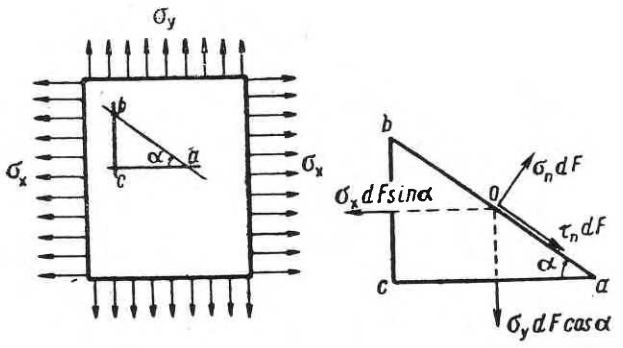


Фиг. 3—2

В случае растяжения или сжатия по двум взаимно перпендикулярным направлениям элемента упругого тела в виде пластинки, нормальные и касательные напряжения по косой площадке, наклоненной под углом α к горизонтальному сечению (фиг. 3—3), определяются по формулам:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha}{2}; \qquad (3—6)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\alpha. \qquad (3—7)$$



Фиг. 3—3

Если, кроме растяжения или сжатия, к выделенной из пластинки призме приложены еще касательные усилия, формулы (3—6) и (3—7) принимают вид:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\alpha - \tau_{xy}\sin 2\alpha; \qquad (3—8)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\sin 2\alpha + \tau_{xy}\cos 2\alpha; \qquad (3—9)$$

3—2. ГЕОМЕТРИЯ СЕЧЕНИЙ

При расчете конструкций необходимо определение ряда геометрических характеристик поперечного сечения, не зависящих от физических свойств материала.

Площадь поперечного сечения F определяется суммированием площадей элементов, составляющих данное сечение.

Статические моменты сечения S_x и S_y относительно осей координат x и y (фиг. 3—4) определяются следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned} S_x &= \int_F y\,dF = Fy_c; \\ S_y &= \int_F x\,dF = Fx_c, \end{aligned}\right\} \qquad (3—10)$$

где F — площадь сечения рассматриваемого элемента;

y_c и x_c — расстояния до центра тяжести рассматриваемого сечения.

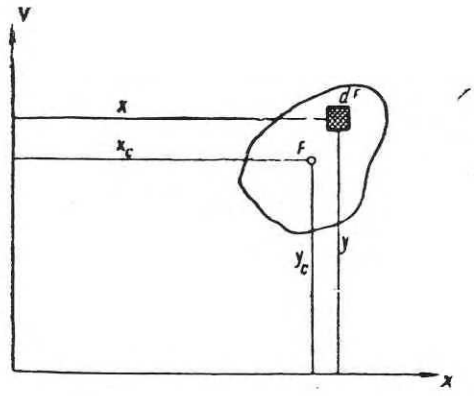
Экваториальные, или осевые, моменты инерции относительно осей x и y определяются следующими выражениями:

$$\left.\begin{aligned} J_x &= \int_F y^2\,dF; \\ J_y &= \int_F x^2\,dF. \end{aligned}\right\} \qquad (3—11)$$

Центробежным моментом инерции называется интеграл произведений элементарных площадок и обеих координат:

$$J_{xy} = \int_F xy\,dF.$$

Центробежный момент инерции в практических расчетах играет чисто вспомогательную роль; с его вычислением приходится иметь дело лишь при расчете элементов несимметричного сечения, когда необходимо найти главные оси.



Фиг. 3—4

Полярный момент инерции относительно выбранной точки (полюса) представляет собой интеграл произведений элементарных площадок dF на квадрат их радиусов — векторов, проведенных из полюса, т. е.:

$$J_p = \int_F r^2\, dF. \qquad (3-12)$$

При параллельном переносе осей координат $x_1=x+a$ и $y_1=y+b$ относительно центральной системы ссей x и y (фиг. 3—5) моменты инерции определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} J_{x_1} &= J_x + b^2 F; \\ J_{y_1} &= J_y + a^2 F. \end{aligned}\right\} \qquad (3-13)$$

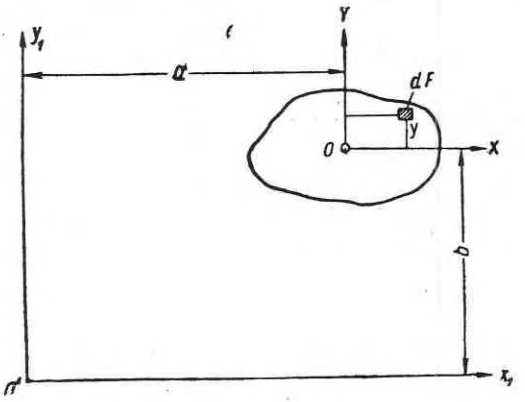
где J_x и J_y — моменты инерции сечения относительно центральной системы осей;
F — площадь сечения;
a и b — расстояния до осей x_1 и y_1 новой системы координат.

Для всякой плоской фигуры существует по крайней мере одна пара взаимно перпендикулярных, проходящих через центр тяжести, осей относительно которых центробежный момент инерции равен нулю. Такие оси называются главными осями инерции фигуры. Для сложных сечений момент инерции находят как сумму моментов инерции отдельных его частей относительно той же оси. Моменты инерции относительно осей x_1 и y_1, составляющих с осями x и y некоторый угол α, определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} J_{x_1} &= \frac{J_x+J_y}{2} + \frac{J_x-J_y}{2}\cos 2\alpha - J_{xy}\sin 2\alpha; \\ J_{y_1} &= \frac{J_x+J_y}{2} - \frac{J_x-J_y}{2}\cos 2\alpha + J_{xy}\sin 2\alpha; \\ J_{x_1 y_1} &= \frac{J_x-J_y}{2}\sin 2\alpha + J_{xy}\cos 2\alpha. \end{aligned}\right\} \qquad (3-14)$$

При расчете и конструировании несимметричных сечений приходится определять главные моменты инерции:

$$J_{\substack{\max\\\min}} = \frac{J_x+J_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{J_x-J_y}{2}\right)^2 + J_{xy}^2}. \qquad (3-15)$$



Фиг. 3—5

Направления главных осей определяются:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{J_{xy}}{J_y - J_{\substack{\max\\\min}}}. \qquad (3-16)$$

При расчете часто надо находить радиус инерции.
Радиус инерции сечения относительно оси x вычисляется по формуле:

$$i_x = \sqrt{\frac{J_x}{F}}. \qquad (3-17)$$

Относительно оси y:

$$i_y = \sqrt{\frac{J_y}{F}}. \qquad (3-18)$$

Отношение момента инерции к расстоянию от оси до наиболее удаленной точки контура сечения называется моментом сопротивления сечения, т. е.

$$W_x = \frac{J_x}{y_{\max}}. \qquad (3-19)$$

Моменты инерции, моменты сопротивления, площади и радиусы сечений некоторых плоских фигур приведены в табл. 3—3.

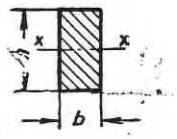
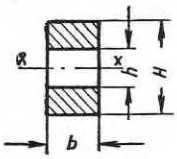
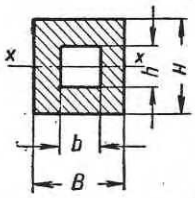
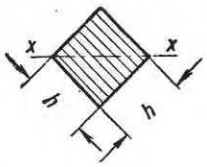
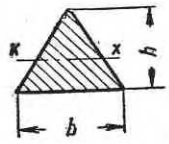
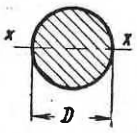
3—3. ИЗГИБ

При чистом изгибе, вызываемом действием пары сил, расположенных в главной плоскости сечения стержня, т. е. в плоскости, проходящей через одну из главных осей сечения (фиг. 3—26,*а, в*), относительная линейная деформация ε выражается следующей зависимостью:

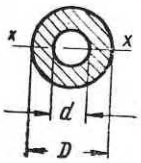
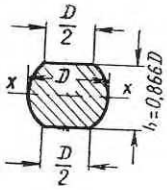
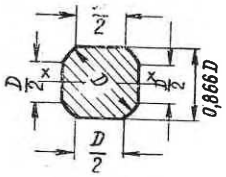
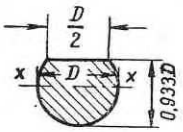
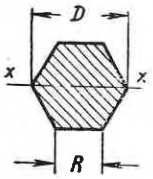
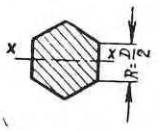
$$\varepsilon = \frac{y}{\rho}, \qquad (3-20)$$

где y — ордината рассматриваемой элементарной площадки сечения от нейтральной оси (нейтральная ось при изгибе проходит через центр тяжести поперечного сечения);
ρ — радиус кривизны изогнутой оси стержня.

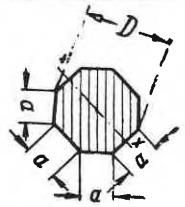
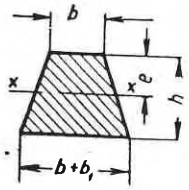
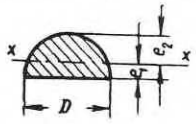
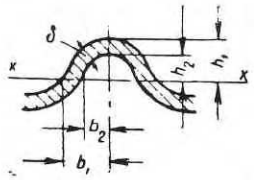
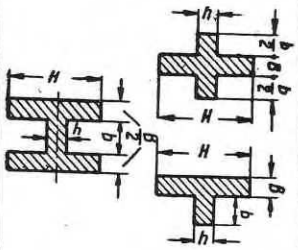
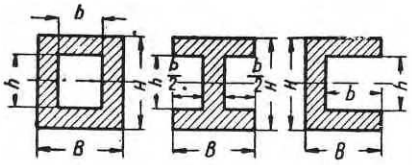
Таблица 3—3

Форма сечения	Момент инерции J_x	Момент сопротивления W_x	Площадь сечения F	Радиус инерции i
 *Фиг.3—6*	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$	bh	$0{,}289h$
 *Фиг.3—7*	$\frac{b(H^3-h^3)}{12}$	$\frac{b(H^3-h^3)}{6H}$	$b(H-h)$	$\sqrt{\frac{H^3-h^3}{12(H-h)}}$
 *Фиг.3—8*	$\frac{BH^3-bh^3}{12}$	$\frac{BH^3-bh^3}{6H}$	$BH-bh$	$\sqrt{\frac{BH^3-bh^3}{12(BH-bh)}}$
 *Фиг.3—9*	$\frac{h^4}{12}$	$\frac{h^3}{6\sqrt{2}}=0{,}1179h^3$	h^2	$0{,}289h$
 *Фиг.3—10*	$\frac{bh^3}{36}$	$\frac{bh^2}{24}$	$\frac{bh}{2}$	$\frac{h}{\sqrt{18}}=0{,}236h$
 *Фиг.3—11*	$\frac{\pi D^4}{64}=0{,}0491D^4$	$\frac{\pi D^3}{32}=0{,}0982D^3$	$\frac{\pi D^2}{4}$	$0{,}25D$

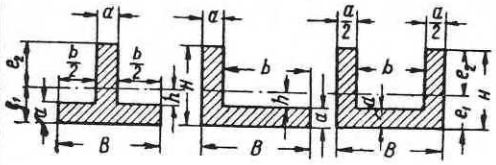
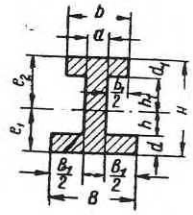
Продолжение табл. 3—3

Форма сечения	Момент инерции J_x	Момент сопротивления W_x	Площадь сечения F	Радиус инерции i
 *Фиг. 3—12*	$\frac{\pi (D^4-d^4)}{64}$	$\frac{\pi (D^4-d^4)}{32\,D}$	$\frac{\pi (D^2-d^2)}{4}$	$\sqrt{\frac{D^2+d^2}{16}}$
 *Фиг. 3—13*	0,039 D^4	0,088 D^3	0,740 D^2	0,23 D
 *Фиг. 3—14*	0,038 D^4	0,087 D^3	0,693 D^2	0,235 D
 *Фиг. 3—15*	0,044 D^4	0,092 D^3	0,763 D^2	0,240 D
 *Фиг. 3—16*	$\frac{5\sqrt{3}}{16} R^4 = 0{,}5413\,R^4$	$\frac{5}{8} R^3$	0,6495 D^2	0,456 R
 *Фиг. 3—17*	$\frac{5\sqrt{3}}{16} R^4 = 0{,}5413\,R^4$	0,5413 R^3	0,6495 D^2	0,456 R

Продолжение табл. 3—3

Форма сечения	Момент инерции J_x	Момент сопротивления W_x	Площадь сечения F	Радиус инерции i
 *Фиг. 3—18*	$\frac{1+2\sqrt{2}}{6}R^4 = 0{,}6381\,R^4$	$0{,}6906\,R^3$	$0{,}707\,D^2$	$0{,}475\,R$
 *Фиг. 3—19*	$\frac{6b^2+6bb_1+b_1^2}{36(2b+b_1)}h^3$ $\left(e=\frac{1}{3}\times\frac{3b+2b_1}{2b+b_1}h\right)$	$\frac{6b^2+6bb_1+b_1^2}{12(3b+2b_1)}h^2$	$(b+0{,}5b_1)h$	$\frac{h}{6(2b+b_1)}\times$ $\times\sqrt{2\left(6bb_1+6b^2+b_1^2\right)}$
 *Фиг. 3—20*	$\frac{D_4}{16}\left(\frac{\pi}{8}-\frac{8}{9\pi}\right)=0{,}00687\,D^4$ $(e_1=0{,}2122D)$	$W_1=0{,}03234D^3$ $W_2=0{,}02385D^3$	$\frac{\pi D^2}{8}$	$0{,}135D$
 *Фиг. 3—21*	$\frac{64}{105}\left(b_1h_1^3-b_2h_2^3\right)$ $(b_1=b_2+1{,}3\delta)$	$\frac{J}{h_1}$	$2(b_1+b_2)5C$, где $C\approx\left[1+\frac{8}{3}\left(\frac{h_1}{2b_1}\right)^2-\right.$ $\left.-\frac{32}{5}\left(\frac{h_1}{2b_1}\right)^4\right]$	—
 *Фиг. 3—22*	$\frac{BH^3+bh^3}{12}$	$\frac{BH^3+bh^3}{6H}$	—	—
 *Фиг. 3—23*	$\frac{BH^3-bh^3}{12}$	$\frac{BH^3-bh^3}{6H}$	—	—

Продолжение табл. 3—3

Форма сечения	Момент инерции J_x	Момент сопротивления W_x	Площадь сечения F	Радиус инерции i
 Фиг. 3—24	$\frac{1}{3}\left(Be_1^3-bh^3+ae_2^3\right)$ $e_1=\frac{1}{2}\frac{aH^2+bd^2}{aH+bd}$ $e_2=H-e_1$	—	—	—
 Фиг. 3—25	$\frac{1}{2}\left(Be_1^3-B_1h^3+be_2^3-b_1h_1^3\right)$; $e_1=\frac{1}{2}\frac{aH^2+B_1d^2+bd_1(2H-d_1)}{aH+B_1d+b_1d_1}$ $e_2=H-e_1$	—	—	—

Соответственно зависимость (3—3) принимает вид:

$$\sigma = E\frac{y}{\rho}\ . \qquad (3—21)$$

Тогда изгибающий момент M, т. е. момент сил, расположенных с одной стороны сечения, относительно нейтральной оси:

$$M=\int_F y\,\sigma\,dF=\frac{1}{\rho}EJ, \qquad (3—22)$$

где $J=\int_F y^2\,dF$ — экваториальный момент инерции;

$\frac{1}{\rho}=\frac{M}{EJ}$ — кривизна изогнутой оси стержня (так называемой упругой линии);

EJ — жесткость сечения при изгибе.

Угол взаимного поворота сечений при изгибе (фиг. 3—26,*б*) равен:

$$d\varphi=\frac{dx}{\rho}=\frac{Mdx}{EJ}\ . \qquad (3-23)$$

Дифференциальное уравнение упругой линии стержня при изгибе может быть получено из (3—22) подстановкой значения $\frac{1}{\rho}$.

Известно, что $\frac{1}{\rho}=\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}$. Считая знаменатель правой части приведенной зависимости равным единице, дифференциальное уравнение упругой линии можно представить в более простом виде:

$$\frac{d^2y}{dx^2}=\pm\frac{M}{EJ}\ .$$

Интегрирование дифференциального уравнения даст возможность получить прогибы.

Первая производная от прогиба даст угол наклона.

Соответственно приведенным зависимостям (3—21) и (3—22) нормальные напряжения при чистом изгибе (фиг. 3—26) определяются формулой:

$$\sigma=\frac{M_x}{J_x}y, \qquad (3-24)$$

где M_x — изгибающий момент;

J_x — момент инерции сечения;

y — расстояние от нейтральной оси до рассматриваемой элементарной площадки сечения.

Нормальные напряжения в крайних точках сечения стержня

$$\sigma_1=\frac{M_x}{J_x}y_1; \qquad (3—25)$$

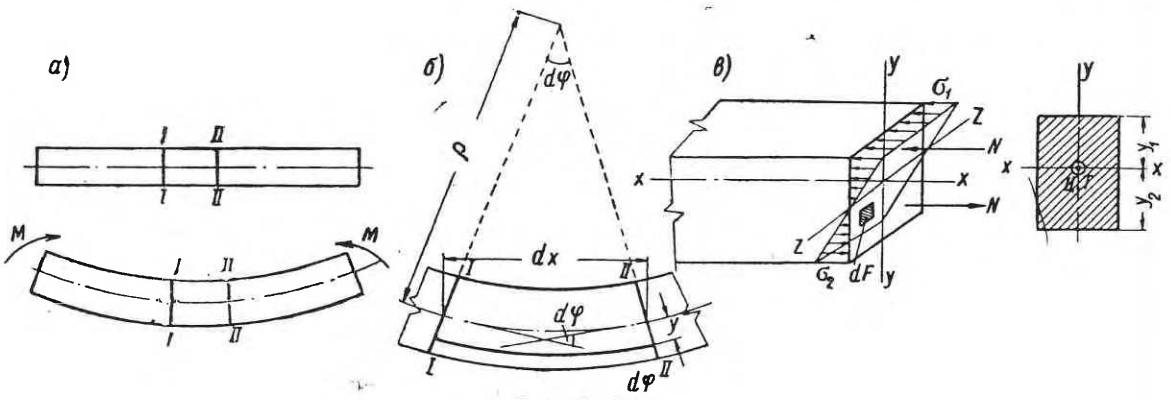
$$\sigma_2=\frac{M_x}{J_x}y_2, \qquad (3—26)$$

где y_1 и y_2 — расстояния от нейтральной оси до крайних точек контура сечения.

Так как $\frac{J_x}{y_1}=W_1$ и $\frac{J_x}{y_2}=W_2$ — моменты сопротивления сечения, то:

$$\sigma_1=\frac{M_x}{W_1}\ ; \qquad (3—25')$$

$$\sigma_2=\frac{M_x}{W_2}\ . \qquad (3—26')$$



Фиг. 3—26

Если, помимо изгибающей пары сил к стержню приложены силы, перпендикулярные к оси, то в поперечном сечении (фиг. 3—27) возникают, кроме нормальных, касательные напряжения.

Касательные напряжения определяются формулой:

$$\tau = \frac{Q_y S_x}{J_x b}, \qquad (3-27)$$

где Q_y — поперечная сила в рассматриваемом сечении;
S_x — статический момент части поперечного сечения относительно нейтральной оси;
b — ширина бруса в рассматриваемом сечении;
J_x — момент инерции сечения.

Нормальные и касательные напряжения на площадках наклонных сечений могут быть больше, чем при нормальных сечениях. Величина их зависит от положения и направления площадок.

Направления, соответствующие экстремальным величинам напряжений, равно как и сами напряжения в этом случае, называются главными.

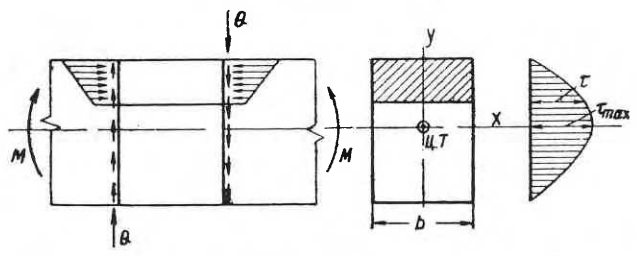
Главные нормальные и наибольшие касательные напряжения при изгибе определяются формулами:

$$\sigma_{\substack{\max\\ \min}} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}; \qquad (3-28)$$

$$\tau_{\substack{\max\\ \min}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}. \qquad (3-29)$$

Углы, составляемые главными площадками (к которым приложены главные напряжения) с осью x, могут быть найдены:

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{\sigma_{\substack{\max\\ \min}}}{\tau}. \qquad (3-30)$$



Фиг. 3—27

Между нагрузкой, поперечными силами и изгибающими моментами для прямого стержня имеют место дифференциальные зависимости:

$$Q = \frac{dM}{dx} \qquad (3-31)$$

и

$$q = -\frac{dQ}{dx}, \qquad (3-32)$$

где M — изгибающий момент, т. е. момент сил, расположенных с одной стороны сечения;
Q — поперечная сила, т. е. проекция на вертикальную ось сил, расположенных с одной стороны сечения;
q — интенсивность нагрузки.

На фиг. 3—28 дан пример построения эпюр Q и M для балки, частично загруженной равномерно распределенной нагрузкой.

В данном примере изгибающий момент в сечении на расстоянии x от левой опоры:

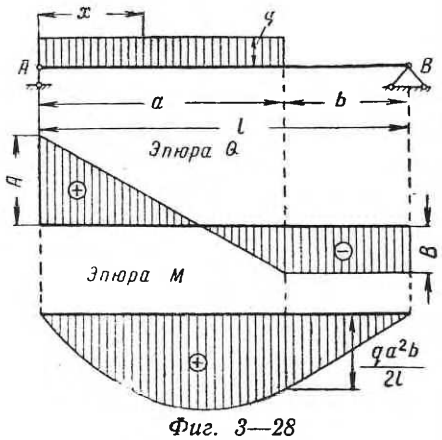
$$M_x = Ax - \frac{qx^2}{2}.$$

Поперечная сила в том же сечении

$$Q_x = \frac{dM_x}{dx} = A - qx,$$

где A — опорная реакция, равная $\frac{qa(2b+a)}{2l}$.

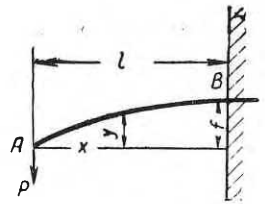
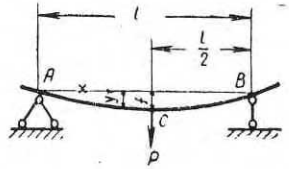
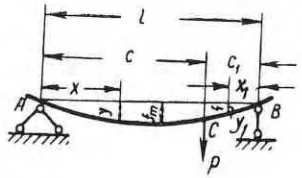
Опорные реакции, изгибающие моменты и прогибы однопролетных балок с различными нагрузками даны в п. 3—4.

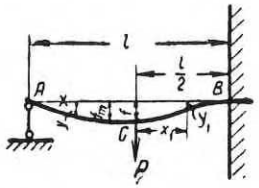
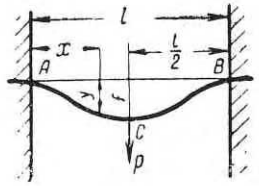


Фиг. 3—28

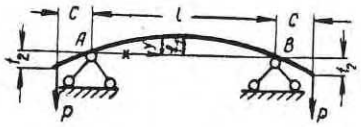
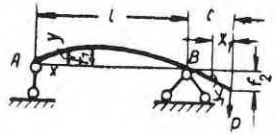
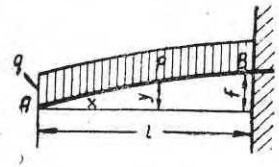
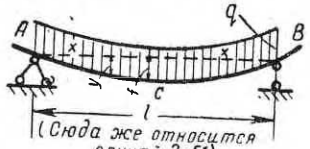
3—4. ОПОРНЫЕ РЕАКЦИИ, МАКСИМАЛЬНЫЕ ИЗГИБАЮЩИЕ МОМЕНТЫ И ПРОГИБЫ ОДНОПРОЛЕТНЫХ БАЛОК

Таблица 3—4

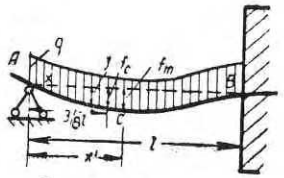
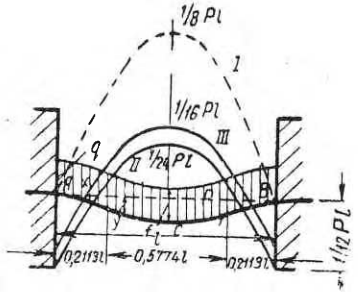
Род нагрузки	Сопротивление опор *A*, *B*. Изгибающий момент *M*	Нагрузка *P*. Необходимый момент сопротивления *W*	Уравнение упругой линии	Прогиб *f*	Примечание
 Фиг. 3—29	$B = P$ $M = Px$ $M_{max} = Pl$	$P = \frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{2EJ}\left(\frac{x}{l} - \frac{1}{3}\cdot\frac{x^3}{l^3}\right)$ $\operatorname{tg}\beta = \frac{dy}{dx} = \frac{Pl^3}{2EJ}\left(\frac{1}{l} - \frac{x^2}{l^3}\right)$ $\operatorname{tg}\beta_{(x=0)} = \frac{Pl^2}{2EJ} = \frac{3f}{2l}$	$f = \frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{3} = \frac{2}{3}\cdot\frac{[\sigma]}{E}\cdot\frac{l^2}{h}$	Балка, защемленная одним концом Опасное сечение у *B*
 Фиг. 3—30	$A = B = \frac{P}{2}$ $M = \frac{Px}{2}$ $M_{max} = \frac{Pl}{4}$	$P = 4\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{4[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{16\,EJ}\left(\frac{x}{l} - \frac{4}{3}\cdot\frac{x^3}{l^3}\right)$	$f = \frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{48} = \frac{1}{6}\cdot\frac{[\sigma]\,l^2}{Eh}$	Балка, свободно лежащая на опорах Опасное сечение посередине
 Фиг. 3—31	$A = \frac{Pc_1}{l}$; $B = \frac{Pc}{l}$ Для *AC* $M = \frac{Pc_1x}{l}$ Для *BC* $M = \frac{Pcx_1}{l}$ $M_{max} = \frac{Pcc_1}{l}$	$P = [\sigma]\,W\,\frac{l}{cc_1}$ $W = \frac{Pcc_1}{l\,[\sigma]}$	$y = \frac{P}{EJ}\cdot\frac{c^2c_1^2}{6l}\times\left(2\frac{x}{c} + \frac{x}{c_1} - \frac{x^3}{c^2c_1}\right)$ $y_1 = \frac{Pc_1^2c^2}{EJ\cdot 6l}\times\left(2\frac{x_1}{c_1} + \frac{x_1}{c} - \frac{x_1^3}{c_1^2c}\right)$	$f = \frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{3}\times\frac{c^2}{l^2}\cdot\frac{c_1^2}{l^2}$ f_{max} для $x = c\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{2c_1}{3c}}$, если $c > c_1$; $x = c_1\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{2c}{3c_1}}$, если $c < c_1$	Балка, лежащая свободно на опорах Опасное сечение у *C*

Род нагрузки	Сопротивление опор *A*, *B*. Изгибающий момент *M*	Нагрузка *P*. Необходимый момент сопротивления *W*	Уравнение упругой линии	Прогиб *f*	Примечание
 *Фиг. 3—32*	$A=\frac{5}{16}P$ $B=\frac{11}{16}P$ Для AC $M=\frac{5}{16}Px$ Для C $M=\frac{5}{32}Pl$ Для BC $M=Pl\left(\frac{5}{32}-\frac{11}{16}\cdot\frac{x_1}{l}\right)$ $M_{max}=\frac{3}{16}Pl$	$P=\frac{16}{3}\cdot\frac{[\sigma]W}{l}$ $W=\frac{3}{16}\cdot\frac{Pl}{[\sigma]}$	$y=\frac{P}{EJ}\frac{l^3}{22}\left(\frac{x}{l}-\frac{5}{3}\cdot\frac{x^3}{l^3}\right)$ $y_1=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 32}\left(\frac{x_1}{4l}+\frac{5x_1^2}{2l^2}-\frac{11}{3}\cdot\frac{x_1^3}{l^3}\right)$	$f=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{7l^3}{768}$ для $x=l\sqrt{\frac{1}{5}}$ $f_{max}=\sqrt{\frac{1}{5}}\cdot\frac{Pl^3}{48EJ}$	Полузащемленная балка Опасное сечение у B Точка перегиба у $x_1=\frac{5}{22}l$
 *Фиг. 3—33*	$A=B=\frac{P}{2}$ Для AC $M=\frac{Pl}{2}\left(\frac{x}{l}-\frac{1}{4}\right)$ Для CB $M=\frac{Pl}{2}\left(\frac{x}{l}-\frac{3}{4}\right)$ $M_{max}=\frac{Pl}{8}$	$P=8\frac{[\sigma]W}{l}$ $W=\frac{Pl}{8[\sigma]}$	$y=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 16}\left(\frac{x^2}{l^2}-\frac{4}{3}\cdot\frac{x^3}{l^3}\right)$	$f=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{192}=\frac{1}{12}\cdot\frac{[\sigma]l^2}{Eh}$	Защемленная балка Опасные сечения у A, B и C Точки перегиба у $x=\frac{1}{4}l$ и $x=\frac{3}{4}l$

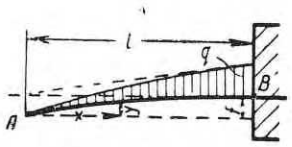
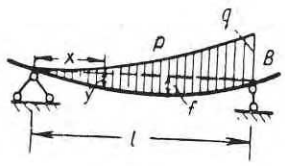
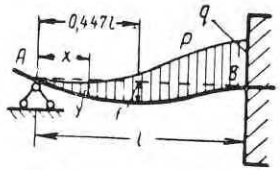
Продолжение табл. 3—4

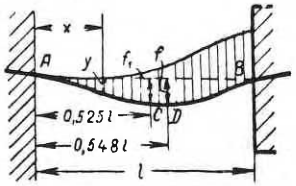
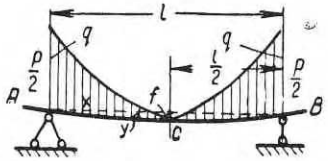
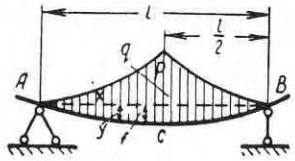
Род нагрузки	Сопротивление опор A, B. Изгибающий момент M	Нагрузка P. Необходимый момент сопротивления W	Уравнение упругой линии	Прогиб f	Примечание
 *Фиг. 3—34*	$A = B = P$ для AB $M = Pc = \text{const}$	$P = \frac{[\sigma]\,W}{c}$ $W = \frac{Pc}{[\sigma]}$	$y = f_1 - \left[\rho - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{1}{2}l - x\right)^2}\right]$, где $\rho = \frac{EJ}{Pc} = \text{const}$ Упругая линия между A и B имеет форму дуги круга с радиусом ρ	f_1 в середине расстояния, между опорами $f_1 = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{8} \cdot \frac{c}{l} = \frac{1}{4} \cdot \frac{[\sigma]}{E} \cdot \frac{l^2}{h} = \frac{l^2}{8\rho}$ $f_2 = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{c^2}{3} \times \left(c + \frac{3l}{2}\right)$	Двухконсольная балка, лежащая свободно на опорах Опасное сечение в любом месте между A и B
 *Фиг. 3—35*	$A = -\frac{Pc}{l}$; $B = \frac{P(l+c)}{l}$ $M_x = Ax = \frac{Pcx}{l}$ $M_B = Pc$	$P = \frac{[\sigma]\,W}{c}$ $W = \frac{Pc}{[\sigma]}$	$y = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^2 c}{6} \times \left(\frac{x}{l} - \frac{x^3}{l^3}\right)$ $y_1 = \frac{Plc^2}{EJ \cdot 6} \times \left(\frac{2l+3c}{l} \cdot \frac{x_1}{c} - \frac{x_1^3}{lc^2} - 2\frac{l+c}{l}\right)$	Максимальный прогиб на длине AB в C для $x = \frac{l}{\sqrt{3}} = 0{,}577\,l$ $f_1 = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^2 c}{9\sqrt{3}}$ $f_2 = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{(l+c)c^2}{3}$	Одноконсольная балка, лежащая свободно на опорах Опасное сечение в B
 *Фиг. 3—36*	$B = P = ql$ $M = \frac{Px^2}{2l}$ $M_{\max} = \frac{Pl}{2}$	$P = 2\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{2[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{EJ \cdot 6} \times \left(\frac{x}{l} - \frac{1}{4} \cdot \frac{x^4}{l^4}\right)$	$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{8} = \frac{1}{2} \cdot \frac{[\sigma]\,l^2}{Eh}$	Балка, защемленная одним концом Опасное сечение у B
 (Сюда же относится случай 3-51) *Фиг. 3—37*	$A = B = \frac{P}{2} = \frac{ql}{2}$ $M = \frac{Px}{2}\left(1 - \frac{x}{l}\right)$ $M_{\max} = \frac{Pl}{8}$	$P = 8\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{8[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{EJ \cdot 24}\left(\frac{x}{l} - 2\frac{x^3}{l^3} + \frac{x^4}{l^4}\right)$ $\operatorname{tg}\beta_{(x=0)} = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^2}{24} = 3{,}2\frac{f}{l}$	$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{5l^3}{384} = \frac{5}{24} \cdot \frac{[\sigma]\,l^2}{Eh}$	Балка, лежащая свободно на опорах Опасное сечение по середине балки

Продолжение табл. 3—4

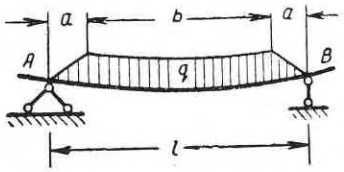
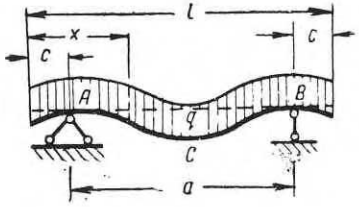
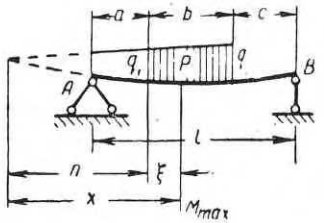
Род нагрузки	Сопротивление опор A, B. Изгибающий момент M	Нагрузка P. Необходимый момент сопротивления W	Уравнение упругой линии	Прогиб f	Примечание
 *Фиг. 3—38*	$A=\frac{3}{8}P;\ P=ql;$ $B=\frac{5}{8}P$ $M=\frac{Px}{2}\left(\frac{3}{4}-\frac{x}{l}\right)$ $M_{max}=\frac{Pl}{8}$ (абсолютный максимум) $M_c=\frac{9}{128}Pl$ (относительный максимум) при $x=\frac{3}{8}l$	$P=8\frac{[\sigma]\,W}{l}$ (нагрузка не больше чем в фиг. 3—37) $W=\frac{Pl}{8[\sigma]}$	$y=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 48}\times$ $\times\left(\frac{x}{l}-3\frac{x^3}{l^3}+2\frac{x^4}{l^4}\right)$	$f_{max}=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{185}$, где $\frac{1}{185}=\frac{78+110\sqrt{33}}{2\cdot 16^4}$ $f_c=\frac{175}{8^5}\cdot\frac{Pl^3}{EJ}=$ $=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 187}$	Полузащемленная балка Опасное сечение у B Прогиб f_{max} при $x'=$ $=\frac{1}{16}l\left(1+\sqrt{33}\right)=$ $=0{,}4215\,l$ Точка перегиба при $x=\frac{3}{4}l$; M_c при $x=\frac{3}{8}l$
 *Фиг. 3—39*	$A=B=\frac{P}{2}=\frac{ql}{2}$ $M=-\frac{Pl}{2}\left(\frac{1}{6}-\frac{x}{l}+\frac{x^2}{l^2}\right)$ $M_{max}=\frac{1}{12}Pl$ (абсолютный максимум) $M_C=\frac{1}{24}Pl$ (относительный максимум)	$P=12\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W=\frac{Pl}{12[\sigma]}$	$y=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{24}\left(\frac{x^2}{l^2}-2\frac{x^3}{l^3}+\frac{x^4}{l^4}\right)$ Пояснение к схеме на фиг. 3—39 Парабола I: кривая моментов для балки, лежащей свободно на опорах A и B (схема на фиг. 3—37) Парабола II: то же, для случая жесткого защемления в A и B (схема на фиг. 3—39) Парабола III: то же, для способа защемления в A и B, соответствующего наименьшему M_{max}; в этом случае $M_A=M_B=M_C=$ $=\frac{1}{16}Pl$	$f=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{384}=$ $=\frac{1}{16}\cdot\frac{[\sigma]l^2}{Eh}$	Балка защемленная Опасное сечение у A и B Точки перегиба при $x=\frac{1}{2}l\left(1\pm\sqrt{\frac{1}{3}}\right)$, т. е. $x_1=0{,}7887\,l$ и $x_2=0{,}2113\,l$

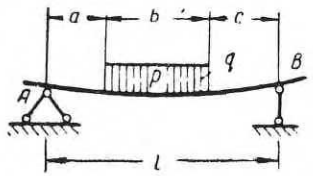
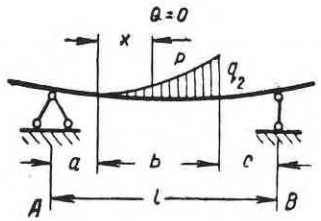
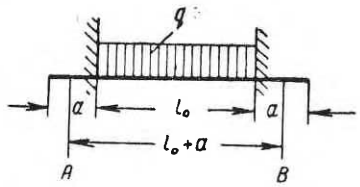
Продолжение табл. 3—4

Род нагрузки	Сопротивление опор A, B. Изгибающий момент M	Нагрузка P. Необходимый момент сопротивления W	Уравнение упругой линии	Прогиб f	Примечание
 *Фиг. 3—40*	$B = P = \frac{ql}{2}$ $M = \frac{P}{3} \cdot \frac{x^3}{l^2}$ $M_{max} = \frac{Pl}{3}$	$P = 3\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{3[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{EJ \cdot 12}\left(\frac{x}{l} - \frac{1}{5} \cdot \frac{x^5}{l^5}\right)$	$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{15} = \frac{2}{5} \cdot \frac{[\sigma]\,l^2}{Eh}$	Балка, защемленная одним концом Опасное сечение у B
 *Фиг. 3—41*	$A = \frac{1}{3}P;\ B = \frac{2}{3}P$ $M = \frac{P}{3}x\left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right)$ $M_{max} = \frac{2}{9\sqrt{3}}Pl = 0{,}128\,Pl$	$P = \frac{9\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{[\sigma]\,W}{l} = 7{,}794\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{7{,}794\,[\sigma]}$	$y = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{180}\left(7\frac{x}{l} - 10\frac{x^3}{l^3} + 3\frac{x^5}{l^5}\right)$	Наибольший прогиб при $x = l\sqrt{1 - \sqrt{\frac{8}{15}}} = 0{,}5193\,l$ $f = \frac{Pl^3}{LJ} \times \frac{2+5\sqrt{\frac{8}{15}}}{225} \times \sqrt{1 - \sqrt{\frac{8}{15}}} = 0{,}01304\,\frac{Pl^3}{EJ}$	Балка, лежащая свободно на опорах Опасное сечение при $x = \frac{l}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}l\sqrt{3} = 0{,}5774\,l$
 *Фиг. 3—42*	$A = \frac{1}{5}P;\ B = \frac{4}{5}P$ $M_x = Px\left(\frac{1}{5} - \frac{x^2}{3l^2}\right)$ $M_{max} = M_B = \frac{Pl}{7{,}5}$ $M_C = 0{,}0596\,Pl$	$P = 7{,}5\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W = \frac{Pl}{7{,}5\,[\sigma]}$	$y = \frac{Pl^3}{EJ \cdot 60}\left(-\frac{x}{l} + 2\frac{x^3}{l^3} - \frac{x^5}{l^5}\right)$	Наибольший прогиб в C для $x = \frac{l}{\sqrt{5}} = 0{,}447\,l$ $f = \frac{1}{209{,}63} \cdot \frac{Pl^3}{EJ}$	Полузащемленная балка Опасное сечение у B Наибольший момент M_C в C при $x = \frac{l}{\sqrt{5}} = 0{,}447\,l$ Точка перегиба при $x = l\sqrt{0{,}6} = 0{,}775\,l$

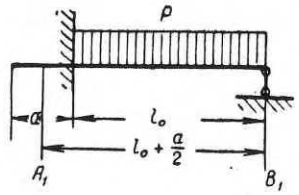
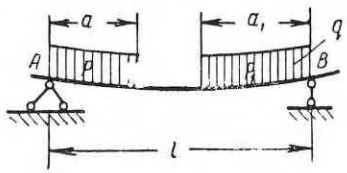
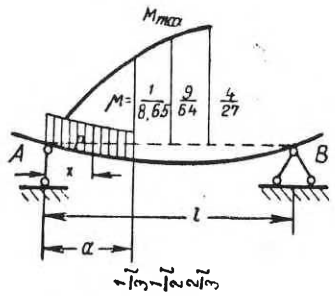
Род нагрузки	Сопротивление опор A, B. Изгибающий момент M	Нагрузка P. Необходимый момент сопротивления W	Уравнения упругой линии	Прогиб f	Примечание
 *Фиг. 3—43*	$A=\frac{3}{10}P$; $B=\frac{7}{10}P$ $M=Pl\left(-\frac{1}{15}+\right.$ $\left.+\frac{3}{10}\cdot\frac{x}{l}-\frac{1}{3}\cdot\frac{x^3}{l^3}\right)$ $M_{\max}=M_B=-\frac{Pl}{10}$ $M_A=\frac{Pl}{15}$ $M_D=\frac{Pl}{23{,}3}$	$P=10\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W=\frac{Pl}{10\,[\sigma]}$	$y=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 60}\left(-2\frac{x^2}{l^2}+\right.$ $\left.+3\frac{x^3}{l^3}-\frac{x^5}{l^5}\right)$	Наибольший прогиб в C при $x=\left(-\frac{1}{2}+\right.$ $\left.+\sqrt{\frac{21}{20}}\right)l=$ $=0{,}525\,l$ $f=\frac{1}{382}\cdot\frac{Pl^3}{EJ}$	Балка защемленная Опасное сечение у B Наибольший момент M_D в D при $x=l\sqrt{0{,}3}=0{,}548l$ Точка перегиба при $x=0{,}237\,l$ и $x=0{,}808l$
 *Фиг. 3—44*	$A=B=\frac{P}{2}=\frac{ql}{4}$ $M=Px\left(\frac{1}{2}-\right.$ $\left.-\frac{x}{l}+\frac{2x^2}{3l^2}\right)$ $M_{\max}=\frac{Pl}{12}$	$P=12\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W=\frac{Pl}{12\,[\sigma]}$	$y=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 12}\left(\frac{3x}{8l}-\right.$ $\left.-\frac{x^3}{l^3}+\frac{x_4}{l^4}-\frac{2}{5}\cdot\frac{x^5}{l^5}\right)$	$f=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{3l^3}{320}=$ $=\frac{9}{40}\frac{[\sigma]l^2}{Eh}$	Балка, свободно лежащая на опорах Опасное сечение по середине балки
 *Фиг. 3—45*	$A=B=\frac{P}{2}=\frac{ql}{4}$ $M=Px\left(\frac{1}{2}-\right.$ $\left.-\frac{2}{3}\cdot\frac{x^2}{l^2}\right)$; $M_{\max}=\frac{Pl}{6}$	$P=6\frac{[\sigma]\,W}{l}$ $W=\frac{Pl}{6\,[\sigma]}$	$y=\frac{Pl^3}{EJ\cdot 12}\left(\frac{5x}{8l}-\right.$ $\left.-\frac{x^3}{l^3}+\frac{2}{5}\cdot\frac{x^5}{l^5}\right)$	$f=\frac{P}{EJ}\cdot\frac{l^3}{60}=$ $=\frac{1}{5}\cdot\frac{[\sigma]\,l^2}{Eh}$	Балка, свободно лежащая на опорах Опасное сечение по середине балки

Продолжение табл. 3—4

Род нагрузки	Сопротивление опор A и B	Наибольший изгибающий момент $M_{max}=W[\sigma]$
 *Фиг. 3—46*	$A=B=\frac{P}{2}=\frac{q}{2}(l-a)$ При $b=0$ имеем случай схемы на фиг. 3—45	$W[\sigma]=\frac{8a^2+3b(4a+b)}{24(a+b)}P$
 *Фиг. 3—47*	$A=B=\frac{P}{2}=\frac{ql}{2}$	Для AB имеем: $M_x=\frac{Px}{2}\left(1-\frac{c}{x}-\frac{x}{l}\right)$ Для $x\leqslant c$ $M_x=-\frac{Px^2}{2l}$
	Наибольшие величины $M_A=M_B=\frac{Pc^2}{2l}$ и (для середины балки) $M_C=\frac{P}{2}\left(\frac{l}{4}-c\right)$, по своим абсолютным значениям равны при $c=\left(\sqrt{\frac{1}{2}}-\frac{1}{2}\right)l=0{,}207\,l$: $M_A=M_C=M_{max}=0{,}021447\,Pl\approx\frac{1}{47}Pl.$ Имеем, следовательно: $W=\frac{Pl}{47[\sigma]}$ и $P=47\frac{[\sigma]W}{l}$, т. е. в том случае, когда a=0,586 l нагрузка почти в 6 раз больше, чем в случае схемы фиг. 3—37. Точка перегиба при $x=\frac{l}{2}\pm\sqrt{\frac{l^2}{4}-cl}$.	
 *Фиг. 3—48*	$A=\frac{P}{l}\left(c+\frac{bq_2+2q_1}{3q_2+q_1}\right)$ $B=P-A$ $P=\frac{q_1+q_2}{2}b$; $n=\frac{q_1b}{q_2-q_1}$ M_{max} при $x=\sqrt{n^2+\frac{2nA}{q_1}}$	$W[\sigma]=M_{max}=\frac{1}{3}A\left(3a+2\xi-\frac{\xi n}{\lambda}\right)$, где $\lambda=x+n$ $\xi=x-n$

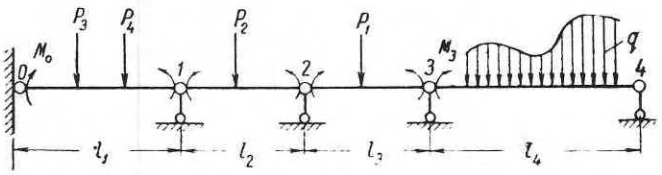
Род нагрузки	Сопротивление опор A и B	Наибольший изгибающий момент $M_{max}=W[\sigma]$
 Фиг. 3—49	При $q_1 = q_2$ имеем: $A = \frac{P(2c+b)}{2l}$; $B = \frac{P(2a+b)}{2l}$ Если, кроме того, $a = c$, то $A = B = \frac{P}{2}$	При $q_1 = q_2$ имеем: $W[\sigma] = A\left(a + \frac{bA}{2P}\right)$ Если, кроме того, $a = c$, то: $W[\sigma] = \frac{P}{2}\left(\frac{l}{2} - \frac{b}{4}\right)$
 Фиг. 3—50	При $q_1 = 0$ имеем: $A = \frac{P}{l}\left(c + \frac{b}{3}\right)$; $B = \frac{P}{l}\left(a + \frac{2}{3}b\right)$ M_{max} при $x = \sqrt{\frac{2bA}{q_2}} = b\sqrt{\frac{A}{P}}$	При $q_1 = 0$ имеем: $W[\sigma] = M_{max} = A\left(a + \frac{2}{3}x\right) = A\left(a + \frac{2}{3}b\sqrt{\frac{A}{P}}\right)$
 Фиг. 3—51	$A = B = \frac{P}{2}$	$M_{max} = \frac{P}{8}(l_0 + 2a)$

Продолжение табл. 3—4

Род нагрузки	Сопротивление опор A и B	Наибольший изгибающий момент $M_{max} = W[\sigma]$
 *Фиг. 3—52*	$A_1 \approx B_1 = \frac{P}{2}$	$M_{max} = \frac{P}{8}(l_0 + a)$
 *Фиг. 3—53*	$A = \frac{P(2l-a) + P_1 a_1}{2l}$ $B = \frac{P_1(2l - a_1) + Pa}{2l}$ Если $P=P_1$, $a = a_1$ и $l - 2a = b$, то: $A = B = P$	При $A < P$ $W[\sigma] = \frac{A^2 a}{2P}$ При $B < P_1$ $W[\sigma] = \frac{B^2 a_1}{2P_1}$ При $A = B = P$ $W[\sigma] = \frac{1}{2} Pa = \frac{1}{4} P(l - b)$
 *Фиг. 3—54*	$A = \frac{P(2l - a)}{2l}$; $B = \frac{Pa}{2l}$ M_{max} при $x = a\left(1 - \frac{a}{2l}\right) < a$	$M_{max} = W[\sigma] = \frac{P}{2} a \left(1 - \frac{a}{2l}\right)^2 = \mu Pl$, где $\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{l}\left(1 - \frac{a}{2l}\right)^2$ $\mu_{max} = \frac{4}{27}$ при $a = \frac{2}{3} l$, тогда $x = \frac{4}{9} l$

3—5. ОПОРНЫЕ РЕАКЦИИ И ИЗГИБАЮЩИЕ МОМЕНТЫ НЕРАЗРЕЗНЫХ БАЛОК

Неразрезная балка является системой статически неопределимой, причем, если крайние опоры балки допускают свободное вращение опорного сечения, то число лишних неизвестных балки равно $(n-1)$, где n—число



Фиг. 3—55

пролетов. Заделка крайней опоры увеличивает число лишних неизвестных на единицу.

В качестве лишних неизвестных в неразрезных балках обычно выбираются опорные моменты.

Для расчета балку обращают в статически определимую постановкой шарниров на опорах, принимая все опоры, кроме одной, подвижными вдоль оси балки (фиг. 3—55).

Чтобы такая балка работала как заданная, необходимо приложить моменты M_0, M_1, ...

Числа над опорами дают порядковый номер опоры, номер пролета равен номеру правой опоры пролета.

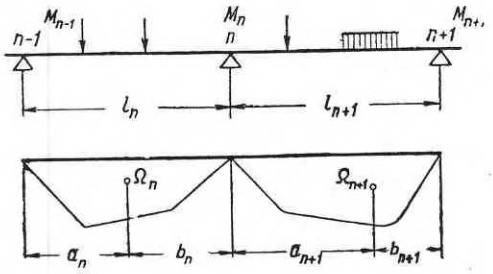
Опорные моменты считаются положительными, если они стремятся выгнуть примыкающие пролеты выпуклостью вниз.

1. Неразрезная балка на жестких опорах

Каждые три последовательно взятых опорных момента M_{n-1}, M_n, M_{n+1} неразрезной балки связаны уравнением трех моментов, полученным из условия отсутствия взаимного поворота в шарнире, сопрягающем два соседних пролета. В случае, когда жесткость EJ постоянна по всей длине балки, это уравнение имеет вид:

$$M_{n-1}\,l_n + 2M_n\,(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1}\,l_{n+1} = -6\left(\frac{\Omega_n\,a_n}{l_n} + \frac{\Omega_{n+1}\,b_{n+1}}{l_{n+1}}\right), \qquad (3—33)$$

где M_{n-1}, M_n и M_{n+1} — опорные моменты (фиг. 3—56);
l_n и l_{n+1} — длины сопрягающихся пролетов;



Фиг. 3—56

$\frac{\Omega_n a_n}{l_n}$ и $\frac{\Omega_{n+1} b_{n+1}}{l_{n+1}}$ — фиктивные опорные реакции n-й опоры от моментных площадей Ω_n и Ω_{n+1} в n-м и $(n+1)$-м пролетах, полученных от внешней нагрузки как для отдельных свободно опертых балок (фиг. 3—56).

Число уравнений трех моментов (3—33) для неразрезной балки равно числу промежуточных опор. Если крайняя опора балки заделана, то уравнение трех моментов составляется при помощи введения дополнительного крайнего пролета величиной, равной нулю.

ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТРЕХ МОМЕНТОВ

1. Четырехпролетная балка, шарнирно опертая по концам (фиг. 3—57).

Система уравнений трех моментов для нее будет иметь вид:

$$1)\ 2M_1\,(5+4) + M_2 \cdot 4{,}0 = -6\,\frac{ql_1^3}{24};$$

$$2)\ M_1 \cdot 4 + 2M_2\,(4+6) + M_3 \cdot 6 = -6\,\frac{Pl_3^2}{16};$$

$$3)\ M_2 \cdot 6 + 2M_3\,(6+5) = -6\,\frac{Pl_3^2}{16};$$

Подставляя величины нагрузок, окончательно получим:

$$1)\ 18\,M_1 + 4M_2 = -31{,}25;$$

$$2)\ 4M_1 + 20M_2 + 6M_3 = -54;$$

$$3)\ 6M_2 + 22M_3 = -54.$$

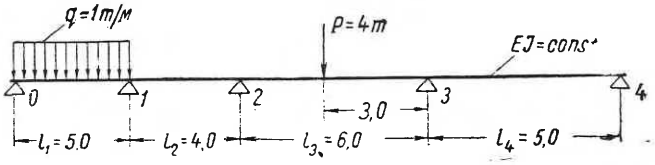
Решение системы уравнений дает величины опорных моментов M_1, M_2 и M_3.

2) Та же балка, но с левой крайней опорой заделанной.

Вводится в расчет фиктивный пролет $l_0=0$, что дает дополнительное уравнение:

$$2M_0\,(0+5) + M_1 \cdot 5 = -6\,\frac{ql_1^3}{24}.$$

Остальные три уравнения остаются без изменений.



Фиг. 3—57

Если жесткость EJ различна для разных пролетов балки, но постоянна по длине каждого пролета, то уравнение трех моментов принимает вид:

$$M_{n-1}\frac{l_n}{J_n}+2M_n\left(\frac{l_n}{J_n}+\frac{l_{n+1}}{J_{n+1}}\right)+M_{n+1}\frac{l_{n+1}}{J_{n+1}}=$$
$$=-6\left(\frac{\Omega_n a_n}{l_n J_n}+\frac{\Omega_{n+1} b_{n+1}}{l_{n+1} J_{n+1}}\right), \qquad (3-34)$$

где J_n и J_{n+1} — моменты инерции сечений балки в пролетах l_n и l_{n+1}, а модуль упругости E=const по всей длине балки.

2. Неразрезная балка на упругих опорах

В случае осадки опор, пропорциональной величинам опорных реакций, каждые пять последовательно взятых опорных моментов связаны уравнением пяти моментов, которое для балки постоянной жесткости имеет следующий вид в неявной форме:

$$M_{n-1}\,l_n+2M_n\,(l_n+l_{n+1})+M_{n+1}\,l_{n+1}=$$
$$=-6\left(\frac{\Omega_n a_n}{l_n}+\frac{\Omega_{n+1}\,b_{n+1}}{l_{n+1}}\right)+6EJ\,(\varphi_n-\varphi_{n+1}) \qquad (3-35)$$

Здесь φ_n и φ_{n+1} — углы поворота n-го и $(n+1)$-го пролетов, которые выражаются через осадки опор следующим образом:

$$\varphi_n=\frac{h_n-h_{n-1}}{l_n};\quad \varphi_{n+1}=\frac{h_{n+1}-h_n}{l_{n+1}}. \qquad (3-36)$$

Углы поворота φ следует принимать положительными, если смещение происходит по часовой стрелке, т. е. осадка последующей опоры больше предыдущей (фиг. 3—58).

Величины осадок выражаются через усилия в балке, так:

$$h_n=\frac{1}{D}\left(B_n+A_{n+1}+\right.$$
$$\left.+\frac{M_{n+1}-M_n}{l_{n+1}}-\frac{M_n-M_{n-1}}{l_n}\right), \qquad (3-37)$$

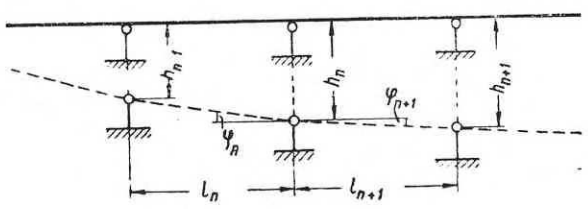
где D — усилие в *кг/см*, *т/м*, вызывающее осадку опоры, равную единице длины;

B_n — опорная реакция на опоре n пролета l_n, рассматриваемого как простая балка;

A_{n+1} — опорная реакция на опоре n пролета l_{n+1} рассматриваемого как простая балка.

Пример. Балка, изображенная на фиг. 3—57, имеет опоры *1* и *2* упругие;

$EJ=10^4\ тм^2$; $D_1=D_2=500\ т/м$;



Фиг. 3—58

$$D_0=D_3=D_4=\infty;\ h_0=h_3=h_4=0;$$
$$B_1=\frac{1\cdot 5}{2}=2{,}5\ т;\ A_2=0;$$
$$B_2=0;\ A_3=\frac{4}{2}=2\ т;$$
$$h_1=\frac{1}{500}\left(2{,}5+\frac{M_2-M_1}{4}-\frac{M_1}{5}\right)=$$
$$=0{,}0005\,M_2-0{,}0009\,M_1+0{,}005;$$
$$h_2=\frac{1}{500}\left(2+\frac{M_3-M_2}{6}-\frac{M_2-M_1}{5}\right)=$$
$$=0{,}000333\,M_3-0{,}000733\,M_2+0{,}0004\,M_1+0{,}004;$$
$$6EJ\,\varphi_1=6\,\frac{h_1-h_0}{5}\,10^4=6M_2-10{,}8\,M_1+5;$$
$$6EJ\,\varphi_2=6\,\frac{h_2-h_1}{4{,}0}\,10^4=5M_3-11M_2+6M_1+6;$$
$$6EJ\,\varphi_3=6\,\frac{h_3-h_2}{6}\,10^4=-3{,}33\,M_3+7{,}33M_2-4M_1-4.$$

Уравнение пяти моментов:

1) $18M_1+4M_2=-1\,560+6M_2-10{,}8\,M_1+5-$
$-5M_3+11M_2-6M_1-6;$

2) $4M_1+20M_2+6M_3=-2\,700+5M_3+11M_2-$
$-6M_1-6+3{,}33M_3-7{,}33\,M_2+4M_1+4;$

3) $6M_2+22M_3=-27-3{,}33M_3+7{,}33M_2-4M_1-4.$

После преобразований окончательно получим:

1) $34{,}8M_1-13M_2+5M_3=-16{,}6;$

2) $6M_1+25{,}67M_2-2{,}53M_3=-29;$

3) $4M_1-1{,}33M_2+25{,}33M_3=-31.$

Выражения (3—35) и (3—36) могут служить также для расчета балки с заданными осадками.

Тогда величины смещения опор h являются заданными, т. е. не зависят от усилий в балке, и уравнение (3—35) принимает вид уравнения трех моментов.

3. Определение усилий в пролетах неразрезной балки

После определения опорных моментов расчет неразрезной балки сводится к расчету простых балок с пролетами l_1, l_2, l_3 и т. д.

Изгибающий момент M_x и поперечная сила Q_x в сечении n-го пролета, отстоящем на расстоянии x от левой опоры, находятся по формулам:

$$M_x=M_x^0+M_{n-1}\,\frac{l_n-x}{l_n}+M_n\,\frac{x}{l_n}; \qquad (3-38)$$

$$Q_x=Q_x^0+\frac{M_n-M_{n-1}}{l_n}, \qquad (3-39)$$

где M_x^0 и Q_x^0 — момент и поперечная сила в рассматриваемом сечении как в простой балке;

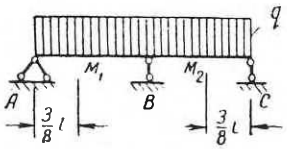
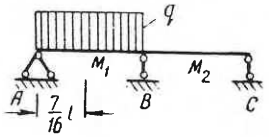
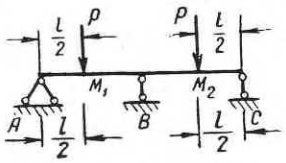
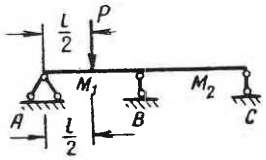
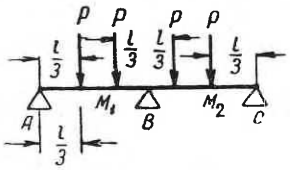
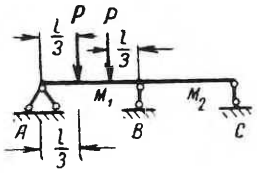
M_{n-1} и M_n — опорные моменты на n—1-й и n-й опорах;

l_n — длина n-го пролета.

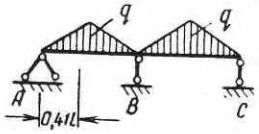
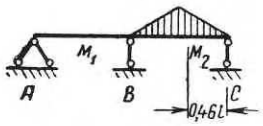
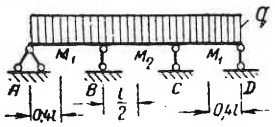
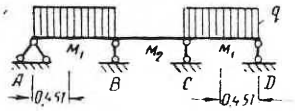
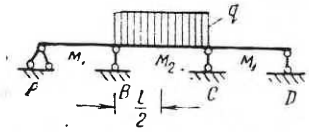
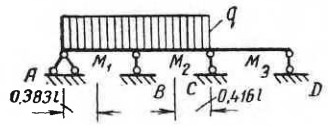
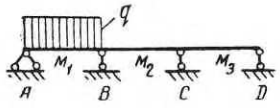
Опорные реакции и изгибающие моменты для неразрезных балок с различными нагрузками, равными пролетами и постоянной жесткостью даны в табл. 3—5.

4. Опорные реакции, изгибающие моменты в неразрезных балках с равными пролетами

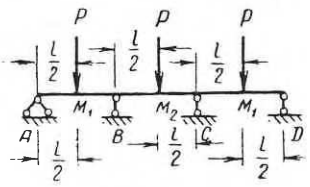
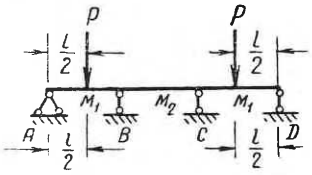
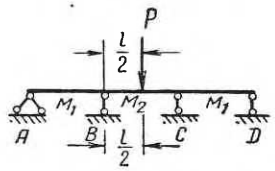
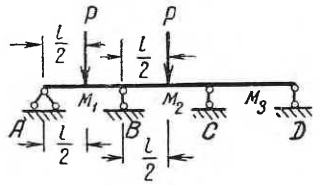
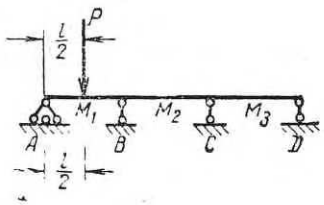
Таблица 3—5

Схема балки и нагрузки	Опорные реакции	Изгибающие моменты			
		в пролетах		на опорах	
		M_{1max}	M_{2max}	M_B	M_C
 Фиг. 3—59	$A = C = {}^3/_8\ ql$ $B = {}^5/_4\ ql$	$0{,}070\ ql^2$	$0{,}070\ ql^2$	$-0{,}125\ ql^2$	—
 Фиг. 3—60	$A = {}^7/_{16}\ ql$ $B = {}^5/_8\ ql$ $C = -{}^1/_{16} ql$	$0{,}096\ ql^2$	—	$-0{,}063\ ql^2$	—
 Фиг. 3—61	$A = C = {}^5/_{16}\ P$ $B = {}^{11}/_8\ P$	$0{,}156\ Pl$	$0{,}156\ Pl$	$-0{,}188\ Pl$	—
 Фиг. 3—62	$A = 0{,}406\ P$ $B = 0{,}688\ P$ $C = -0{,}094\ P$	$0{,}203\ Pl$	—	$-0{,}094\ Pl$	—
 Фиг. 3—63	$A = C = {}^2/_3\ P$ $B = {}^8/_3\ P$	$0{,}222\ Pl$	$0{,}222\ Pl$	$-0{,}333\ Pl$	—
 Фиг. 3—64	$A = {}^5/_6\ P$ $B = {}^4/_3\ P$ $C = -{}^1/_6\ P$	$0{,}278\ Pl$	—	$-0{,}167\ Pl$	—

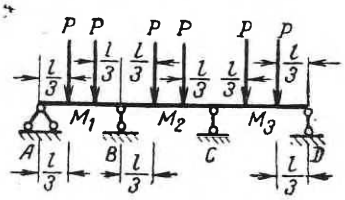
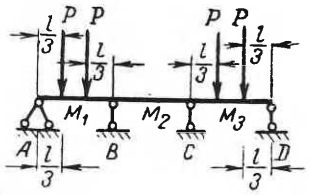
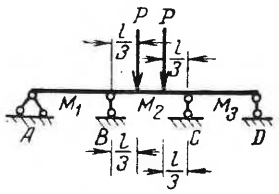
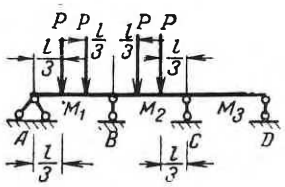
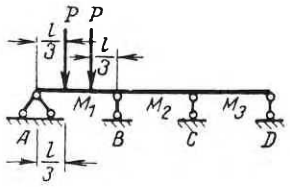
Продолжение табл. 3—5

Схема балки и нагрузки	Опорные реакции	Изгибающие моменты			
		в пролетах		на опорах	
		M_{1max}	M_{2max}	M_B	M_C
 Фиг. 3—65	$A = 0{,}172\ ql$ $B = 0{,}656\ ql$ $C = 0{,}172\ ql$	$0{,}034\ ql^2$	$0{,}034\ ql^2$	$-0{,}078\ ql^2$	—
 Фиг. 3—66	$A = -0{,}04\ ql$ $B = 0{,}33\ ql$ $C = 0{,}21\ ql$	—	$0{,}065\ ql^2$	$-0{,}039\ ql^2$	—
 Фиг. 3—67	$A = D = 0{,}4\ ql$ $B = C = 1{,}1\ ql$	$0{,}080\ ql^2$	$0{,}025\ ql^2$	$-0{,}100\ ql^2$	$-0{,}100\ ql^2$
 Фиг. 3—68	$A = D = 0{,}45\ ql$ $B = C = 0{,}55\ ql$	$0{,}101\ ql^2$	$-0{,}050\ ql^2$	$-0{,}050\ ql^2$	$-0{,}050\ ql^2$
 Фиг. 3—69	$A = D = -0{,}05\ ql$ $B = C = 0{,}55\ ql$	—	$0{,}075\ ql^2$	$-0{,}050\ ql^2$	$-0{,}050\ ql^2$
 Фиг. 3—70	$A = 0{,}383\ ql$ $B = 1{,}2\ ql$ $C = 0{,}45\ ql$ $D = -0{,}033\ ql$	$0{,}073\ ql^2$	$0{,}053\ ql^2$	$-0{,}117\ ql^2$	$-0{,}033\ ql^2$
 Фиг. 3—71	$A = 0{,}433\ ql$ $B = 0{,}65\ ql$ $C = -0{,}1\ ql$ $D = 0{,}017\ ql$	$0{,}094\ ql^2$	—	$-0{,}067\ ql^2$	$0{,}017\ ql^2$

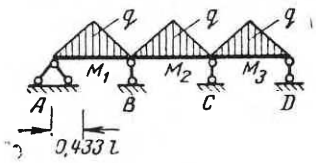
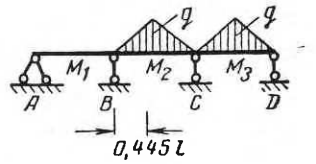
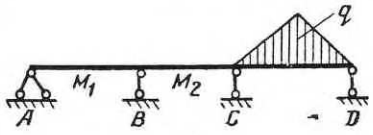
Продолжение табл. 3—5

Схема балки и нагрузки	Опорные реакции	Изгибающие моменты			
		в пролетах		на опорах	
		M_{1max}	M_{2max}	M_B	M_C
 Фиг. 3—72	$A = D = 0{,}35\ P$ $B = C = 1{,}15\ P$	$0{,}175\ Pl$	$0{,}100\ Pl$	$-0{,}150\ Pl$	$-0{,}150\ Pl$
 Фиг. 3—73	$A = D = 0{,}425\ P$ $B = C = 0{,}575\ P$	$0{,}213\ Pl$	$-0{,}075\ Pl$	$-0{,}075\ Pl$	$-0{,}075\ Pl$
 Фиг. 3—74	$A = D = -0{,}075\ P$ $B = C = 0{,}575\ P$	$-0{,}038\ Pl$	$0{,}175\ Pl$	$-0{,}075\ Pl$	$-0{,}075\ Pl$
 Фиг. 3—75	$A = 0{,}325\ P$ $B = 1{,}3\ P$ $C = 0{,}425\ P$ $D = -0{,}05\ P$	$0{,}162\ Pl$	$0{,}138\ Pl$	$-0{,}175\ Pl$	$-0{,}050\ Pl$
 Фиг. 3—76	$A = 0{,}4\ P$ $B = 0{,}725\ P$ $C = -0{,}15\ P$ $D = 0{,}025\ P$	$0{,}200\ Pl$	—	$-0{,}100\ Pl$	$0{,}025\ Pl$

Продолжение табл. 3—5

Схема балки и нагрузки	Опорные реакции	Изгибающие моменты			
		в пролетах		на опорах	
		M_{1max}	M_{2max}	M_B	M_C
 *Фиг. 3—77*	$A = D = 0{,}733\ P$ $B = C = 2{,}267\ P$	$0{,}244\ Pl$	$0{,}067\ Pl$	$-0{,}267\ Pl$	$-0{,}267\ Pl$
 *Фиг. 3—78*	$A = D = 0{,}866\ P$ $B = C = 1{,}133\ P$	$0{,}289\ Pl$	$-0{,}133\ Pl$	$-0{,}133\ Pl$	$-0{,}133\ Pl$
 *Фиг. 3—79*	$A = D = -0{,}133\ P$ $B = C = 1{,}133\ P$	—	$0{,}200\ Pl$	$-0{,}133\ Pl$	$-0{,}133\ Pl$
 *Фиг. 3—80*	$A = 0{,}689\ P$ $B = 2{,}533\ P$ $C = 0{,}867\ P$ $D = -0{,}089\ P$	$0{,}230\ Pl$	$0{,}170\ Pl$	$-0{,}311\ Pl$	$-0{,}089\ Pl$
 *Фиг. 3—81*	$A = 0{,}822\ P$ $B = 1{,}400\ P$ $C = -0{,}266\ P$ $D = 0{,}044\ P$	$0{,}274\ Pl$	—	$-0{,}178\ Pl$	$0{,}044\ Pl$

Продолжение табл. 3—5

Схема балки и нагрузки	Опорные реакции	Изгибающие моменты			
		в пролетах		на опорах	
		M_{1max}	M_{2max}	M_B	M_C
 Фиг. 3—82	$A = 0{,}188\ ql$ $B = 0{,}562\ ql$ $C = 0{,}562\ ql$ $D = 0{,}188\ ql$	$0{,}054\ ql^2$	$0{,}021\ ql^2$	$-0{,}0625ql^2$	$-0{,}0625\ ql^2$
 Фиг. 3—83	$A = -0{,}021\ ql$ $B = 0{,}219\ ql$ $C = 0{,}624\ ql$ $D = 0{,}178\ ql$	—	$0{,}038\ ql^2$	$-0{,}021\ ql^2$	$-0{,}073\ ql^2$
 Фиг. 3—84	$A = 0{,}011\ ql$ $B = -0{,}055\ ql$ $C = 0{,}294\ ql$ $D = 0{,}250\ ql$	—	—	$0{,}011\ ql^2$	$-0{,}044\ ql^2$

3—6. ПРОДОЛЬНЫЙ ИЗГИБ

При расчете сжатых стержней, длина которых велика в сравнении с размерами их поперечных сечений, учитывается возможность потери устойчивости вследствие продольного изгиба.

Критическое напряжение, при котором происходит разрушение из-за потери устойчивости, может быть определено по формуле Эйлера:

$$\sigma_{кр} = \frac{E\pi^2}{\lambda^2}, \qquad (3—40)$$

где E — модуль упругости материала;

$\lambda = \dfrac{l}{i}$ — гибкость;

$i = \sqrt{\dfrac{J_{бр}}{F_{бр}}}$ — радиус инерции;

$J_{бр}$ — минимальный момент инерции;

$F_{бр}$ — площадь поперечного сечения;

l — длина стержня.

Расчетная длина стержня в зависимости от условий закрепления его концов принимается согласно схемам, приведенным на фиг. 3—85.

Формулой Эйлера можно пользоваться при больших гибкостях λ (примерно $\lambda > 100$ для стали марок Ст. 2 и Ст. 3).

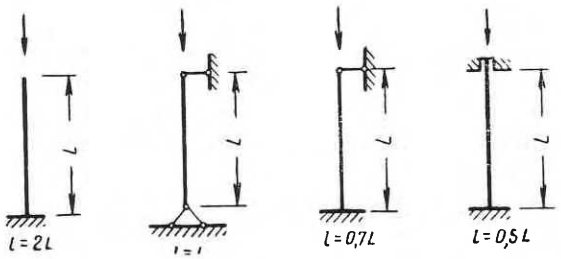
При выводе этой формулы материал предполагается совершенно упругим, причем сжимающие напряжения $\sigma_{кр}$ не превосходят предела упругости.

Допускаемое напряжение принимается:

$$\sigma_{пр.изг} = \varphi\,[\sigma], \qquad (3—41)$$

где $[\sigma]$ — основное допускаемое напряжение;

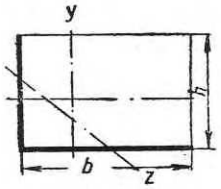
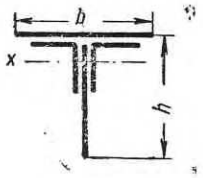
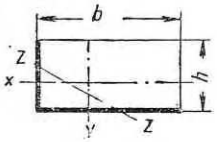
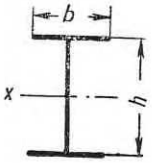
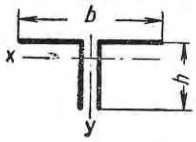
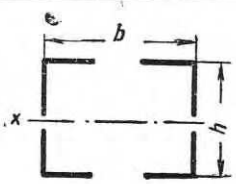
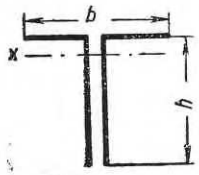
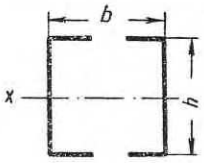
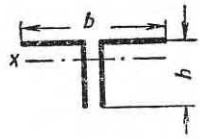
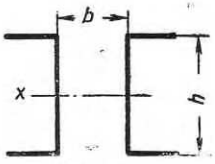
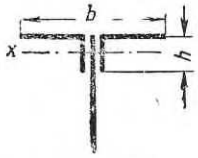
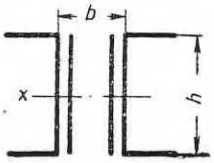
φ — коэффициент понижения допускаемого напряжения, определяемый по табл. 3—3, 3—6 и 3—7 в зависимости от гибкости λ.



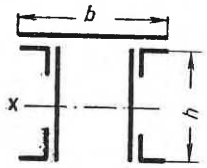
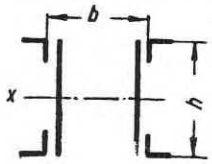
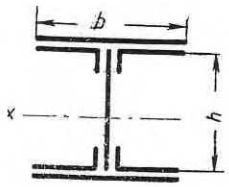
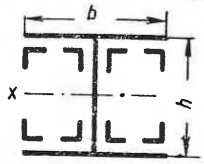
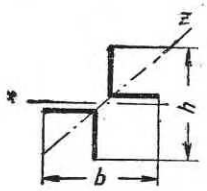
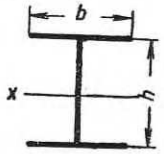
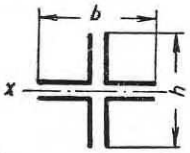
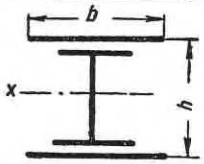
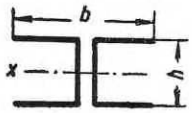
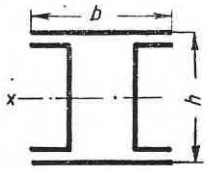
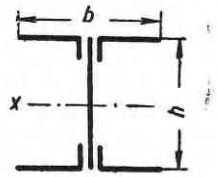
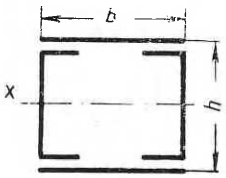
Фиг. 3—85

Таблица 3—6

Приблизительные величины радиусов инерции для наиболее употребительных сечений

Схемы сечений	Радиусы инерции	Схемы сечений	Радиусы инерции
 *Фиг. 3—86*	$i_x=0,30h$ $i_y=0,30b$ $i_z=0,195$	 *Фиг. 3—92*	$i_x=0,26h$ $i_y=0,21b$
 *Фиг. 3—87*	$i_x=0,28h$ $i_y=0,32b$ $i_z=0,18\frac{b+h}{2}$	 *Фиг. 3—93*	$i_x=0,43h$ $i_y=0,24b$
 *Фиг. 3—88*	$i_x=0,30h$ $i_y=0,20b$	 *Фиг. 3—94*	$i_x=0,43h$ $i_y=0,43b$
 *Фиг. 3—89*	$i_x=0,32h$ $i_y=0,20b$	 *Фиг. 3—95*	$i_x=0,38h$ $i_y=0,44b$
 *Фиг. 3—90*	$i_x=0,28h$ $i_y=0,24b$	 *Фиг. 3—96*	$i_x=0,38h$ $i_y=0,60b$
 *Фиг. 3—91*	$i_x=0,30h$ $i_y=0,17b$	 *Фиг. 3—97*	$i_x=0,35h$ $i_y=0,56b$

Продолжение табл. 3—6

Схемы сечений	Радиусы инерции	Схемы сечений	Радиусы инерции
 *Фиг. 3—98*	$i_x=0,37h$ $i_y=0,54b$	 *Фиг. 3—104*	$i_x=0,45h$ $i_y=0,235b$
 *Фиг. 3—99*	$i_x=0,39h$ $i_y=0,53b$	 *Фиг. 3—105*	$i_x=0,44h$ $i_y=0,28b$
 *Фиг. 3—100*	$i_x=0,21h$ $i_y=0,21b$ $i_z=0,185h$	 *Фиг. 3—106*	$i_x=0,39h$ $i_y=0,20b$
 *Фиг. 3—101*	$i_x=0,21h$ $i_y=0,21b$	 *Фиг. 3—107*	$i_x=0,42h$ $i_y=0,22b$
 *Фиг. 3—102*	$i_x=0,45h$ $i_y=0,24b$	 *Фиг. 3—108*	$i_x=0,44h$ $i_y=0,32b$
 *Фиг. 3—103*	$i_x=0,40h$ $i_y=0,21b$	 *Фиг. 3—109*	$i_x=0,44h$ $i_y=0,38b$

Продолжение табл. 3—6

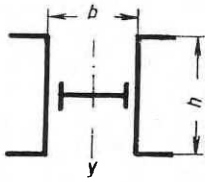
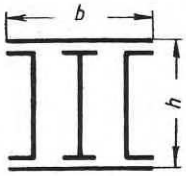
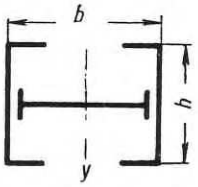
Схемы сечений	Радиусы инерции	Схемы сечений	Радиусы инерции
 *Фиг. 3—110*	$i_x=0,32h$ $i_y=0,58b$	 *Фиг. 3—112*	$i_x=0,42h$ $i_y=0,30b$
 *Фиг. 3—111*	$i_x=0,32h$ $i_y=0,40b$	—	—

Таблица 3—7

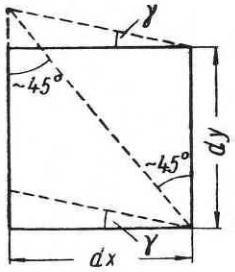
Гибкость $\lambda=\frac{l}{i}$	$\frac{l}{h}$*	$\frac{l}{d}$**	Значения φ для дерева	стали	чугуна	Гибкость $\lambda=\frac{l}{i}$	$\frac{l}{h}$*	$\frac{l}{d}$**	Значения φ для дерева	стали
8	2,3	2	0,99	—	—	108	31	27	0,27	—
10	3,5	3	0,99	0,99	0,97	110	32	28	0,26	0,52
16	4,6	4	0,98	—	—	116	33	29	0,23	—
20	5,8	5	0,97	0,96	0,91	120	35	30	0,21	0,45
24	6,9	6	0,95	—	—	124	36	31	0,20	—
28	8,1	7	0,94	—	—	128	37	32	0,19	—
30	9,2	8	0,93	0,94	0,81	130	38	33	0,18	0,40
36	10	9	0,90	—	—	136	39	34	0,17	—
40	12	10	0,87	0,92	0,69	140	40	35	0,16	0,36
44	13	11	0,84	—	—	144	42	36	0,15	—
48	14	12	0,81	—	—	148	43	37	0,14	—
50	15	13	0,78	0,89	0,57	150	44	38	0,13	0,32
56	16	14	0,75	—	—	156	45	39	0,13	—
60	17	15	0,71	0,86	0,44	160	46	40	0,12	0,29
64	18	16	0,66	—	—	164	47	41	0,11	—
68	20	17	0,63	—	—	168	49	42	0,11	—
70	21	18	0,60	0,81	0,34	170	50	43	0,10	0,26
76	22	19	0,53	—	—	176	51	44	0,10	—
80	23	20	0,48	0,75	0,26	180	52	45	0,09	0,23
84	24	21	0,44	—	—	184	53	46	0,09	—
88	25	22	0,40	—	—	188	54	47	0,09	—
90	27	23	0,37	0,69	0,20	190	55	48	0,08	0,21
96	28	24	0,34	—	—	196	57	49	0,08	—
100	29	25	0,31	0,60	0,16	200	58	50	0,08	0,19
104	30	26	0,29	—	—					

* h — наименьшая сторона прямоугольного сечения.
** d — диаметр круглого сечения.

3—7. СДВИГ И КРУЧЕНИЕ

1. Сдвиг

Деформация сдвига очень малого элемента, выделенного из упругого тела, измеряется углом γ (фиг. 3—113).



Фиг. 3—113

По малости угла γ можно считать $\operatorname{tg}\gamma = \gamma$. Касательные напряжения при сдвиге:

$$\tau_c = G\gamma, \qquad (3—42)$$

где G — модуль поперечной упругости, или модуль сдвига.

Между модулем сдвига и ранее приведенными упругими постоянными E и μ (см. п. 3—1) существует зависимость:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \qquad (3—43)$$

При расчете болтов, заклепок, сварных швов, работающих в основном на срез, касательные напряжения принимаются равномерно распределенными по площади среза:

$$\tau_c = \frac{Q}{F}. \qquad (3-44)$$

2. Кручение

Кручение стержня происходит под действием пары сил, действующей в плоскости, перпендикулярной к его оси (фиг. 3—114). Для круглого сечения ось стержня остается прямой, поперечные сечения остаются плоскими и радиусы не искривляются. Поперечные сечения стержня поворачиваются около своих центров на углы, тем бо́льшие, чем больше отстоит сечение от закрепленного конца. В любом поперечном сечении будут действовать только касательные напряжения.

а) Стержни круглого сечения. Относительная деформация при кручении — угол закручивания на единицу длины

$$\theta = \frac{M_z}{GJ_p}, \qquad (3—45)$$

где M_z — крутящий момент от внешних сил;
J_p — полярный момент инерции;
G — модуль сдвига.

Угол закручивания для всего стержня:

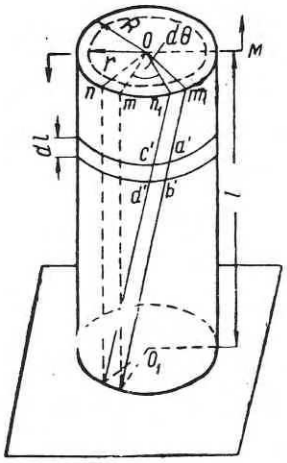
$$\theta_{max} = \frac{M_z}{GJ_p} l, \qquad (3—46)$$

где l — длина стержня.

Между относительной деформацией кручения и напряжениями существует зависимость

$$\tau_к = G\theta r, \qquad (3—47)$$

где r — радиус рассматриваемого сечения.



Ф г. 3—114

Расчетная формула напряжений от крутящего момента:

$$\tau_к = G\theta r = \frac{M_z}{J_p} r. \qquad (3—48)$$

Напряжения достигают наибольшего значения на периферии сечения:

$$\tau_{к\,max} = G\theta R = \frac{2M_z}{\pi R^3}. \qquad (3—49)$$

б) Стержни прямоугольного сечения. Наибольшие касательные напряжения:
в середине длинной стороны

$$\tau_{max} = \frac{M_z}{\alpha hb^2}, \qquad (3-50)$$

в середине короткой стороны

$$\tau_1 = \frac{M_z}{\alpha_1 hb^2}. \qquad (3—51)$$

Относительная деформация (угол закручивания)

$$\theta = \frac{M_z}{\beta hb^3 G}, \qquad (3—52)$$

где α, α_1 и β — численные коэффициенты, указанные в табл. 3—8, зависящие от соотношения $\frac{h}{b}$ сторон прямоугольника (h — бо́льшая сторона, а b — меньшая).

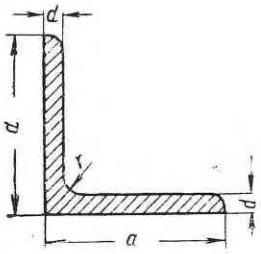
При расчете узких прямоугольных сечений и прокатных профилей, если соотношение $\frac{h}{b} > 10$, можно в практических расчетах принять $\alpha = \beta = \frac{1}{3}$, тогда:

$$\tau_{max} = \frac{3M_z}{hb^2}; \qquad (3-53)$$

$$\theta = \frac{3M_z}{hb^3 G}. \qquad (3-54)$$

Таблица 3—8

$\frac{h}{b}$	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10	>10
α	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,333
β	0,141	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	0,333
α_1	0,208	0,270	—	0,309	—	0,354	0,379	0,402	—	—	0,448



Фиг. 3—115

При расчете прокатных профилей вместо h ставится длина развернутой осевой линии сечения, например, для равнобокого уголка $h=2a-d$ (a — ширина уголка, d — толщина стенки уголка) (см. фиг. 3—115). В табл. 3—9 приведены допускаемые крутящие моменты и напряжения кручения для наиболее употребительных сечений.

3—8. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

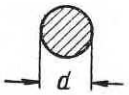
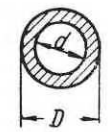
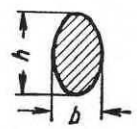
При решении практических вопросов наибольший интерес представляют следующие виды сложного сопротивления:

1) сложный или косой изгиб, возникающий при одновременном действии двух изгибающих моментов M_x и M_y в главных плоскостях (фиг. 3—125);

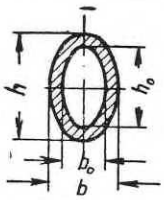
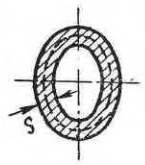
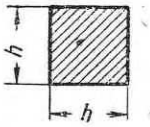
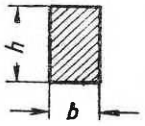
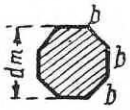
2) изгиб с растяжением или сжатием, когда силы в сечении сводятся к продольной силе N и одному или обоим изгибающим моментам M_x и M_y (фиг. 3—126);

3) изгиб с кручением — при наличии в сечении изгибающих и крутящего моментов.

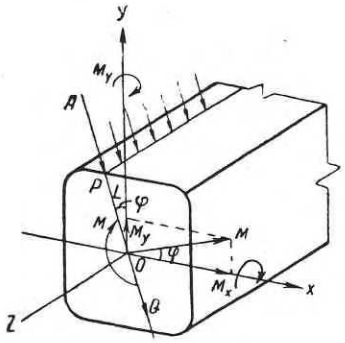
Таблица 3—9

Форма сечения	Напряжение кручения τ и τ_{max}	Допускаемый крутящий момент M_z	Крутящий момент M_z при относительном угле скручивания θ и модуле сдвига G
 *Фиг. 3—116*	τ_{max} в точках окружности сечения. На расстоянии ρ от центра $\tau = \frac{2\rho}{d}\tau_{max}$	$M_z = \frac{\pi}{16} d^3 [\tau]$	$M_z = \frac{\pi}{32} d^4 G\theta$
 *Фиг. 3—117*	τ_{max} в точках внешней окружности. На расстоянии ρ от центра $\tau = \frac{2\rho}{d}\tau_{max}$	$M_z = \frac{\pi}{16}\frac{D^4 - d^4}{D}[\tau] \approx$ $\approx 1{,}6\, d_m^2\, s\,[\tau]$, так как $d_m = \frac{1}{2}(D+d)$, $s = \frac{1}{2}(D-d)$	$M_z = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) G\theta$
 *Фиг. 3—118*	τ_{max} в крайних точках малой оси b; τ в крайних точках большой оси: $\tau = \frac{1}{n}\tau_{max}$	$M_z = \frac{\pi}{16} b^2 h\,[\tau] = \frac{\pi}{16} n b^3\,[\tau]$ $(h : b = n > 1)$	$M_z = \frac{\pi}{16}\frac{n^3}{n^2+1} b^4 G\theta$

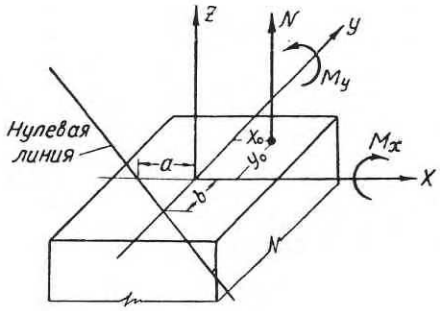
Продолжение табл. 3—9

Форма сечения	Напряжение кручения τ и τ_{max}	Допускаемый крутящий момент M_z	Крутящий момент M_z при относительном угле скручивания θ и модуле сдвига G
 *Фиг. 3—119*	τ_{max} в крайних точках малой оси b; τ в крайних точках большой оси: $\tau = \frac{1}{n}\tau_{max}$	$M_z = \frac{\pi}{16}\frac{b^3 h - b_0^3 h_0}{b}[\tau] = \frac{\pi}{16} n \frac{b^4 - b_0^4}{b}[\tau]$ $h : b = h_0 : b_0 = n$	$M_z = \frac{\pi}{16}\frac{n^3}{n^2+1} \times \times \left(b^4 - b_0^4\right) G\theta$
 *Фиг. 3—120*	s — постоянная ширина произвольного кольца; F_a, F_i — поверхности наружного и внутреннего колец; F_m — поверхность среднего кольца; V_m — периметр внутреннего очертания кольца; τ_d — среднее напряжение в кольце	$M_z = (F_a + F_i)\, s\, \tau_d$	$M_z \approx 2(F_a + F_i) \cdot \frac{F_m s}{V_m} G\theta$
 *Фиг. 3—121*	τ_{max} — по середине сторон сечения при $h = b$. В углах $\tau = 0$	$M_z = 0{,}208\, b^3 [\tau]$	$M_z = 0{,}1404\, b^4 G\theta$
 *Фиг. 3—122*	τ_{max} — по середине сторон h. По середине сторон b: $\tau = \eta_1 * \tau_{max}$. В углах $\tau = 0$	$M_z = \eta_2 * nb^3 [\tau] = \eta_2\, b^3 h\, [\tau]$ $(h : b = n > 1)$	$M_z = \eta_3\, nb^4 G\theta = \eta_3 * b^3 h\, G$
Фиг. 3—123	τ_{max} — по середине сторон: $\tau_{max} = 0{,}612\, d_m G\theta$	$M_z = 0{,}217\, d_m F\, \tau_{max}$ F — площадь сечения	$M_z = 0{,}133 d_m^2\, FG\theta$
 *Фиг. 3—124*	τ_{max} — по середине сторон: $\tau_{max} = 0{,}582\, d_m G\theta$	$M_z = 0{,}223\, d_m F\, \tau_{max}$	$M_z = 0{,}130 d_m^2\, FG\theta$

* Значения коэффициентов η, зависящих от соотношения $\frac{h}{b} = n$, определяются для η_3 и η_2 из табл. 3—8, так как $\eta_3 = \beta$; $\eta_2 = \alpha$. Значения η_1 для $n = 1$; 1,5; 2; 3; 4; > 4 соответственно 1,0; 0,858; 0,796; 0,753; 0,745; 0,743.



Фиг. 3—125



Фиг. 3—126

1. Косой изгиб

При расчете балок на косой изгиб следует сначала отыскать опасное сечение, в котором действует максимальный изгибающий момент (M_{max}).

Отыскание опасного сечения и нахождение M_{max} осуществляются теми же путями, что и в случае простого изгиба.

Напряжения в сечении (фиг. 3—125).

$$\sigma = \frac{M_y}{J_y} x - \frac{M_x}{J_x} y = M_{max}\left(\frac{x \sin\varphi}{J_y} - \frac{y\cos\varphi}{J_x}\right), \qquad (3—55)$$

где x и y — текущие координаты; если взять прямоугольное поперечное сечение, то наибольшее и наименьшее напряжения получим при $x = \pm \frac{b}{}$ и $y = \pm \frac{h}{2}$;

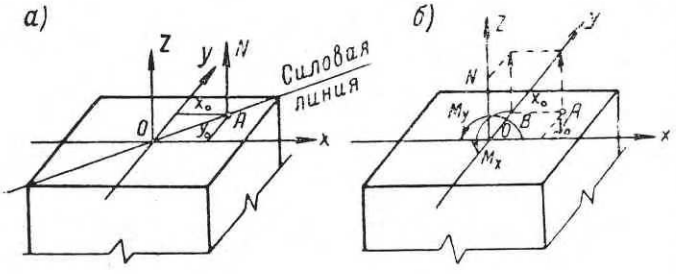
$$M_y = M_{max}\sin\varphi;$$
$$M_x = M_{max}\cos\varphi,$$

где φ — угол между силовой линией и осью y или угол между вектором момента M и осью x.

Нулевая линия, соединяющая точки поперечного сечения, в которых напряжение σ равно нулю, разделяет плоскость поперечного сечения на две области: в одной имеют место сжимающие напряжения, а в другой — растягивающие.

Положение нулевой линии определяется угловым коэффициентом:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{y}{x} = \frac{M_y}{M_x}\cdot\frac{J_x}{J_y} = \frac{J_x}{J_y}\operatorname{tg}\varphi. \qquad (3—56)$$



Фиг. 3—127

Наиболее напряженные точки располагаются на наибольшем расстоянии от нулевой линии. Координаты их могут быть вычислены или взяты графически по чертежу.

Для получения моментов M_x и M_y удобно предварительно разложить нагрузку на направления x и y (см. фиг. 3—125).

Для сечений прямоугольных и вписывающихся в прямоугольник (двутавры, швеллеры и т. п.) вместо формулы (3—55) применяется формула:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{min} &= -\frac{M_x}{J_x}y - \frac{M_y}{J_y}x = -\frac{M_x}{W_x} - \frac{M_y}{W_y};\\ \sigma_{max} &= \frac{M_x}{J_x}y + \frac{M_y}{J_y}x = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y}.\end{aligned}\right\} \qquad (3—57)$$

Составляющие касательных напряжений вдоль главных осей от поперечных сил Q_x и Q_y при косом изгибе

$$\left.\begin{aligned}\tau_x &= \frac{Q_x S_y}{J_y b_y};\\ \tau_y &= \frac{Q_y S_x}{J_x b_x},\end{aligned}\right\} \qquad (3—58)$$

где S_x, S_y — статические моменты;
J_x, J_y — моменты инерции;
b_x, b_y — ширина сечения,
результирующее касательное напряжение в сечении определяется:

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}. \qquad (3—59)$$

2. Изгиб с растяжением и сжатием

При совместном действии изгиба с растяжением нормальное напряжение: $\sigma = \frac{M_y}{J_y}x - \frac{M_x}{J_x}y + \frac{N}{F}$,

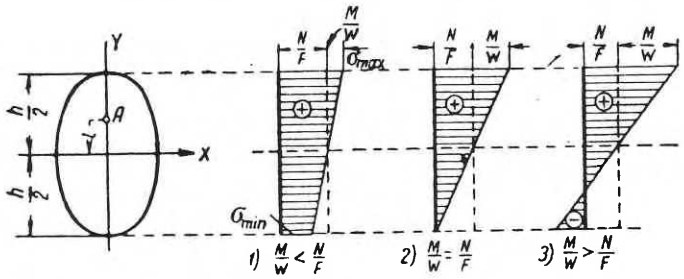
где N — равнодействующая всех сил, приложенных к отброшенной части стержня (фиг. 3—126).

а) Внецентренное растяжение — сжатие.

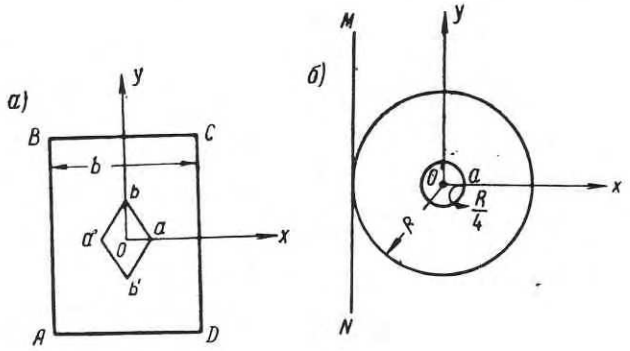
Наибольшее значение имеет случай, когда изгиб создается внецентренным растяжением — сжатием (когда сила N приложена внецентренно).

Нормальные напряжения в любой точке сечения с координатами x и y при $M_x = Ny_0$, $M_y = Nx_0$,

$$\sigma = \frac{N}{F}\left(\frac{x_0 x}{i_y^2} + \frac{y_0 y}{i_x^2} + 1\right), \qquad (3—60)$$



Фиг. 3—128



Фиг. 3—129

где x_0 и y_0 — координаты точки приложения силы N (фиг. 3—127).

Положение нулевой линии (см. фиг. 3—126) определяется угловым коэффициентом, как и при косом изгибе:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{J_x}{J_y}\frac{M_y}{M_x} = \frac{y}{x}.$$

Отрезок b, отсекаемый нулевой линией на оси y:

$$b = \frac{NJ_x}{FM_x} = i_x^2\frac{N}{M_x} = -\frac{i_x^2}{y_0}, \quad (3-61)$$

Отрезок a, отсекаемый нулевой линией на оси x:

$$a = -\frac{NJ_y}{FM_y} = -i_y^2\frac{N}{M_y} = -\frac{i_y^2}{x_0}, \quad (3-62)$$

где $i_y^2 = \frac{J_y}{F}$, $i_x^2 = \frac{J_x}{F}$ — квадраты радиусов инерции.

В случае, если растягивающая или сжимающая стержень внецентренная сила расположена в одной из главных плоскостей инерции, то внецентренное растяжение — сжатие приводится к осевому растяжению — сжатию и простому изгибу в главной плоскости инерции.

Нормальное напряжение

$$\sigma = -\frac{M_x}{J_x}y + \frac{N}{F} = \frac{N}{F}\left(1 + \frac{ye}{i_x^2}\right), \quad (3-63)$$

где e — эксцентриситет силы N.

Наибольшее и наименьшее напряжения в сечении в точках, наиболее удаленных от оси x (фиг. 3—128):

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{N}{F} + \frac{M_x}{J_x}y_1 = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{W_1};\\ \sigma_{min} &= \frac{N}{F} - \frac{M_x}{J_x}y_2 = \frac{N}{F} - \frac{M_x}{W_2},\end{aligned}\right\} \quad (3-64)$$

где W_1, W_2 — моменты сопротивления сечения по отношению к двум крайним волокнам.

Для прямоугольного сечения высотой h и шириной b значения наибольших напряжений

$$\sigma_{\frac{max}{min}} = \frac{N}{bh}\left(1 \pm \frac{6e}{h}\right). \quad (3-65)$$

б) Ядро сечения. На практике часто бывает необходимо для различных форм поперечных сечений установить тот замкнутый контур, из которого не должна выходить точка приложения сжимающей силы, если нежелательно появление растягивающих напряжений.

В каждом сечении имеется некоторый замкнутый контур, обладающий тем свойством, что при приложении силы (точнее, равнодействующей всех сил, приложенных к отброшенной части стержня) внутри или на границе этого контура в сечении возникают напряжения одного знака. Этот замкнутый контур носит название ядра сечения (фиг. 3—129).

Для его построения следует провести касательные к контуру поперечного сечения.

Принимая их за крайние положения нулевых линий, находят соответствующие точки приложения сил, или так называемые полюсы.

Координаты полюсов, на основании формул (3—61) и (3—62):

$$x_0 = -\frac{i_y^2}{a},\quad y_0 = -\frac{i_x^2}{b},$$

где a и b — отрезки нулевых линий.

Для прямоугольника полюс, соответствующий нулевой линии, проведенный по AB, будет в точке a, причем

$$Oa = -\frac{i_y^2}{\left[-\frac{b}{2}\right]} = +\frac{hb^3\cdot 2}{12b\,h\,b} = \frac{b}{6}.$$

Другие вершины ядра сечения: a', b, b'.

Ядро имеет вид ромба.

При построении ядра сечения для круга проводим касательную MN.

Расстояние до соответствующего полюса:

$$Oa = -\frac{i^2}{(-R)} = \frac{i^2}{R},$$

где R — радиус заданного круга.

Так как для круга

$$i^2 = \frac{\pi R^4}{4\pi R^2} = \frac{R^2}{4},$$

то

$$Oa = \frac{R}{4}.$$

По симметрии заключаем, что ядро сечения — круг радиуса $Oa = \frac{R}{4}$.

Для треугольного сечения ядро сечения будет треугольник и т. д.

3. Изгиб с кручением

В сечении при изгибе с кручением действует изгибающий момент M и крутящий момент M_z.

Момент M в каждом элементе сечения вызывает нормальное σ и касательное напряжение τ_1, а момент M_z дает в том же сечении касательное напряжение τ_2.

Опасным будет то сечение, в котором изгибающий и крутящий моменты достигают наибольшей величины. Если при этом окажется, что сечения с M_{max} и $M_{z_{max}}$ не совпадают, то проверку напряжений следует производить в двух, а иногда и нескольких сечениях. Построение эпюр изгибающих моментов производится обычным способом.

В опасных сечениях определяют главные и наибольшие касательные напряжения.

Для стержней круглого сечения

$$\frac{\sigma_{max}}{min} = \frac{M \pm \sqrt{M^2 + M_z^2}}{2W}; \qquad (3—66)$$

$$\tau_{max} = \pm \frac{\sqrt{M^2 + M_z^2}}{2W} \leqslant [\tau], \qquad (3—67)$$

где W — экваториальный момент сопротивления круглого сечения (величины W см. табл. 3—3).

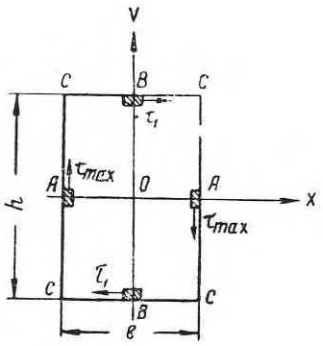
Для стержней прямоугольного сечения суммарные касательные напряжения при кручении и изгибе (фиг. 3—130) будут в точках A и B:

$$\tau_A = \frac{M_z}{\alpha hb^2} \pm \frac{3Q_y}{2hb} \qquad (3—68)$$

$$\tau_B = \frac{M_z}{\alpha_1 hb^2} \pm \frac{3Q_x}{2hb}, \qquad (3—69)$$

где коэффициенты α и α_1 берутся из табл. 3—8 (в большинстве случаев касательные напряжения от поперечных сил незначительны и при расчете не принимаются во внимание).

Если крутящий момент M_z невелик, то может оказаться, что напряжения в углах сечения будут иметь решающее значение для прочности.



Фиг. 3—130

Главные и наибольшие касательные напряжения в характерных точках сечения определяются следующими выражениями.

В точках A (см. фиг. 3—130)

$$\frac{\sigma_{max}}{min} = \pm \frac{M_y}{2W_y} \pm \sqrt{\left(\frac{M_y}{2W_y}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{\alpha b^2 h}\right)^2}; \qquad (3—70)$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{M_y}{2W_y}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{\alpha_1 b^2 h}\right)^2}. \qquad (3—71)$$

В точках B

$$\frac{\sigma_{max}}{min} = \pm \frac{M_x}{2W_x} \pm \sqrt{\left(\frac{M_x}{2W_x}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{\alpha b^2 h}\right)^2}; \qquad (3—72)$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{M_x}{2W_x}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{\alpha_1 hb^2}\right)^2}. \qquad (3—73)$$

В углах сечения

$$\frac{\sigma_{max}}{min} = \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y}; \qquad (3—74)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\left(\left|\frac{M_x}{W_x}\right| + \left|\frac{M_y}{W_y}\right|\right). \qquad (3—75)$$

Эти напряжения не должны превосходить допускаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Н. М., Сопротивление материалов, Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1953.
2. Филоненко-Бородич М. М. и др., Курс сопротивления материалов, Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1949.
3. Иванов Н. И., Сопротивление материалов, Главная редакция технико-теоретической литературы, 1937.
4. Никифоров С. Н., Сопротивление материалов, Гос. архитектурное издательство, 1950.
5. Работнов Ю. Н., Сопротивление материалов, Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1950.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

4—1. ФЕРМЫ

1. Общие сведения

Фермы, представляющие собой системы взаимно-связанных стержней, при расчетах полагают соединенными в узлах шарнирами. Шарниры предполагаются идеальными, т. е. допускающими взаимный поворот соединяемых ими стержней без трения.

Нагрузки всегда считаются приложенными в узлах ферм, вследствие чего все стержни работают исключительно на продольные усилия. Если в ферме имеет место непосредственное приложение нагрузки к стержням, то при определении основных усилий в ферме также предполагается узловое действие нагрузки с последующим учетом изгибающих моментов в стержнях от действия нагрузки, расположенной между узлами.

2. Условия неизменяемости

Каждая ферма должна быть системой геометрически неизменяемой. Изменяемые системы не могут применяться как фермы.

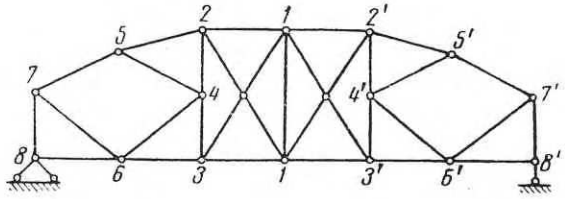
В статически определимой ферме должно соблюдаться условие:

$$k = 2n, \qquad (4—1)$$

где k — число стержней фермы, включая опорные;
n — число всех узлов фермы.

Ферма, имеющая большее число стержней, статически неопределима, меньшее — изменяема.

Соблюдения условия (4—1) еще недостаточно для установления неизменяемости. Необходимо также произвести анализ структуры фермы. Способов анализа фермы несколько, но наибольшее практическое значение имеют два.



Фиг. 4—1

Первый способ. Если в основу фермы положен треугольник и ферма образована присоединением каждого узла при помощи двух стержней, не лежащих на одной прямой, то система неизменяема. Идя обратным путем, т. е. последовательно отбрасывая от данной системы один за другим узлы с двумя прикрепляющими их стержнями, можно установить в конце этой операции, что система неизменяема, если остается треугольник или вообще неизменяемая система. Так, отбрасывая узлы *8, 7, 6, 5* и стержни у фермы, изображенной на фиг. 4—1, приходим к заключению, что узлы *4* и *4′* присоединены стержнями, лежащими на одной прямой, следовательно, система изменяема, точнее, мгновенно изменяема.

Второй способ заключается в рассмотрении отдельных частей фермы как дисков и установлении характера их соединения между собой.

Под диском подразумевается неизменяемая часть фермы.

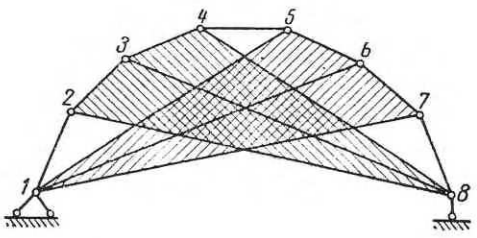
В неизменяемых системах два диска должны быть соединены шарниром и стержнем или тремя непараллельными и непересекающимися в одной точке стержнями; три диска должны быть соединены тремя шарнирами, не лежащими на одной прямой, или эквивалентными стержнями.

При несоблюдении этих условий получается мгновенно изменяемая система.

Под мгновенно изменяемыми системами подразумеваются такие, которые допускают только бесконечно малые перемещения, после чего становятся неизменяемыми.

В мгновенно изменяемых системах могут возникать под нагрузкой бесконечно большие усилия.

Если выделить из фермы (фиг. 4—2) заштрихованные части, являющиеся дисками, то легко убедиться, что эти диски соединены тремя непараллельными и непересекающимися в одной точке стержнями, т. е. ферма неизменяема.



Фиг. 4—2

3. Определение усилий в фермах

а) При действии постоянной нагрузки

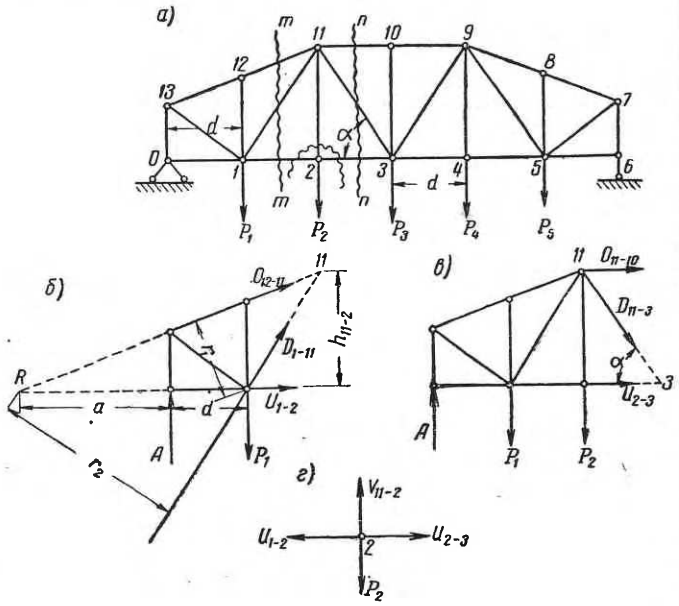
1) **Аналитический способ определения усилий.** Расчет начинается с определения опорных реакций, аналогично тому, как это делается и для балок.

Определение усилий в балочных фермах. Для нахождения усилий в определенном стержне проводится сечение, пересекающее данный стержень и не более двух других (фиг. 4—3). Действие отброшенной (правой, на фиг. 4—3) части фермы заменяется неизвестными пока растягивающими (положительными) усилиями (фиг. 4—3,*б*).

Из условия равенства нулю суммы моментов всех сил, приложенных к левой части, в том числе и усилий пересеченных стержней, относительно точки (так называемой моментной точки) пересечения двух других (кроме искомого) стержней, получается:

$$S = \frac{M_k}{z},$$

т. е. усилие в стержне фермы равно моменту M_k левых или правых сил относительно моментной точки, деленному на плечо усилия в искомом стержне относительно той же точки.



Фиг. 4—3

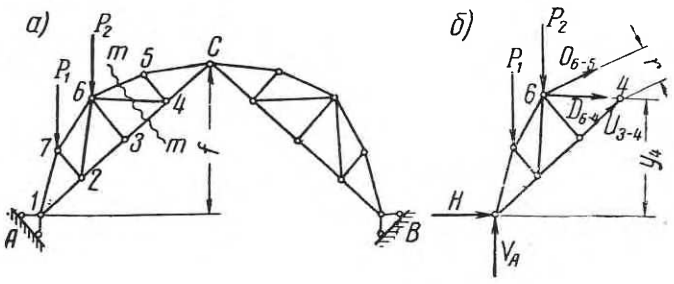
Например (сечение *m—m* фиг. 4—3,*б*), для усилия O_{12-11} моментная точка будет в узле *1*, плечо усилия r_1; для U_{1-2} моментная точка в узле *11*, а плечо равно длине стойки 11—2, т. е. h_{11-2}. Для усилия в раскосе D_{1-11} моментная точка R, плечо r_2. Соответственно этому значения усилий будут:

$$O_{12-11} = \frac{M_1}{r_1} = -\frac{A\,d}{r_1};$$

$$U_{1-2} = \frac{M_{11}}{h_{11-2}} = \frac{A \cdot 2d - P_1 d}{h_{11-2}};$$

$$D_{1-11} = \frac{M_R}{r_2} = -\frac{Aa - P_1(a+d)}{r_2}.$$

Если усилие в каком-либо стержне получится со знаком плюс, стержень растянут; если со знаком минус — стержень сжат.



Фиг. 4—4

Усилия в сечении *n—n* (фиг. 4—3,*в*) в поясах фермы определяются аналогичным приемом. Однако для раскоса D_{11-3} моментная точка, т. е. точка пересечения поясов, находится в бесконечности. В этом случае равенство нулю суммы проекций на вертикальную ось всех сил, приложенных к левой части, дает для усилия в раскосе значение:

$$D_{11-3} = \frac{Q}{\sin\alpha},$$

где Q — поперечная сила в пересеченной панели;
α — угол наклона раскоса к горизонту.

Усилие в стойке V_{11-2} не может быть найдено по предыдущему, так как нельзя провести сечение, пересекающее только три стержня, в том числе стойку V_{11-2}. Для нахождения величины этого усилия вырезается узел *2* (фиг. 4—3,*г*), а все силы, в том числе усилия перерезанных стержней, проектируются на вертикальную ось. Из равенства нулю суммы проекций всех сил, приложенных к узлу, следует:

$$V_{11-2} = P_2.$$

Определение усилий в арочных фермах. Равенство нулю суммы моментов всех сил, приложенных к арочной ферме (фиг. 4—4), относительно правого шарнира B дает для величины вертикальной составляющей V_A — реакции левой опоры — то же значение, как и для простой балки того же пролета и при том же расположении вертикальной нагрузки.

Из условия равенства нулю суммы моментов левых или правых сил относительно среднего шарнира C получаем в случае вертикальной нагрузки горизонтальную составляющую реакции опоры (распор):

$$H_A = H_B = H = \frac{M_C}{f},$$

где M_C — момент левых или правых сил, подсчитанный как для простой балки, относительно среднего шарнира C.

Определение усилий в арочной ферме ведется таким же путем, как и для балочной фермы, с той лишь разницей, что в уравнение моментов левых (или правых)

сил войдет также и момент горизонтальной составляющей. Например, для усилия O_{6-5} (фиг. 4—4,*б* сечение $m—m$) имеем выражение:

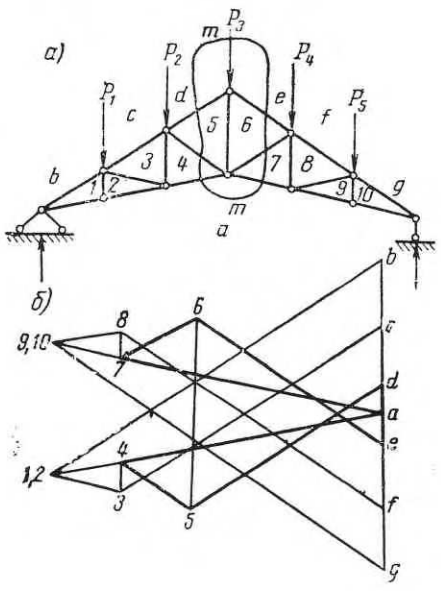
$$O_{6-5} = -\frac{M_4^0 - Hy_4}{r}.$$

где M_4^0 — момент относительно узла *4* как для простой балки;
y_4 — ордината моментной точки;
r — плечо усилия O_{6-5} относительно этой точки.

2) Графический способ определения усилий (диаграмма Максвелла — Кремоны). Построение диаграммы усилий основано на разложении силы, заданной по величине и направлению, на два заданных направления.

Для возможности непосредственного построения диаграммы Максвелла — Кремоны необходимо наличие узла, в котором сходятся только два стержня; с этого узла начинается построение разложением равнодействующей внешних сил, приложенных к узлу на два направления, параллельные стержням, в которых определяются усилия. Далее построение производится для узла, где сходятся: стержень, в котором усилие уже определено, и не более двух других. В этом узле равнодействующую внешней силы, приложенной к этому узлу, и найденного усилия в стержне раскладывают на два новых направления и т. д.

На чертеже фермы районы или зоны между силами нумеруют по порядку, обозначая их буквами или цифрами; нумеруют также и участки, заключенные между стержнями (фиг. 4—5,*а*). Обозначение зон и участков обычно делается в порядке обхода по часовой стрелке.



Фиг. 4—5

На многоугольнике сил (фиг. 4—5,*б*) векторы, изображающие силы или усилия в стержнях, обозначают, ставя по концам вектора те буквы или цифры, между которыми эта сила или стержень в порядке обхода по часовой стрелке находится на чертеже фермы (фиг. 4—5,*а*). Так, левая реакция опоры обозначается отрезком *a—b*, усилие в первом слева стержне верхнего пояса получит обозначение *b—1*, усилие в средней стойке *5—6*, силы *bc*, *cd* и т. д.

Диаграмма усилий строится в следующем порядке.

Начиная с левого опорного узла, разлагаем приложенную к этому узлу силу *a—b* (т. е. опорную реакцию), которая должна быть предварительно найдена, проводя из точки *b* многоугольника сил линию, параллельную стержню *b—1*, и из точки *a* линию, параллельную *a—1*; в точке пересечения ставим ту цифру, которая находится между этими двумя буквами, т. е. *1*. Из полученной таким образом в многоугольнике сил точки *1* ведем линию, параллельную стержню *1—2*; из точки *a* линию, параллельную *a—2*; в точке пересечения ставим цифру *2*. Точки *2* и *1* совпадают, т. е. стержень *1—2* не работает.

Таким же образом переходим к следующим узлам, каждый раз проводя из двух точек силового многоугольника линии, параллельные соответствующим стержням, ставя в точке пересечения ту букву или цифру, которая находится между этими обозначениями на чертеже фермы.

Любому вырезанному участку фермы соответствует замкнутый силовой многоугольник приложенных к участку внешних сил и усилий в стержнях. Например, части, вырезанной на чертеже (фиг. 4—5,*а*) замкнутой линией *m—m*, соответствует замкнутый силовой многоугольник *d—e—6—7—a—4—5—d*, представленный на фиг. 4—5,*б* жирными линиями. Знаки усилий легче всего определять из условия, что каждому вырезанному узлу или отсеченной части фермы соответствует замкнутый многоугольник. Так, из фиг. 4—5,*б* легко усмотреть, что сила *de* направлена вниз, следовательно, усилие *e—6* направлено к узлу — сжатие, усилие *6—7* к узлу — сжатие, усилие *7—a* от узла — растяжение, усилие *a—4* от узла — растяжение, усилие *4—5* к узлу — сжатие, усилие *5—d* к узлу — сжатие.

б) При действии подвижной нагрузки

Определение усилий в фермах при действии подвижной нагрузки производят путем построения линий влияния.

Линией влияния называется графическое изображение закона изменения усилия в рассматриваемом элементе при действии на ферму подвижного груза, равного единице. Каждая ордината линии влияния представляет величину усилия в рассматриваемом элементе в момент нахождения единичного груза над данной ординатой.

1) Построение линий влияния в балочных фермах. Для построения линии влияния усилия в нижнем поясе U_{1-2} полигональной фермы с простой треугольной решеткой (фиг. 4—6) сделаем разрез $m—m$. Напишем условия равновесия, предполагая, что к ферме приложен груз, равный 1.

Если груз справа от разреза, то, рассматривая равновесие левой части, получим:

$$-U_{1-2}r_1 + Aa_1 = 0.$$

Но опорная реакция равна:

$$A = \frac{1(l-x)}{l},$$

где x — расстояние от левой опоры до груза, равного 1;
l — пролет фермы.

Поэтому

$$U_{1-2} = \frac{l-x}{l} \cdot \frac{a_1}{r_1}.$$

Как видим, усилие U_{1-2} изменяется по закону прямой линии при перемещении по ферме единичного груза. Чтобы построить эту линию, надо отложить на левой опоре ($x=0$) ординату $\frac{a_1}{r_1}$ и провести прямую на нулевую ординату на правой опоре ($x=l$). При любом положении единичного груза ордината линии влияния под грузом даст величину усилия U_{1-2} в том масштабе, в котором отложена ордината $\frac{a_1}{r_1}$.

Однако, построение даст не всю линию влияния, а только ее правую ветвь, действительную в пределах от правой опоры до правого узла разрезанной панели того пояса, к которому приложена нагрузка, так как только в этом случае действительно написанное выше уравнение.

Если же единичный груз слева от разрезанной панели, то:

$$+ U_{1-2} r_1 - B b_1 = 0.$$

Отсюда

$$U_{1-2} = \frac{B b_1}{r_1} = \frac{x b_1}{l r_1}.$$

Для проведения прямой, выражаемой этим уравнением, следует отложить на правой опоре ординату $\frac{b_1}{r_1}$ и провести прямую на нулевую ординату на левой опоре. Таким образом, получим левую ветвь линии влияния, действительную от левой опоры до левого узла разрезанной панели того пояса, к которому приложена нагрузка.

Между узлами разрезанной панели линия влияния должна быть ограничена прямой.

Точка пересечения правой и левой ветвей линии влияния находится под моментной точкой.

Построенная линия влияния даст возможность находить величины усилия U_{1-2} от груза, равного отвлеченной единице. Если же стоящий где-либо в пролете фермы груз равен P т, надо груз (в т) умножить на ординату линии влияния (в отвлеченных мерах) под грузом. Результат даст усилие в т. Если ферма нагружена несколькими грузами, надо каждый груз помножить на ординату под этим грузом и результаты сложить.

В случае равномерно распределенной нагрузки следует площадь, ограниченную линией влияния в пределах загружения, умножить на интенсивность нагрузки.

Для построения линии влияния O_{10-9} воспользуемся тем же разрезом m—m.

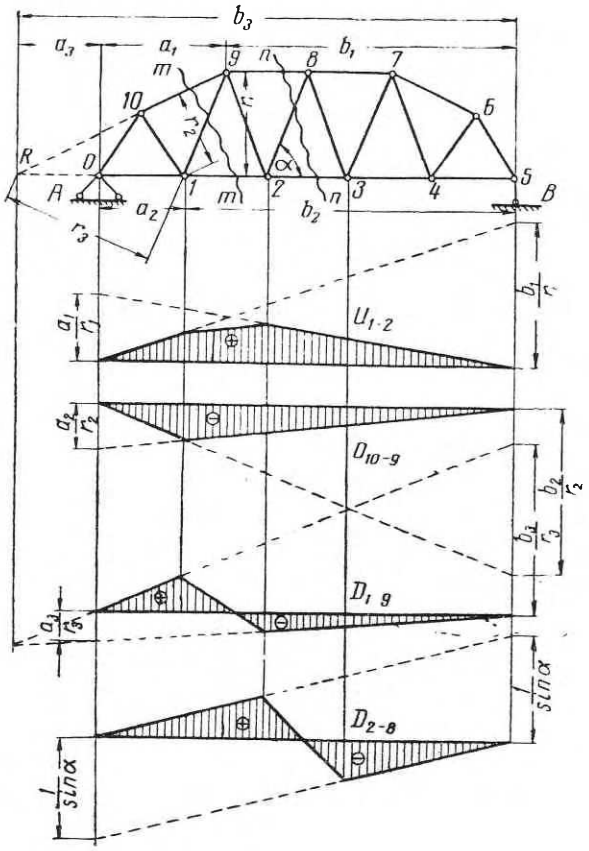
Для правой ветви линии влияния усилия в верхнем поясе O_{10-9} имеем выражение:

$$O_{10-9} = -\frac{A a_2}{r_2} = -\frac{1\,(l-x)}{l} \cdot \frac{a_2}{r_2},$$

а для левой ветви линии влияния:

$$O_{10-9} = -\frac{E b_2}{r_2} = -\frac{1\,x}{l} \cdot \frac{b_2}{r_2}.$$

Снос узлов по концам пересеченной панели не изменяет очертания линии влияния O_{10-9}, так как моментная точка (узел 1) совпадает с одним из узлов пересеченной панели.



Фиг. 4—6

Для раскоса D_{1-9} моментная точка будет вне пролета (точка R), уравнение правой ветви линии влияния будет:

$$D_{1-9} = -\frac{A a_3}{r_3},$$

а левой

$$D_{1-9} = +\frac{B b_3}{r_3},$$

т. е. правая и левая ветви линии влияния имеют разные знаки.

Таким образом, для построения правой ветви линии влияния откладываем на левой опоре ординату, равную отношению $\frac{a_3}{r_3}$, где a_3 — расстояние моментной точки от левой опоры, а r_3 — плечо рассматриваемого усилия относительно той же точки, и соединяем полученную точку с нулевой ординатой на правой опоре; для построения левой ветви линии влияния откладываем на правой опоре отрезок $\frac{b_3}{r_3}$, где b_3 есть расстояние моментной точки от правой опоры, и вершину полученного отрезка соединяем с нулем на левой опоре. Правая и левая ветви линии влияния или их продолжения пересекаются под моментной точкой. Правая ветвь линии влияния действительна от правой опоры до правого узла; левая ветвь — от левой опоры до левого узла пересеченной панели нижнего

пояса. Для построения линии влияния в пределах пересеченной панели сносим правый узел этой панели на правую ветвь и левый узел — на левую, и полученные точки соединяем прямой.

Для определения знаков линий влияния проще всего рассмотреть равновесие левой части, когда груз находится в правой части, т. е. определить знак правого участка линии влияния. Например, для определения знака правого участка линии влияния D_{1-9} рассуждают так. К левой части приложена реакция опоры A, вращающая левую часть вокруг моментной точки против часовой стрелки; для равновесия необходимо, чтобы усилие элемента *1—9* вращало эту часть по часовой стрелке, т. е. элемент D_{1-9} будет сжат и правый участок линии влияния будет отрицательным, а следовательно, левый — положительным.

В том случае, когда моментная точка находится в бесконечности, например, для усилия в раскосе D_{2-8}, так как пересеченные пояса параллельны, применяют уравнение равенства нулю суммы проекций всех сил, приложенных к отсеченной части, на вертикальную ось, откуда для линии влияния получается:

$$D_{2-8} = -\frac{Q}{\sin\alpha},$$

где α — угол наклона элемента D_{2-8} к горизонту;

Q — поперечная сила в пересеченной панели, линия влияния которой определяется выражениями: левая ветвь от левой опоры до левого узла пересеченной панели

$$Q = -\frac{1x}{l};$$

правая ветвь от правой опоры до правого узла пересеченной панели

$$Q = \frac{1(l-x)}{l}.$$

Следовательно, для построения линии влияния D_{2-8} надо на левой опоре отложить отрезок $-\frac{1}{\sin\alpha}$ и соединить с нулевой ординатой на правой опоре, а на правой опоре отложить отрезок $+\frac{1}{\sin\alpha}$ и соединить с нулевой ординатой на левой опоре. Затем на построенные таким образом правую и левую ветви линии влияния следует снести правый и левый узлы пересеченной панели и полученные точки соединить прямой.

Приведенные правила неприменимы для элементов, для которых нельзя провести сечения, пересекающего данный элемент и не более двух других. В этом случае следует применить метод вырезания узлов.

2) Построение линий влияния в трехшарнирных арочных фермах.

Линия влияния усилия S в каком-либо стержне трехшарнирной арочной фермы может быть представлена в виде алгебраической суммы линий влияния усилия S', как в балочной ферме, и линии влияния усилия S'', вызываемого распором, так:

$$S = S' + S'' = \frac{M_k^0 - H\,h_k}{r_k},$$

где M_k^0 — линия влияния момента в моментной точке k, как в балочной ферме;

H — линия влияния распора;

h_k — плечо распора относительно моментной точки k;

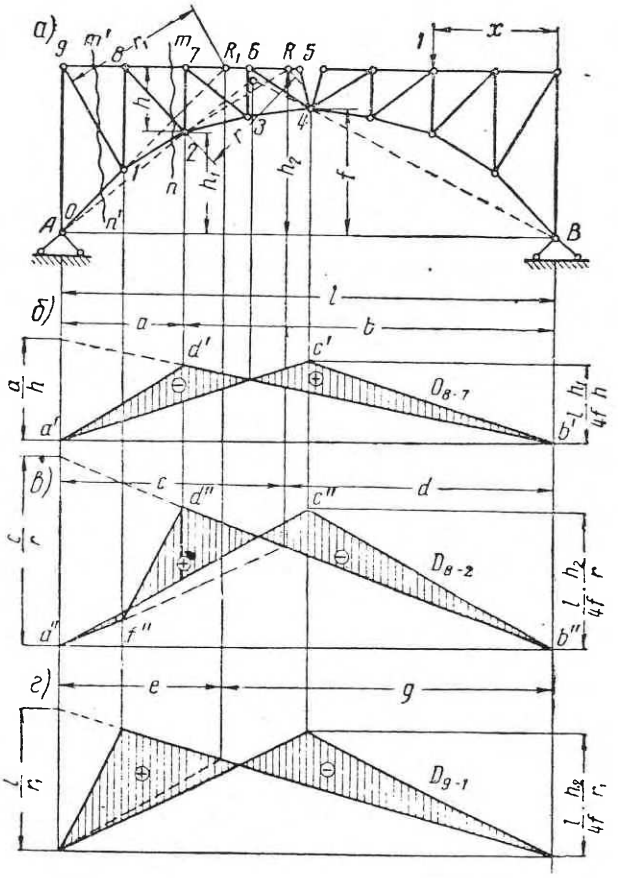
r_k — плечо искомого усилия S относительно моментной точки k.

Если нужно, например, построить линию влияния для усилия O_{8-7} в стержне верхнего пояса трехшарнирной арочной фермы (фиг. 4—7,*а*), то строится сначала линия влияния O'_{8-7} ($a'd'b'$ на фиг. 4—7,*б*), как для элемента балочной фермы пролетом l. Усилие O''_{8-7}, называемое в рассматриваемом элементе распором, определяется на основании условия равновесия левой отсеченной части фермы такой формулой:

$$O''_{8-7} = \frac{M_c}{f}\cdot\frac{h_1}{h},$$

где M_c — момент внешних сил относительно среднего шарнира;

$H = \frac{M_c}{f}$ — распор.



Фиг. 4—7

Соответствующая линия влияния $a'c'b'$ получается из линии влияния распора умножением ординат ее на величину $\frac{h_1}{h}$. Далее полученная линия влияния алгебраически складывается с полученной линией влияния усилия как для балочной фермы. Таким образом получена заштрихованная линия влияния усилия O_{8-7} (фиг. 4—7,*б*).

При построении линии влияния для усилия в раскосе D_{8-2} поступают тем же путем. Сначала строит-

ся линия $a''f''d''b''$ (фиг. 4—7,*в*) для раскоса балочной фермы, а потом учитывается влияние распора аналогичным предыдущему образом. При указанном на чертеже (фиг. 4—7,*а*) расположении моментной точки R влияние распора определится ординатами треугольника $a''c''b''$, который получается из линии влияния распора умножением ординат на $\frac{h_2}{r}$. Подобным же образом построена на фиг. 4—7,*г* линия влияния усилия в раскосе D_{9-1}.

4—2. РАМЫ

Рамой называется упругая система, состоящая из прямолинейных или криволинейных элементов, жестко взаимно связанных в узлах. Рамы относятся к статически неопределимым системам, в которых внутренние силы, а иногда и опорные реакции, не могут быть определены при помощи одних только уравнений статики и требуют, кроме того, учета упругих деформаций.

1. Определение перемещений

а) Формула Максвелла — Мора

Перемещение в направлении воздействия (силы или момента) P_i от воздействия P_k (фиг. 4—8) определяется формулой:

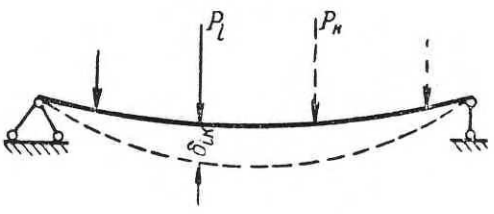
$$\delta_{ik} = \sum\left(\int \frac{\overline{M}_i M_k}{EJ}\, ds + k \int \frac{\overline{Q}_i\, Q_k}{GF}\, ds + \right.$$

$$\left. + \int \frac{\overline{N}_i\, N_k}{EF}\, ds \right) \qquad (4-2)$$

или с учетом влияния температуры:

$$\delta_{ik} = \sum\left(\int \frac{\overline{M}_i\, M_k}{EJ}\, ds + k \int \frac{\overline{Q}_i\, Q_k}{GF}\, ds + \int \frac{\overline{N}_i\, N_k}{EF} + \right.$$

$$\left. + \int \overline{N}_i\, \alpha t_0\, ds + \int \frac{\overline{M}_i\, \alpha \Delta t}{h}\, ds \right). \qquad (4-3)$$



Фиг. 4—8

В формулах (4—2) и (4—3) приняты следующие обозначения:

$\overline{M}_i$, $\overline{Q}_i$, $\overline{N}_i$ — изгибающие моменты, поперечные и нормальные силы, вызванные фиктивным единичным воздействием $P_i = 1$ по направлению искомого перемещения (первое состояние);

M_k, Q_k, N_k — изгибающие моменты, поперечные и нормальные силы, вызванные воздействием P_k (второе состояние);

E — модуль упругости материала;

G — модуль сдвига материала;

J — момент инерции сечения стержня;

F — площадь сечения стержня;

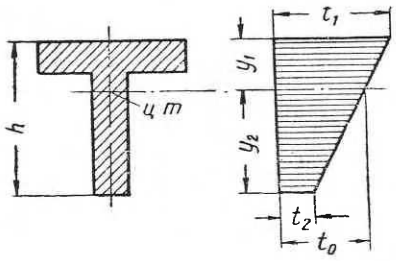
k — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по сечению;

t_0 — среднее изменение температуры в центре тяжести сечения (фиг. 4—9),

$$t_0 = \frac{t_1 - t_2}{h} y_2 + t_2;$$

Δt — разность изменения температур в крайних волокнах сечения, $\Delta t = t_1 - t_2$;

α — коэффициент линейного температурного расширения материала.



Фиг. 4—9

Формула (4—3) дана в предположении, что температура в поперечном сечении стержня изменяется по закону прямой (фиг. 4—9)

Интегрирование в формулах (4—2) и (4—3) должно быть распространено на все элементы данной системы и результаты просуммированы.

Обычно при расчете рам пренебрегается действием продольных и поперечных сил, так как они мало влияют на конечные результаты. Поэтому в практике расчета рам формула (4—2) применяется в сокращенном виде:

$$\delta_{ik} = \int \frac{\overline{M}_i\, M_k}{EJ}\, ds. \qquad (4-4)$$

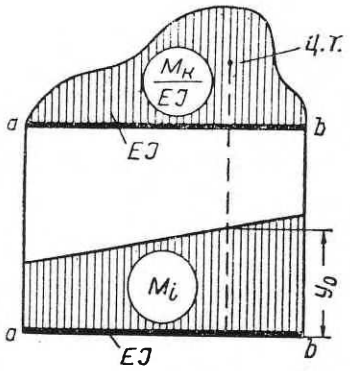
Основным свойством перемещений, вызванных упругими деформациями, является их взаимность:

$$\delta_{ik} = \delta_{ki} \text{ (теорема Максвелла)}, \qquad (4-5)$$

т. е. перемещение, вызванное единичным воздействием первого состояния по направлению воздействия второго состояния, равно (численно) перемещению, вызванному единичным воздействием второго состояния по направлению воздействия первого состояния.

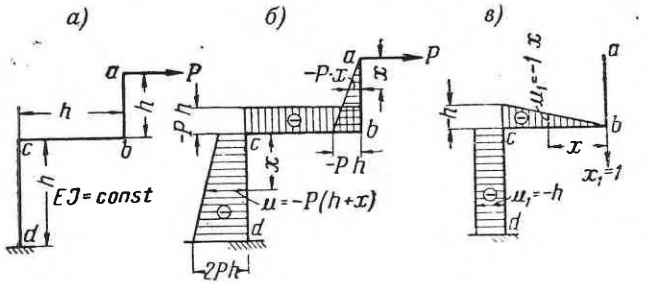
б) Теорема Верещагина

Для вычисления интеграла $\int \frac{M_i M_k}{EJ} ds$, в случае (фиг. 4—10), когда одна из эпюр моментов,



Фиг. 4—10

например, M_i, на участке ab прямолинейная, следует площадь эпюры $\frac{M_k}{EJ}$ в пределах от a до b умножить на ту ординату y_0 эпюры M_i, которая соответствует центру тяжести площади эпюры M_k.



Фиг. 4—10′

Пример. Определить вертикальное перемещение, направленное вниз, в точке b ломаного стержня, заделанного одним концом, под воздействием горизонтальной силы P (фиг. 4—10′,*а*).

Эпюра моментов от горизонтальной силы P представлена на фиг. 4—10′,*б*.

Так как мы ищем вертикальное перемещение точки b, то приложим здесь по направлению искомого перемещения, т. е. вниз, фиктивную единичную силу. Эпюра от нее дана на фиг. 4—10′,*в*.

Искомое перемещение получим по упрощенной формуле Максвелла — Мора:

$$\delta_{1P} = \sum \int \frac{M_1 M_P}{EJ} dx = \int_0^h \frac{0(-Px)}{EJ} dx +$$

$$+ \int_0^h \frac{(-x)(-Ph)}{EJ} dx + \int_0^h \frac{(-h)[-P(h+x)]}{EJ} dx =$$

$$= \int_0^h \frac{Phx}{EJ} dx + \int_0^h \frac{Ph(h+x)}{EJ} dx = \frac{Ph^3}{2EJ} +$$

$$+ \frac{Ph^3}{EJ} + \frac{Ph^3}{2EJ} = \frac{2Ph^3}{EJ},$$

или по теореме Верещагина:

$$\delta_{1P} = -\frac{Ph^2}{2EJ} 0 + \frac{Ph^2}{2EJ} h + \frac{2Ph + Ph}{2EJ} hh =$$

$$= \frac{Ph^3}{2EJ} + \frac{2Ph^3 + Ph^3}{2EJ} = \frac{2Ph^3}{EJ}.$$

При расчете статически неопределимых систем обычно определяют перемещения, увеличенные в EJ_c раз, где J_c — наиболее часто встречающийся в данном сооружении момент инерции. Тогда интегралы приобретают вид:

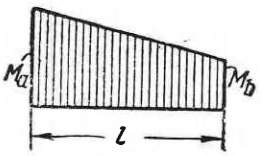
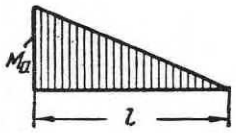
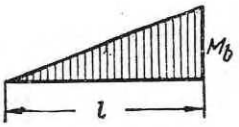
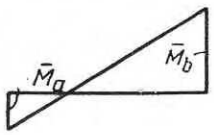
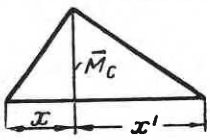
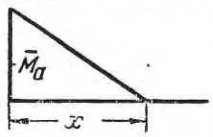
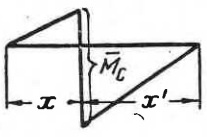
$$\int \frac{J_c}{J} M_i M_k ds.$$

В табл. 4—1 даны значения интегралов в виде $\int M_i M_k ds$; для получения истинных величин перемещений табличные значения интегралов следует разделить на EJ данного стержня.

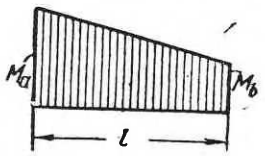
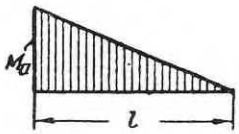
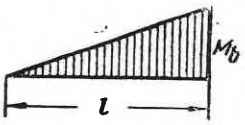
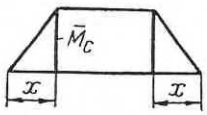
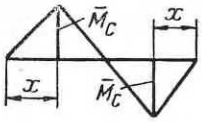
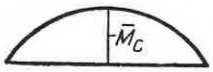
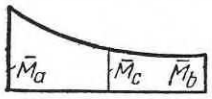
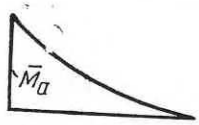
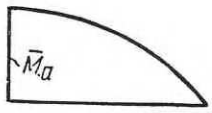
Таблица 4—1

Формулы для интегралов $\int M_i M_k \, ds$

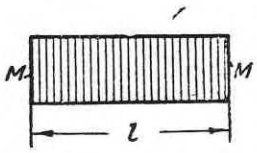
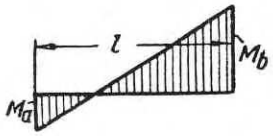
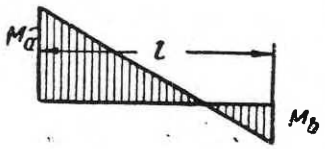
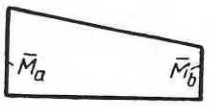
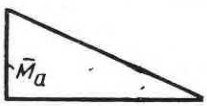
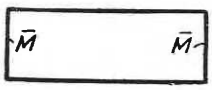
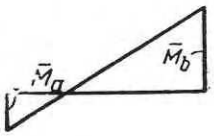
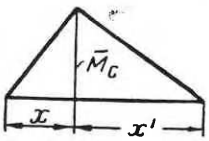
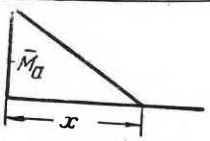
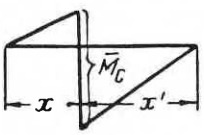
(Все криволинейные эпюры, кроме особо указанных, являются квадратными параболами)

Эпюра M_i / Эпюра M_k	 Фиг. 4—25	 Фиг. 4—26	 Фиг. 4—27
Фиг. 4—11	$\frac{l}{6}[2(M_a\overline{M}_a + M_b\overline{M}_b) + M_a\overline{M}_b + \overline{M}_a M_b]$	$\frac{l}{6} M_a (2\overline{M}_a + \overline{M}_b)$	$\frac{l}{6} M_b (\overline{M}_a + 2\overline{M}_b)$
Фиг. 4—12	$\frac{l}{6}\overline{M}_a (2M_a + M_b)$	$\frac{l}{3} M_a \overline{M}_b$	$\frac{l}{6} M_b \overline{M}_a$
Фиг. 4—13	$\frac{l}{2}\overline{M}(M_a + M_b)$	$\frac{l}{2} M_a \overline{M}$	$\frac{l}{2} M_b \overline{M}$
 Фиг. 4—14	$\frac{l}{6}[2(M_b\overline{M}_b - M_a\overline{M}_a) + M_a\overline{M}_b - \overline{M}_a M_b]$	$\frac{l}{6} M_a (\overline{M}_b - 2\overline{M}_a)$	$\frac{l}{6} M_b (2\overline{M}_b - M_a)$
 Фиг. 4—15	$\frac{l}{6}\left[M_a\left(1+\frac{x'}{l}\right) + M_b\left(1+\frac{x}{l}\right)\right]\overline{M}_c$	$\frac{l}{6} M_a \overline{M}_c \left(1+\frac{x'}{l}\right)$	$\frac{l}{6} M_b \overline{M}_c \left(1+\frac{x}{l}\right)$
 Фиг. 4—16	$\frac{x}{2}\left[M_a - \frac{1}{3}\cdot\frac{x}{l}(M_a - M_b)\right]\overline{M}_a$	$\frac{x}{6} M_a \overline{M}_a \left(3-\frac{x}{l}\right)$	$\frac{x^2}{6l} M_b \overline{M}_a$
 Фиг. 4—17	$\frac{l}{6}\overline{M}_c\left[M_a\left(1-3\frac{x^2}{l^2}\right) - M_a\left(1-3\frac{x'^2}{l^2}\right)\right]$	$\frac{l}{6} M_a \overline{M}_c \left(3\frac{x'^2}{l^2} - 1\right)$	$\frac{l}{2} M_b \overline{M}_c \left(1-3\frac{x^2}{l^2}\right)$

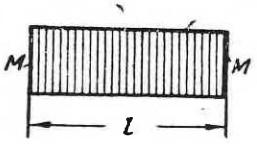
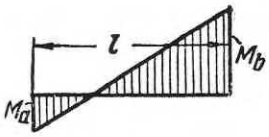
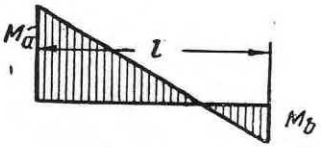
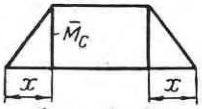
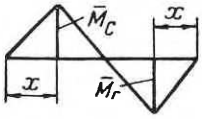
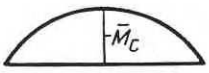
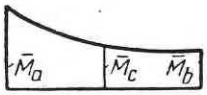
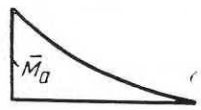
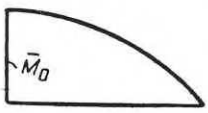
Продолжение табл. 4—1

Эпюра M_k / Эпюра M_i	 Фиг. 4—25	 Фиг. 4—26	 Фиг. 4—27
 Фиг. 4—18	$\frac{1}{2}\overline{M}_c(M_a+M_b)(l-x)$	$\frac{1}{2}M_a\overline{M}_c(l-x)$	$\frac{1}{2}M_b\overline{M}_c(l-x)$
 Фиг. 4—19	$\frac{1}{6}\overline{M}_c(M_a-M_b)(l-x)$	$\frac{1}{6}M_a\overline{M}_c(l-x)$	$-\frac{1}{6}M_b\overline{M}_c(l-x)$
 Фиг. 4—20	$\frac{l}{3}\overline{M}_c(M_a+M_b)$	$\frac{l}{3}M_a\overline{M}_c$	$\frac{l}{3}M_b\overline{M}_c$
 Фиг. 4—21	$\frac{l}{6}[M_a(\overline{M}_a+2\overline{M}_c)+$ $+M_b(2\overline{M}_c+\overline{M}_b)]$	$\frac{l}{6}M_a(\overline{M}_a+2\overline{M}_c)$	$\frac{l}{6}M_b(2\overline{M}_c+\overline{M}_b)$
 Фиг. 4—22	$\frac{l}{12}\overline{M}_a(3M_a+M_b)$	$\frac{l}{4}M_a\overline{M}_a$	$\frac{l}{12}M_b\overline{M}_a$
Фиг. 4—23	$\frac{l}{20}\overline{M}_a(4M_a+M_b)$	$\frac{l}{5}M_a\overline{M}_a$	$\frac{l}{20}M_b\overline{M}_a$
 Фиг. 4—24	$\frac{l}{12}\overline{M}_a(5M_a+3M_b)$	$\frac{5l}{12}M_a\overline{M}_a$	$\frac{l}{4}M_b\overline{M}_a$

Продолжение табл. 4—1

Эпюра M_l / Эпюра M_k	 Фиг. 4—28	 Фиг. 4—29	 Фиг. 4—30
 Фиг. 4—11	$\frac{l}{2} M (\overline{M}_a + \overline{M}_b)$	$\frac{l}{6} [2 (M_b \overline{M}_b - M_a \overline{M}_a) + M_b \overline{M}_a - M_a \overline{M}_b]$	$\frac{l}{6} [2(M_a \overline{M}_a - M_b \overline{M}_b) + M_a \overline{M}_b - M_b \overline{M}_a]$
 Фиг. 4—12	$\frac{l}{2} M \overline{M}_a$	$\frac{l}{6} \overline{M}_a (M_b - 2M_a)$	$\frac{l}{6} \overline{M}_a (2M_a - M_b)$
 Фиг. 4—13	$lM\overline{M}$	$\frac{l}{2} \overline{M} (M_b - M_a)$	$\frac{l}{2} \overline{M} (M_a - M_b)$
 Фиг. 4—14	$\frac{l}{2} M (\overline{M}_b - \overline{M}_a)$	$\frac{l}{6} [2(M_a \overline{M}_a + M_b \overline{M}_b) - M_a \overline{M}_b - M_b \overline{M}_a]$	$\frac{l}{6} [-2(M_a \overline{M}_a - M_b \overline{M}_b) + M_a \overline{M}_b + M_b \overline{M}_a]$
 Фиг. 4—15	$\frac{l}{2} M \overline{M}_c$	$\frac{l}{6} \left[M_b \left(1 + \frac{x}{l}\right) - M_a \left(1 + \frac{x'}{l}\right) \right] \overline{M}_c$	$\frac{l}{6} \left[M_a \left(1 + \frac{x'}{l}\right) - M_b \left(1 + \frac{x}{l}\right) \right] \overline{M}_c$
 Фиг. 4—16	$\frac{x}{2} M \overline{M}_a$	$\frac{x}{2} \left[\frac{x}{3l} (M_a + M_b) - M_a \right] \overline{M}_a$	$\frac{x}{2} \left[M_a - \frac{x}{3l} (M_a + M_b) \right] \overline{M}_a$
 Фиг. 4—17	$\frac{1}{2} M \overline{M}_c \frac{x'^2 - x^2}{l}$	$\frac{l}{6} \overline{M}_c \left[M_b \left(1 - 3 \frac{x^2}{l^2}\right) + M_a \left(1 - 3 \frac{x'^2}{l^2}\right) \right]$	$-\frac{l}{6} \overline{M}_c \left[M_b \left(1 - 3 \frac{x^2}{l^2}\right) + M_a \left(1 - 3 \frac{x'^2}{l^2}\right) \right]$

Продолжение табл. 4—1

Эпюра M_i / Эпюра M_k	 Фиг. 4-28	 Фиг. 4—29	 Фиг. 4—30
 Фиг. 4—18	$M\,\overline{M}_c\,(l-x)$	$\frac{1}{2}\,\overline{M}_c\,(M_b-M_a)\,(l-x)$	$\frac{1}{2}\,\overline{M}_c\,(M_a-M_b)\,(l-x)$
 Фиг. 4—19	0	$-\frac{1}{6}\,\overline{M}_c\,(M_a+M_b)\,(l-x)$	$\frac{1}{6}\,\overline{M}_c\,(M_a+M_b)\,(l-x)$
 Фиг. 4—20	$\frac{2l}{3}\,M\,\overline{M}_c$	$\frac{l}{3}\,\overline{M}_c\,(M_b-M_a)$	$\frac{l}{3}\,\overline{M}_c\,(M_a-M_b)$
 Фиг. 4—21	$\frac{l}{6}\,M\,(\overline{M}_a+4\,\overline{M}_c+\overline{M}_b)$	$\frac{l}{6}\,[M_b(2\,\overline{M}_c+\overline{M}_b)-$ $-M_a(\overline{M}_a+2\overline{M}_c)\,]$	$\frac{l}{6}\,[M_a(\overline{M}_a+2\,\overline{M}_c)-$ $-M_b\,(2\,\overline{M}_c+\overline{M}_b)]$
 Фиг. 4—22	$\frac{l}{3}\,M\,\overline{M}_a$	$\frac{l}{12}\,\overline{M}_a\,(M_b-3M_a)$	$\frac{l}{12}\,\overline{M}_a\,(3M_a-M_b)$
Фиг. 4—23	$\frac{l}{4}\,M\,\overline{M}_a$	$\frac{l}{20}\,\overline{M}_a\,(M_b-4M_a)$	$\frac{l}{20}\,\overline{M}_a\,(4M_a-M_b)$
 Фиг. 4—24	$\frac{2l}{3}\,M\,\overline{M}_a$	$\frac{l}{12}\,\overline{M}_a\,(3M_b-5M_a)$	$\frac{l}{12}\,\overline{M}_a\,(5M_a+3M_b)$

Примечание. Приведенные в табл. 4—1 значения интегралов могут быть распространены на случай кривых стержней, имеющих переменный момент инерции J, при условии, если $J\cos\varphi = \text{const} = J_0$, где φ — наклон оси стержня к оси x.

Действительно:

$$\int \frac{M_i M_k}{EJ}\,ds = \int \frac{M_i M_k \frac{dx}{\cos\varphi}}{E\frac{J_0}{\cos\varphi}} = \frac{1}{EJ_0}\int M_i M_k\,dx.$$

2. Метод сил

1) **Основные предпосылки.** В методе сил за неизвестные принимаются силовые факторы — нормальные и поперечные силы и моменты. При решении задач по методу сил заданная система, k раз статически неопределимая, сначала обращается в статически определимую путем удаления некоторых k, так называемых лишних[1] связей (выбирается основная система). Действие этих связей заменяется действием неизвестных сил $X_1, X_2, \ldots, X_n$, которые и присоединяются к заданной нагрузке сооружения.

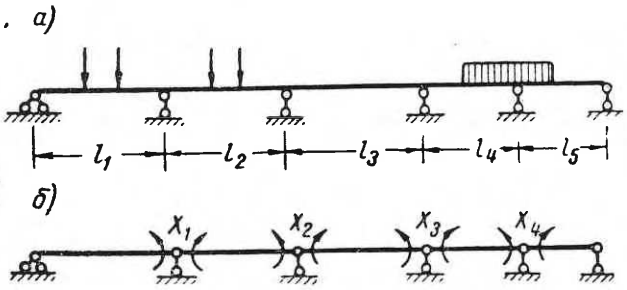
2) **Канонические уравнения.** Основные уравнения при этом имеют следующий «канонический» — одинаковый для всех систем вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\delta_{11}X_1+\delta_{12}X_2+\delta_{13}X_3+\cdots+\delta_{1n}X_n+\delta_{1p}+\delta_{1t}=0;\\
&\delta_{21}X_1+\delta_{22}X_2+\delta_{23}X_3+\cdots+\delta_{2n}X_n+\delta_{2p}+\delta_{2t}=0;\\
&\delta_{31}X_1+\delta_{32}X_2+\delta_{33}X_3+\cdots+\delta_{3n}X_n+\delta_{3p}+\delta_{3t}=0;\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\delta_{n1}X_1+\delta_{n2}X_2+\delta_{n3}X_3+\cdots+\delta_{nn}X_n+\delta_{np}+\delta_{nt}=0.
\end{aligned}\right\}\quad(4-6)$$

Первое из этих уравнений выражает ту мысль, что суммарное перемещение по направлению первой удаленной связи, вызванное всеми лишними неизвестными, а также всей внешней нагрузкой и температурой, равно нулю. Аналогичный смысл имеют и прочие уравнения.

В этих уравнениях δ_{ik} — перемещение в направлении X_i от усилия $X_k=1$, δ_{ip} — перемещение в направлении усилия X_i от внешней нагрузки; δ_{it} — перемещение в направлении X_i от температуры.

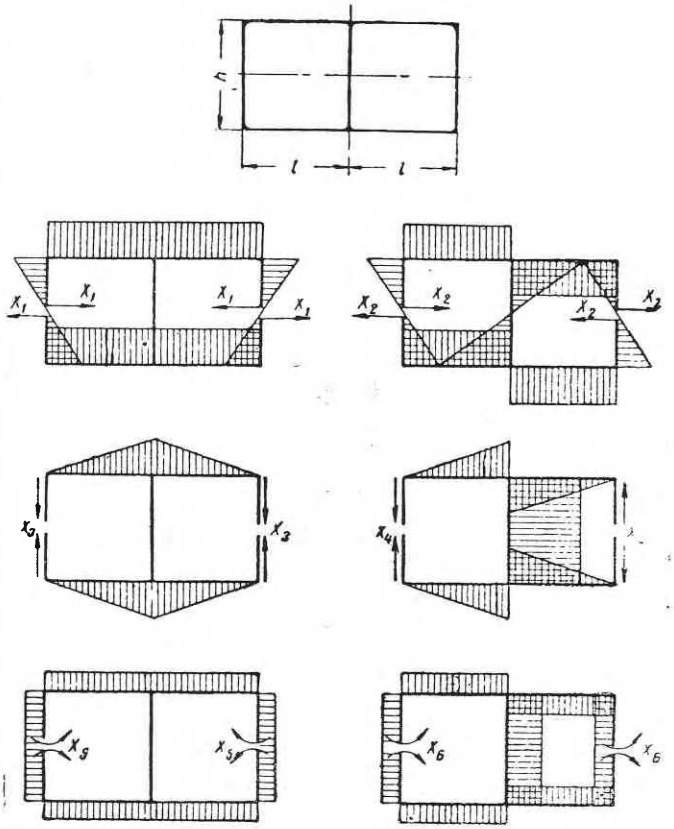
Перемещения δ_{ik}, δ_{ip} и δ_{it} определяются по формуле Максвелла — Мора или по теореме Верещагина.



Фиг. 4—31

3) **Выбор основной системы и лишних неизвестных.** Основная система должна быть геометрически неизменяемой и приводить к обращению возможно большого количества «побочных» перемещений (δ_{ik}) в нуль.

[1] То есть не являющихся необходимыми для равновесия системы, но необходимых для ее правильной работы.



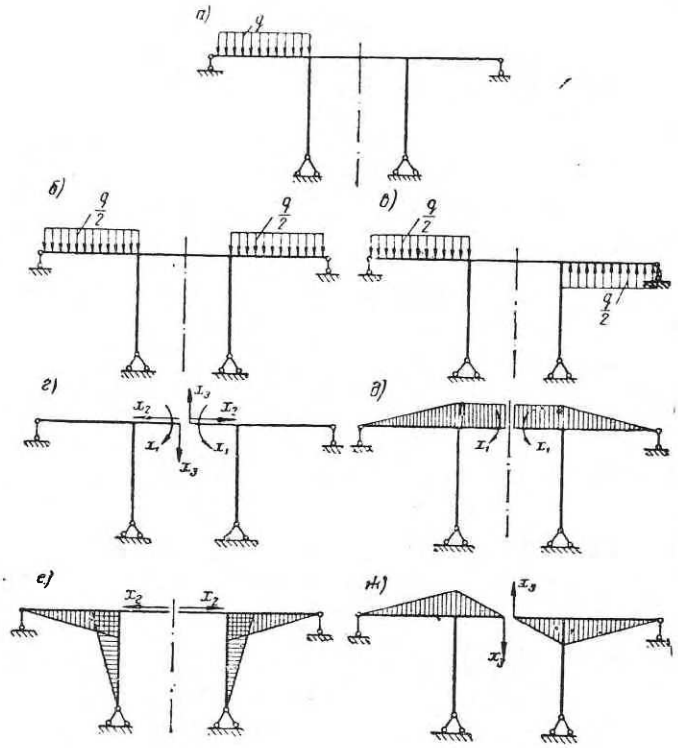
Фиг. 4—32.

Например, если для неразрезной балки (фиг. 4—31,*а*) основную систему принять (фиг. 4—31,*б*) в виде ряда простых однопролетных балок, то получится $\delta_{13}=\delta_{14}=\delta_{15}=\ldots=\delta_{1n}=0$; $\delta_{24}=\delta_{25}=\ldots=0$ и т. д., а система канонических уравнений при любом числе пролетов будет представлять собой систему трехчленных уравнений:

$$\begin{aligned}
&\delta_{11}X_1+\delta_{12}X_2+\delta_{1p}=0;\\
&\delta_{21}X_1+\delta_{22}X_2+\delta_{23}X_3+\delta_{2p}=0;\\
&\delta_{32}X_2+\delta_{33}X_3+\delta_{34}X_4+\delta_{3p}=0;\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\delta_{nn-1}X_{n-1}+\delta_{nn}X_n+\delta_{np}=0,
\end{aligned}$$

которая решается проще и быстрее.

Для симметричных рам следует выбирать основную систему симметричной, лишние же неизвестные принимать такие, чтобы единичные эпюры получались симметричными или обратно симметричными, что приведет к обращению в нуль ряда «побочных» перемещений, и система совместно решаемых уравнений распадется на две самостоятельные системы.



Фиг. 4—33

В сложных симметричных рамах в качестве неизвестных следует принимать не отдельные силы, а группы сил. Эти групповые неизвестные должны быть такими, чтобы они давали симметричные и обратно симметричные эпюры моментов.

На фиг. 4—32 представлена группировка неизвестных с разрезкой по оси симметрии для замкнутой двухконтурной рамы.

В результате удачного выбора неизвестных система из шести уравнений разбилась на два уравнения с одним неизвестным каждое:

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{1p} = 0;\ \delta_{22} X_2 + \delta_{2p} = 0$$

и две системы из двух уравнений каждая:

$$\left.\begin{aligned} \delta_{33} X_3 + \delta_{35} X_5 + \delta_{3p} &= 0; \\ \delta_{53} X_3 + \delta_{55} X_5 + \delta_{5p} &= 0; \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} \delta_{44} X_4 + \delta_{46} X_6 + \delta_{4p} &= 0; \\ \delta_{64} X_4 + \delta_{66} X_6 + \delta_{6p} &= 0. \end{aligned}\right\}$$

4) Преобразование внешнего воздействия. Любое внешнее воздействие (нагрузка, температура, перемещение опор), приложенное к раме, обладающей осями симметрии, можно заменить алгебраической суммой двух воздействий — симметричного и обратно симметричного относительно каждой оси симметрии.

Так на фиг. 4—33,*а* показана заданная нагрузка, а на фиг. 4—33,*б* и 4—33,*в* симметричная и обратно симметричная, которые можно рассматривать как две составляющие данной нагрузки. В этом случае упрощается вычисление свободных членов, так как симметричная эпюра от нагрузки даст с эпюрой от обратно симметричного неизвестного перемещение $\delta_{3q'} = 0$, а обратно симметричная эпюра от нагрузки даст с эпюрами от симметричных неизвестных перемещения $\delta_{1q''} = \delta_{2q''} = 0$.

Кроме того, в случае симметричной нагрузки неизвестное X_3, имеющее обратно симметричную эпюру, будет равно нулю, единичные неизвестные X_1 и X_2 дадут эпюры, представленные на фиг. 4—33,*д* и 4—33,*е*, и система уравнений примет вид:

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{1q'} = 0;$$

$$\delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{2q'} = 0.$$

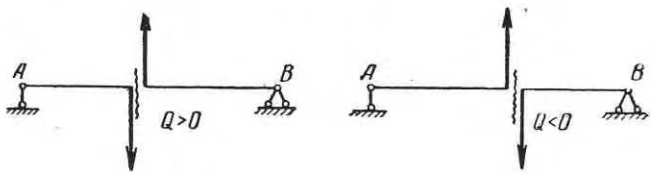
При действии обратно симметричной нагрузки симметричные неизвестные X_1 и X_2 будут равны нулю, и неизвестное X_3 (фиг. 4—33,*ж*) определится из уравнения:

$$\delta_{33} X_3 + \delta_{3q''} = 0.$$

5) **Построение окончательных эпюр** M, Q **и** N. Построение этих эпюр может быть произведено после того, как лишние неизвестные будут найдены в результате решения системы канонических уравнений и проверены путем подстановки значений их в канонические уравнения.

Первой строится эпюра M. Ординаты эпюр моментов от единичных сил следует умножить на соответствующие значения неизвестных, сложить полученные эпюры и добавить эпюры от внешних воздействий. Ординаты окончательной эпюры моментов обычно откладываются на чертеже со стороны растянутого волокна.

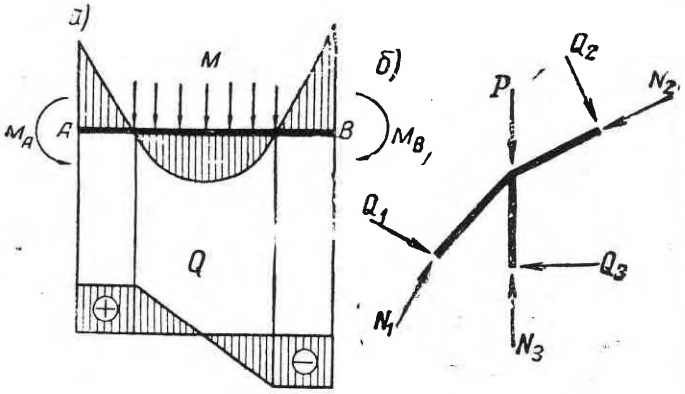
Эпюра поперечных сил Q строится как производная от эпюры M. Для поперечных сил целесообразно пользоваться следующим правилом знаков (фиг. 4—34): если в каком-либо сечении каждая из двух



Фиг. 4—34

равнопротивоположных поперечных сил стремится повернуть относительно опор свою часть стержня по часовой стрелке, то $Q>0$, в противном случае $Q<0$. Что касается абсолютной величины, то в любом сечении прямолинейного стержня (фиг. 4—35,*а*)

$$Q = Q_0 \pm \frac{M_A - M_B}{l}, \qquad (4—7)$$



Фиг. 4—35

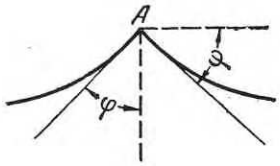
где Q_0 — поперечная сила от внешней нагрузки в сечении простой балки, пролетом l, свободно опертой по концам;

$\frac{M_A}{l}$ и $\frac{M_B}{l}$ — поперечные силы, вызванные опорными моментами; их знак берется в каждом случае на основании того же правила.

Для определения продольных сил N следует вырезать последовательно узлы (фиг. 4—35,*б*) и исследовать равновесие поперечных и продольных усилий, приложенных в узле к концам стержней, вместе с внешней узловой нагрузкой, если таковая имеется. Знак (—) на эпюре обозначает растяжение, а знак (+) сжатие.

3. Метод деформаций

1) Основные предпосылки. В методе деформаций за неизвестные принимаются деформации: углы поворота узлов и независимые смещения узлов.

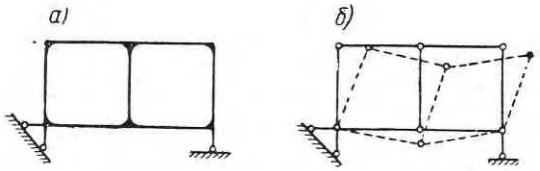


Фиг. 4—36

Поворотом узла A (фиг. 4—36) называется общий угол φ поворота касательных, проведенных в точке A, к упругим линиям стержней, жестко связанных между собой в этом узле.

Число независимых смещений узлов равно числу опорных стержней, которые необходимо добавить, чтобы сделать условную систему, полученную из схемы рамы установкой шарниров в узлах, неизменяемой.

На фиг. 4—37,*а* дана схема рамы, а на фиг. 4—37,*б* — ее шарнирная схема, обладающая числом независимых смещений, равным двум.



Фиг. 4—37

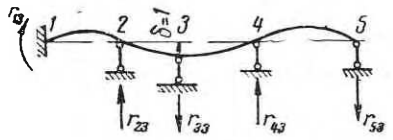
Для решения рамы в общем виде заданную раму следует преобразовать в основную систему путем устройства дополнительных закреплений, препятствующих поворотам узлов, и установки опорных стержней, препятствующих линейным смещениям узлов.

2) **Реакции рамы.** Через r_{ik} обозначается реакция, возникающая в каком-либо закреплении (связи) i, когда закрепление k, заделка или опорный стержень смещается по своему направлению, т. е. поворачивается или перемещается линейно, на единицу. На фиг. 4—38 показана неразрезная балка, у которой произошло смещение опорного стержня 3, и написаны обозначения нескольких вызванных этой деформацией реакций.

Реакции r_{ik} обладают свойством взаимности:

$$r_{ik} = r_{ki}. \qquad (4—8)$$

Реакция в каком-либо закреплении i, вызываемая внешней нагрузкой, обозначается через r_{ip}, температурой — r_{it}. Реакции r_{ik}, r_{ip}, r_{it} считаются по-



Фиг. 4—38

ложительными, когда они направлены в ту же сторону, куда направлено положительное перемещение закрепления, выбираемое произвольно.

Общие формулы для определения реакций имеют вид:

$$r_{ik} = \sum \int \frac{M_i M_k}{EJ} ds; \qquad (4—9)$$

$$r_{ii} = \sum \int \frac{M_i^2}{EJ} ds, \qquad (4—10)$$

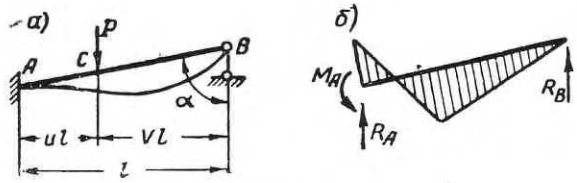
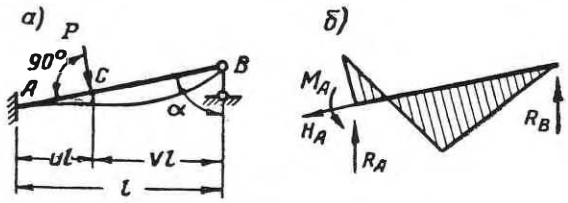
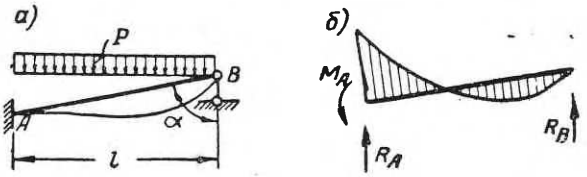
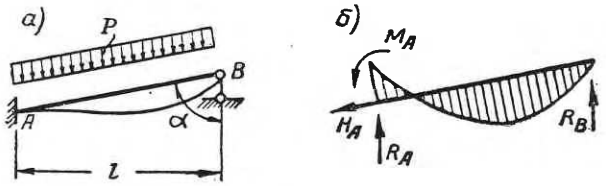
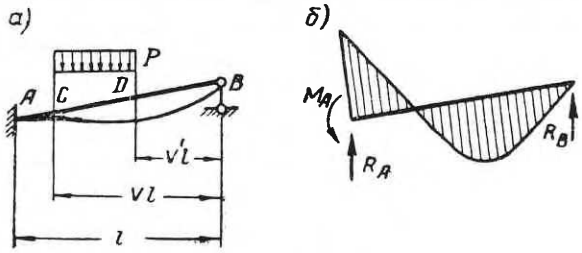
где M_i и M_k — эпюры моментов в основной системе, которые возникают от смещений, равных единице и происходящих по направлению закреплений (связей), обозначенных теми же номерами.

В случае, когда смещение происходит одновременно по нескольким закреплениям, т. е. когда имеется групповое перемещение, реакция будет также иметь групповой характер. Определение реакций от внешних воздействий производится, когда узлы закреплены, т. е в основной системе.

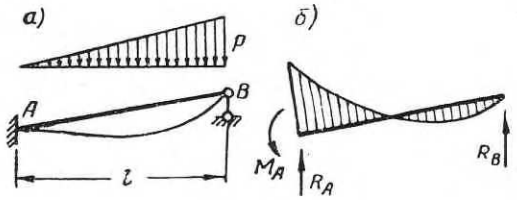
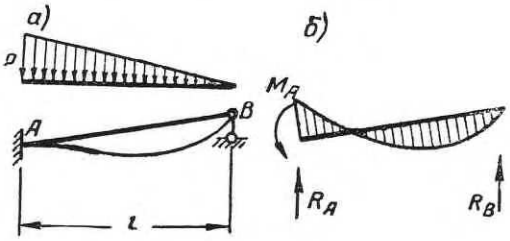
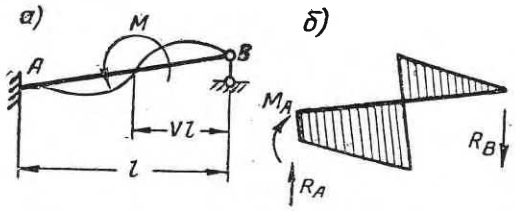
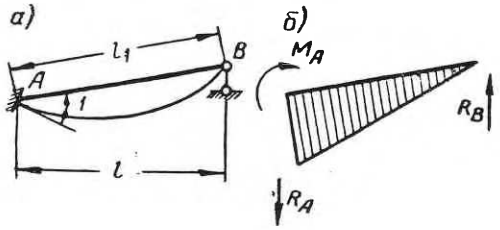
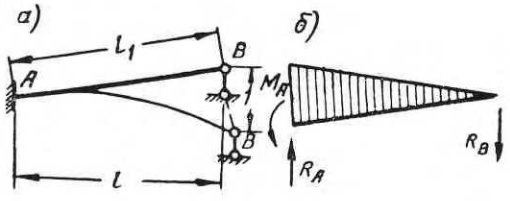
Реакции балок и простейших рам даны в табл. 4—2.

Таблица 4—2

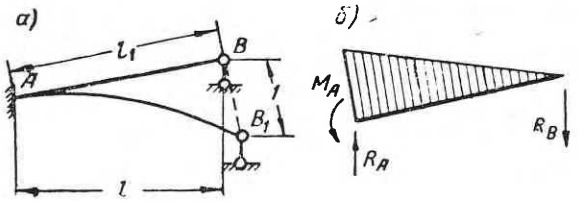
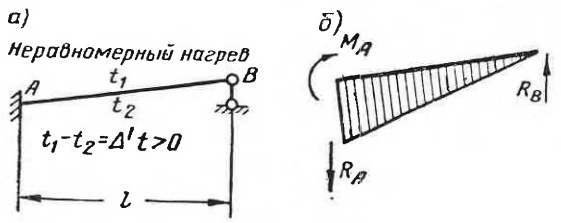
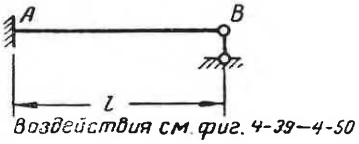
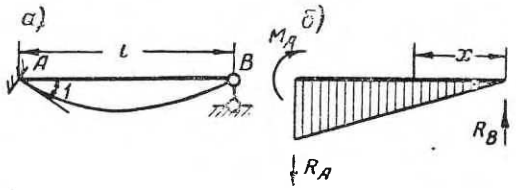
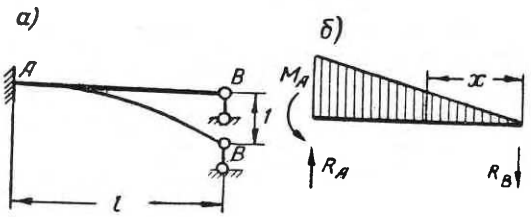
Реакции статически неопределимых систем

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
I. Балка постоянного сечения, заделанная на одном конце и опертая на другом		
		$M_A = \frac{Pl}{2} v(1 - v^2)$ $R_A = \frac{Pv}{2}(3 - v^2)$ $M_C = \frac{Pl}{2} u^2 v$ $R_B = Pu^2\left(1 + \frac{v}{2}\right) = \frac{Pu^2}{2}(3 - u)$
Фиг. 4—39		
		M_A, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4—39, но с заменой P на $\frac{P}{\sin\alpha}$ $H_A = P \operatorname{ctg}\alpha$
Фиг. 4—40		
		$M_A = \frac{pl^2}{8}$ $R_A = \frac{5}{8} pl, R_B = \frac{3}{8} pl$
Фиг. 4—41		
		M_A, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4—41, но с заменой p на $\frac{p}{\sin^2\alpha}$ $H_A = pl \operatorname{ctg}\alpha$
Фиг. 4—42		
		$M_A = \frac{pl^2}{8}(r - r')$, где $r = v^3(2 - v^2)$ $r' = v'^2(2 - v'^2)$ $R_A = \frac{pl}{8}(v - v')[8 - (v + v')(2 + v^2 + v'^2)]$ $R_B = \frac{pl}{8}(v^2 - v'^2)(2 + v^2 + v'^2)$
Фиг. 4—43		

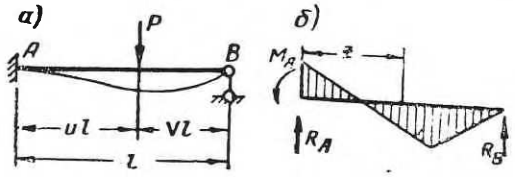
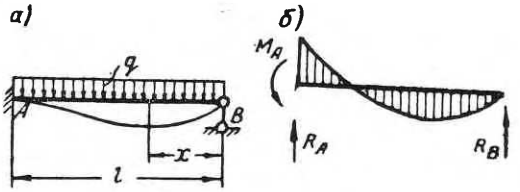
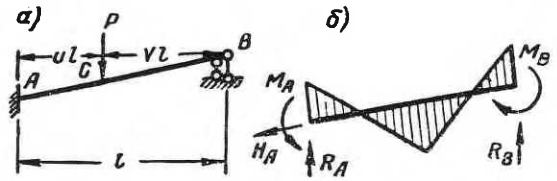
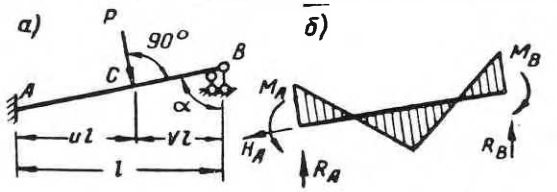
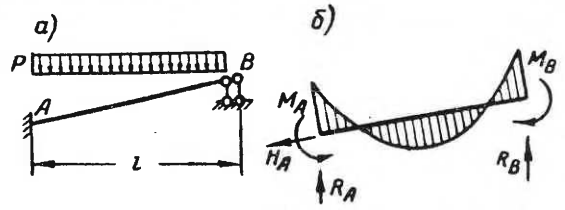
Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 *Фиг. 4—44*		$M_A = \frac{7}{120} pl^2$ $R_A = \frac{9}{40} pl$ $R_B = \frac{11}{40} pl$
 *Фиг. 4—45*		$M_A = \frac{1}{15} pl^2$ $R_A = \frac{2}{5} pl$ $R_B = \frac{1}{10} pl$
 *Фиг. 4—46*		$M_A = \frac{M}{2}(1 - 3v^2)$ $R_A = R_B = \frac{M}{2l}(1 + 3v^2)$
 *Фиг. 4—47*		$M_A = \frac{3EJ}{l_1}$ $R_A = R_B = \frac{3EJ}{l_1 l}$
 *Фиг. 4—48*		$M_A = \frac{3EJ}{l_1 l}$ $R_A = R_B = \frac{3EJ}{i^2 l_1}$

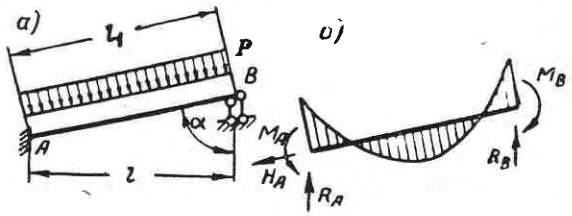
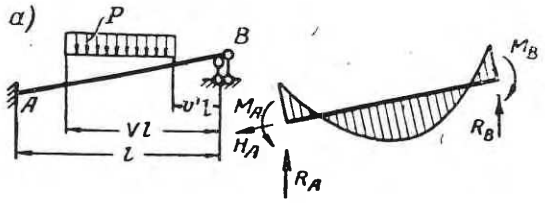
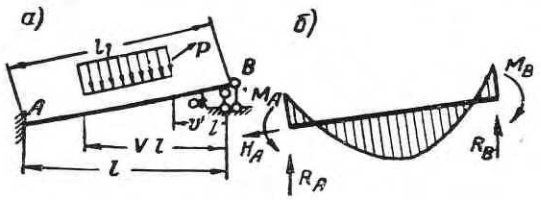
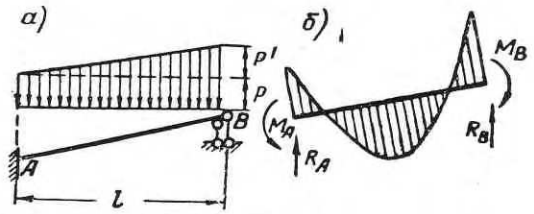
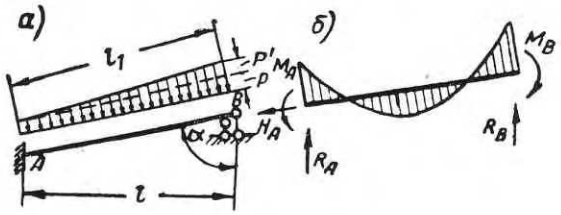
Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 Фиг. 4—49		$M_A = \frac{3EJ}{l_1^2}$ $R_A = R_B = \frac{3EJ}{l_1^3}$
 Фиг. 4—50		$M_A = \frac{3EJ\,\varepsilon\Delta' t}{2h}$, где h — высота поперечного сечения; ε — коэффициент линейного расширения $R_A = R_B = \frac{3EJ\,\varepsilon\Delta' t}{2hl}$
 Воздействия см. фиг. 4-39—4-50 Фиг. 4—51		Формулы получаются из предыдущих при помощи подстановки: $l_1 = l$
II. Балка переменного сечения, заделанная на одном конце и опертая на другом		
 Фиг. 4—52		$M_A = \frac{l^2}{\int \frac{x^2}{EJ_x}\,dx} = \frac{EJ_0 l^2}{\int x^2\,dx'}$ $R_A = R_B = \frac{EJ_0 l}{\int x^2\,dx'}$ $dx' = \frac{J_0}{J}\,dx$
 Фиг. 4—53		$M_A = \frac{EJ_0 l}{\int x^2 dx'}$ $R_A = R_B = \frac{EJ_0}{\int x^2\,dx'}$ $dx' = \frac{J_0}{J}\,dx$

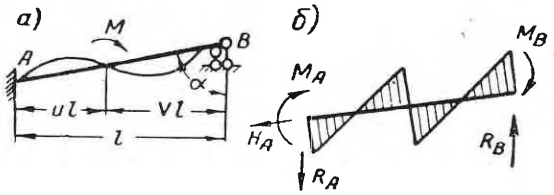
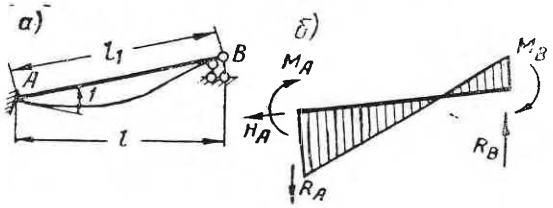
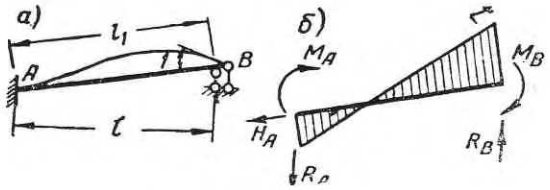
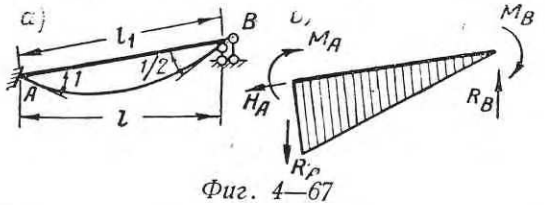
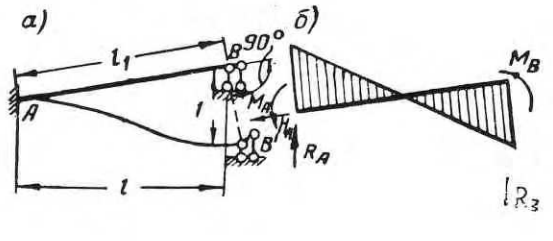
Продолжение табл. 4--2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 *Фиг. 4—54*		$M_A = \dfrac{u\int_0^{vl} x^2\,dx' + v\int_0^{ul} z\,(l-z)\,dz'}{\int_0^{l} x^2\,dx'}\,Pl$ $R_A = Pv + \dfrac{M_A}{l}\,;\quad R_B = Pu - \dfrac{M_A}{l}$ $dx' = \dfrac{J_0}{J}\,dx;\quad dz' = \dfrac{J_0}{J}\,dx$
 *Фиг. 4—55*		$M_A = \dfrac{l\int_0^{l} x^2\,dx' - \int_0^{l} x^3\,dx'}{2\int_0^{l} x^2 dx'}\,ql$ $R_A = \dfrac{ql}{2} + \dfrac{M_A}{l}$ $R_B = \dfrac{ql}{2} - \dfrac{M_A}{l}\,;\quad dx' = \dfrac{J_0}{J}\,dx$
III. Балка постоянного сечения с обоими защемленными концами		
 *Фиг. 4—56*		$M_A = uv^2Pl$ $M_B = u^2vPl$ $M_C = 2u^2v^2Pl$ $R_A = v^2(1+2u)\,P$ $R_B = u^2(1+2v)\,P$ $H_A = 0$
 *Фиг. 4—57*		M_A, M_B, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4 — 56, но с заменой P на $\dfrac{P}{\sin\alpha}$ $H_A = P\operatorname{ctg}\alpha$
 *Фиг. 4—58*		$M_A = M_B = \dfrac{pl^2}{12}$ $R_A = R_B = \dfrac{pl}{2}$ $H_A = 0$

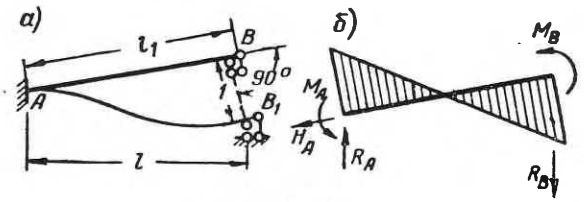
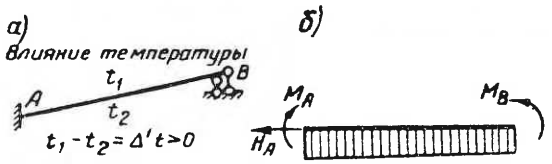
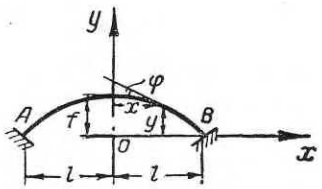
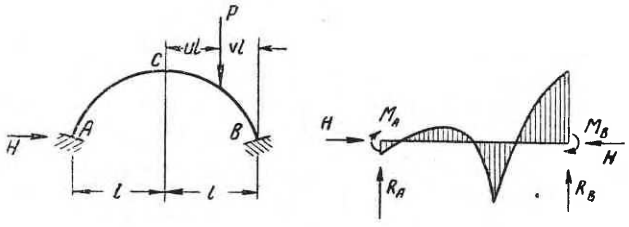
Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 *Фиг. 4—59*		M_A, M_B, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4 — 58, но с заменой p на $\frac{p}{\sin^2\alpha}$ $H_A = pl_1 \operatorname{ctg}\alpha$
 *Фиг. 4—60*		$M_A = \frac{pl^2}{12}[4(v^3 - v'^3) - 3(v^4 - v'^4)]$ $M_B = \frac{pl^2}{12}[6(v^2 - v'^2) - 8(v^3 - v'^3) + 3(v^4 - v'^4)]$ $R_A = \frac{pl}{2}[2(v^3 - v'^3) - (v^4 - v'^4)]$ $R_B = \frac{pl}{2}[2(v - v') - 2(v^3 - v'^3) + (v^4 - v'^4)]$ $H_A = 0$
 *Фиг. 4—61*		M_A, M_B, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4 — 60, но с заменой p на $\frac{p}{\sin^2\alpha}$ $H_A = pl_1(v - v')\operatorname{ctg}\alpha$
 *Фиг. 4—62*		$M_A = \frac{pl^2}{12} + \frac{p'l^2}{30}$ $M_B = \frac{pl^2}{12} + \frac{p'l^2}{20}$ $R_A = \frac{pl}{2} + \frac{11}{60}p'l$ $R_B = \frac{pl}{2} + \frac{19}{60}p'l$ $H_A = 0$
 *Фиг. 4—63*		M_A, M_B, R_A, R_B — те же, что на фиг. 4 — 62, но с заменой p на $\frac{p}{\sin^2\alpha}$ и p' на $\frac{p'}{\sin^2\alpha}$ $H_A = \left(p + \frac{1}{2}p'\right) l_1 \operatorname{ctg}\alpha$

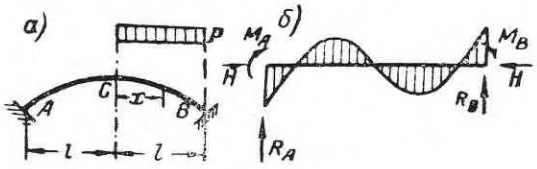
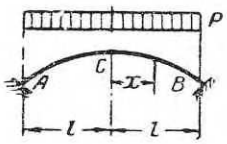
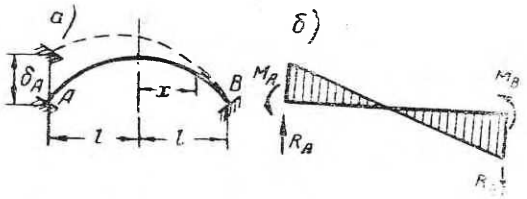
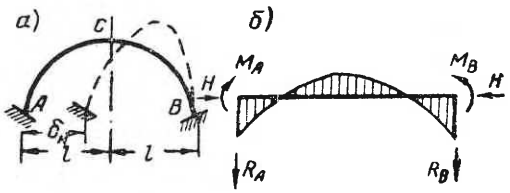
Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 Фиг. 4—64		$M_A = v(2-3v)M$ $M_B = u(2-3u)M$ $R_A = R_B = 6uv\dfrac{M}{l}$ $H_A = 0$
 Фиг. 4—65		$M_A = \dfrac{4EJ}{l_1}$ $M_B = \dfrac{2EJ}{l_1}$ $R_A = R_B = \dfrac{6EJ}{ll_1}$ $H_A = 0$
 Фиг. 4—66		$M_A = \dfrac{2EJ}{l_1}$ $M_B = \dfrac{4EJ}{l_1}$ $R_A = R_B = \dfrac{6EJ}{ll_1}$ $H_A = 0$
 Фиг. 4—67		$M_A = \dfrac{3EJ}{l_1}$ $M_B = 0$ $R_A = R_B = \dfrac{3EJ}{l_1 l}$ $H_A = 0$
 Фиг. 4—68		$M_A = M_B = \dfrac{6EJ}{l_1 l}$ $R_A = R_B = \dfrac{12\,EJ}{l_1 l^2}$ $H_A = 0$

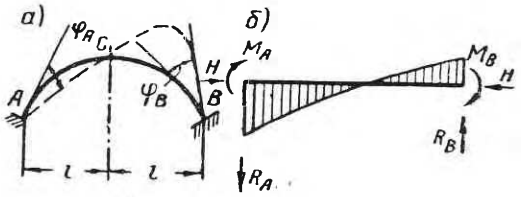
Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 *Фиг. 4—69*		$M_A = M_B = \frac{6EJ}{l_1^2}$ $R_A = R_B = \frac{12\,EJ}{l_1^2\,l}$ $H_A = 0$
 *Фиг. 4—70*		$M_A = M_B = \frac{EJ\,\varepsilon\Delta' t}{h}$, где h — высота поперечного сечения балки $R_A = R_B = 0$ $H_A = 0$
IV. Параболическая бесшарнирная арка		
 *Фиг. 4—71*		Уравнение оси: $y = f\left[1-\left(\frac{x}{l}\right)^2\right]$ Изменение моментов инерции: $J = \frac{J_0}{\cos\varphi}$, где J_0 — момент инерции сечения арки в ключе. Влияние нормальных и поперечных сил на деформации не принято во внимание
 *Фиг. 4—72*		$M_A = \frac{Pl}{16}(1-u^2)(1+4u-5u^2)$ $M_B = \frac{Pl}{16}(1-u^2)(1-4u-5u^2)$ $M_C = \frac{Pl}{32}(3-16u+18u^2-5u^4)$ Момент под грузом $M_u = \frac{3}{32}Pl\,(1-u^2)^2(1+5u^2)$ (при положительном значении этих моментов растянутое волокно располагается внизу) $R_A = \frac{P}{4}(1-u)^2(2+u)$ $R_B = \frac{P}{4}(1+u)^2(2-u)$ $H = \frac{15}{32}\cdot\frac{Pl}{f}(1-u^2)^2$

Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значения реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
 *Фиг. 4—73*		$M_A = M_B = \frac{pl^2}{16}$ $M_C = 0$ $M_x = \mp \frac{pl^2}{16} \cdot \frac{x}{l}\left(3 - 4\,\frac{x}{l}\right)$ (эта формула годится для обеих половин арки, если понимать под x абсолютную величину абсциссы, отсчитанной от середины арки; знак минус относится к незагруженной половине) $R_A = \frac{3}{16}\,pl$ $R_B = \frac{13}{16}\,pl$ $H = \frac{1}{f} \cdot \frac{pl^2}{4}$
 *Фиг. 4—74*		$M_A = M_B = M_C = M_x = 0$ $R_A = R_B = pl$ $H = \frac{pl^2}{2f}$
 *Фиг. 4—75*		$M_A = M_B = \frac{3EJ_0}{2l^2}\,\delta_A$ $M_x = \frac{3EJ_0}{2l^2}\,\delta_A\,\frac{x}{l}$ $R_A = R_B = \frac{3EJ_0}{2l^3}\,\delta_A$ $H = 0$
 *Фиг. 4—76*		$M_A = M_B = \frac{15EJ_0}{4fl}\,\delta_H$ $M_C = \frac{15EJ_0}{8fl}\,\delta_H$ $R_A = R_B = 0$ $H = \frac{45EJ_0}{8fl^2}\,\delta_H$

Продолжение табл. 4—2

Системы и воздействия на них	Реакции и эпюры изгибающих моментов	Значение реакций (положительные значения, получаемые по формулам, соответствуют стрелкам, показанным в таблице)
		$M_A = \frac{3EJ_0}{2l}(3\varphi_A - \varphi_B)$ $M_B = \frac{3EJ_0}{2l}(\varphi_A - 3\varphi_B)$ $M_C = -\frac{3EJ_0}{4l}(\varphi_A - \varphi_B)$ $R_A = R_B = \frac{3EJ_0}{2l^2}(\varphi_A + \varphi_B)$ $H = \frac{15EJ_0}{4fl}(\varphi_A - \varphi_B)$

Фиг. 4—77

3) Канонические уравнения метода деформаций. В основной системе после постановки связей перемещения узлов невозможны, но в связях появляются реактивные усилия. Если давать узлам повороты и смещения, то реактивные усилия будут изменяться. Надо дать такие углы поворота и смещения, чтобы реактивные усилия обращались в нуль.

Условия обращения суммарных реакций в нуль записываются в виде канонических уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &r_{11}\varphi_1 + r_{12}\varphi_2 + \cdots + r_{1n-1}\delta_{n-1} + r_{1n}\delta_n + r_{1p} + r_{1t} = 0;\\ &r_{21}\varphi_1 + r_{22}\varphi_2 + \cdots + r_{2n-1}\delta_{n-1} + r_{2n}\delta_n + r_{2p} + r_{2t} = 0;\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &r_{n1}\varphi_1 + r_{n2}\varphi_2 + \cdots + r_{nn-1}\delta_{n-1} + r_{nn}\delta_n + r_{np} + r_{nt} = 0, \end{aligned}\right\} \quad (4-11)$$

где φ — углы поворота узлов;
δ — независимые линейные смещения узлов.

Определение коэффициентов канонических уравнений поясним на примере.

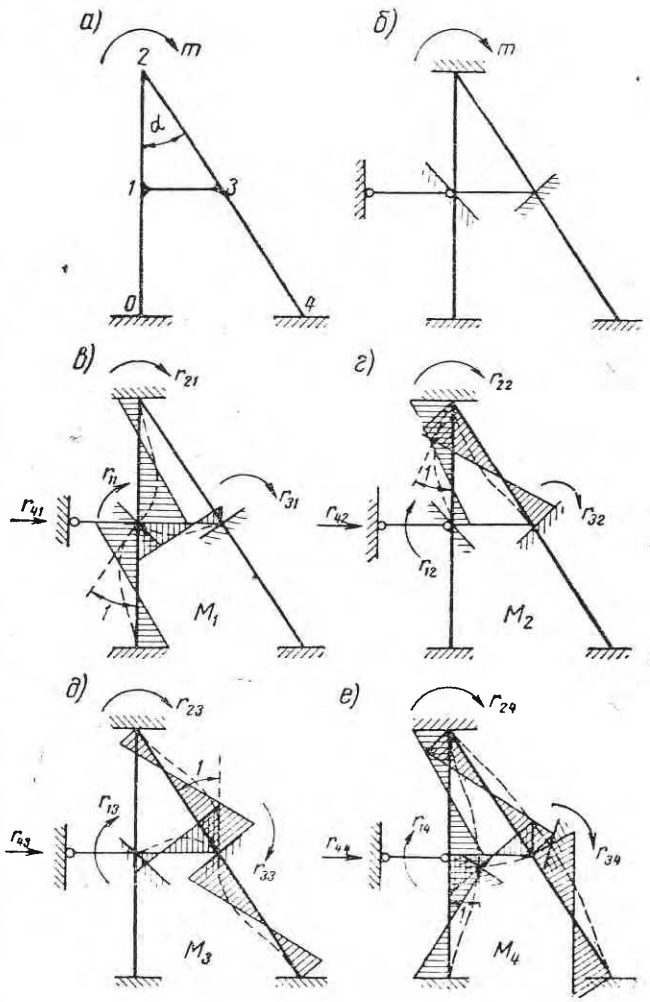
Дана рама (фиг. 4—78), нагруженная сосредоточенным моментом m в узле *2* и имеющая все стержни одинакового сечения ($J = \text{const}$).

За основную систему принимаем раму, заделанную в узлах *1*, *2* и *3* и опертую на горизонтальный стержень в узле *1* (фиг. 4—78,*б*), ибо система, полученная из рамы постановкой шарниров, обладает одной степенью изменяемости, верхний узел *2* в данном случае не имеет горизонтального смещения. Даем последовательно четыре единичных смещения по направлению наложенных связей, представленных на фиг. 4—78,*в*, *г*, *д*, *е*.

На тех же фигурах представлены эпюры моментов, полученные в результате произведенных смещений, характер и направление полученных реакций.

Обозначив $\frac{EJ}{l} = i$ и используя табл. 4—2 (см. фиг. 4—65), получим

$$r_{11} = 4(i_{10} + i_{12} + i_{13}),$$



Фиг. 4—78

где

$$i_{10} = \frac{EJ}{l_{10}};$$

$$i_{12} = \frac{EJ}{l_{12}};$$

$$i_{13} = \frac{EJ}{l_{13}};$$

l_{10}, l_{12}, l_{13} — длины стержней между узлами рамы;

$$r_{12} = 2i_{12};$$
$$r_{13} = 2i_{13};$$

$$r_{14} = 6\left(\frac{i_{12}}{l_{12}} - \frac{i_{10}}{l_{10}} + \frac{i_{13}}{l_{13}}\operatorname{tg}\alpha\right);$$

$$r_{22} = 4(i_{12} + i_{23}); \quad r_{23} = 2i_{23};$$

$$r_{24} = 6\left(\frac{i_{12}}{l_{12}} + \frac{i_{23}}{l_{23}\cos\alpha}\right);$$

$$r_{33} = 4(i_{23} + i_{34} + i_{13});$$

$$r_{34} = 6\left(\frac{i_{23}}{l_{23}\cos\alpha} - \frac{i_{34}}{l_{34}\cos\alpha} + \frac{i_{13}\operatorname{tg}\alpha}{l_{13}}\right).$$

Реакция r_{44} в опорном стержне легче всего вычисляется при помощи интеграции эпюры M_4 по теореме Верещагина [см. формулу (4—10)] после предварительного определения составляющих зависимого смещения узла *3*, которые равны: горизонтальное 1, вертикальное — $1 \cdot \operatorname{tg}\alpha$, нормальное к оси стержней *2—3* и *3—4* — $\frac{1}{\cos\alpha}$, тогда:

$$r_{44} = \sum \int \frac{M_4^2}{EJ}\,ds = 12\left(\frac{i_{10}}{l_{10}^2} + \frac{i_{12}}{l_{12}^2} + \frac{i_{13}\operatorname{tg}^2\alpha}{l_{13}^2} + \right.$$
$$\left. + \frac{i_{23}}{l_{23}^2\cos^2\alpha} + \frac{i_{34}}{l_{34}^2\cos^2\alpha}\right);$$

$$r_{1p} = r_{3p} = r_{4p} = 0; \quad r_{2p} = -m.$$

Подставив полученные коэффициенты в систему канонических уравнений и решив их, получим величины неизвестных перемещений φ_1, φ_2, φ_3 и δ_4.

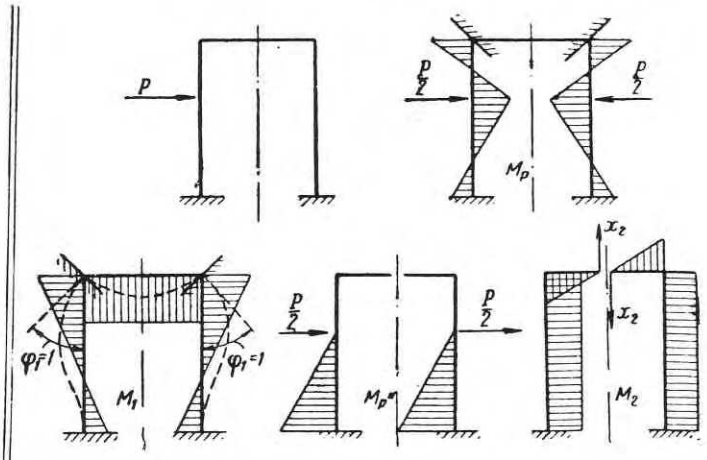
4) Построение эпюр *M*, *Q* и *N*. Окончательная эпюра моментов строится способом, аналогичным изложенному в методе сил.

Эпюра *Q* может быть построена либо как производная от эпюры *M*, либо непосредственно, как это указано в п. 2.5.

Эпюра *N* может быть получена из условия равновесия узлов (см. п. 2.5).

4. Комбинирование метода сил и метода деформаций

На фиг. 4—79 дано решение симметричной рамы, которая по методу сил содержит три неизвестных (два симметричных и одно обратно симметричное), а по методу деформаций то же число неизвестных, но иначе распределенное (одно симметричное и два обратно симметричных). Нагрузка преобразуется (п.2.4) в симметричную и обратно симметричную.



Фиг. 4—79

Для симметричной нагрузки расчет производится по методу деформаций, который дает одно уравнение:

$$r_{11}\varphi_1 + r_{1p} = 0;$$

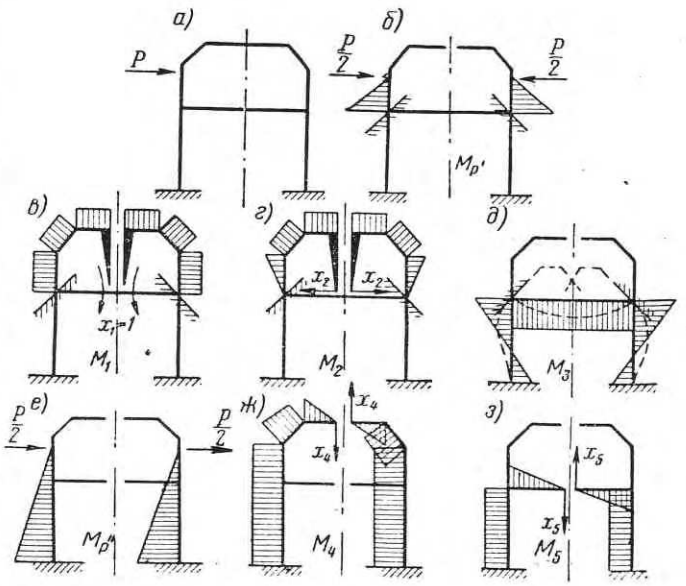
для обратно симметричной — по методу сил, также дающему одно уравнение:

$$\delta_{22}X_2 + \delta_{2p} = 0.$$

Окончательная эпюра моментов строится по изложенным выше способам (п. 2.5 и п. 3.4), т. е. ординаты эпюр моментов от единичных воздействий (сил и деформаций) умножаются на значения соответствующих неизвестных и полученные эпюры складываются вместе с эпюрой от внешнего воздействия.

5. Смешанный метод

В этом методе за неизвестные одновременно принимаются некоторые силы и некоторые перемещения, а основная система получается путем освобождения от одних лишних закреплений и введения других. Ниже



Фиг. 4—80

дается комплексное решение рамы (фиг. 4—80,*а*), состоящее в совместном применении смешанного метода и метода сил.

Метод сил дает четыре симметричных и два обратно симметричных, т. е. шесть неизвестных; метод деформаций 4+6=10 неизвестных. Наивыгоднейшим является здесь применение смешанного метода к симметричной нагрузке и метода сил к обратно симметричной.

1) Симметричная нагрузка (фиг. 4—80,*б*). Канонические уравнения смешанного метода:

$$\left.\begin{aligned} \delta_{11}X_1+\delta_{12}X_2+\delta_{13}\varphi_3+\delta_{1p}=0;\\ \delta_{21}X_1+\delta_{22}X_2+\delta_{23}\varphi_3+\delta_{2p}=0;\\ r_{31}X_1+r_{32}X_2+r_{33}\varphi_3+r_{3p}=0. \end{aligned}\right\} \quad (4-12)$$

где φ_3 — групповое перемещение, состоящее в одновременном повороте заделок на угол, равный единице, в противоположных направлениях.

Первые два уравнения выражают условия обращения в нуль перемещений по направлению сил X_1 и X_2, а третье — условие обращения в нуль реакций в дополнительных заделках. Дополнительный горизонтальный опорный стержень при симметричной нагрузке не работает. Коэффициенты

$$\delta_{23}=r_{32}=0,\quad \delta_{13}=-r_{31}.$$

2) *Обратно симметричная нагрузка* (фиг. 4—80,*е*). Канонические уравнения метода сил:

$$\left.\begin{aligned} \delta_{44}X_4+\delta_{45}X_5+\delta_{4p}=0;\\ \delta_{54}X_4+\delta_{55}X_5+\delta_{5p}=0. \end{aligned}\right\} \quad (4-12')$$

Окончательная эпюра моментов строится способом, аналогичным предыдущим.

6. Решения некоторых рамных систем

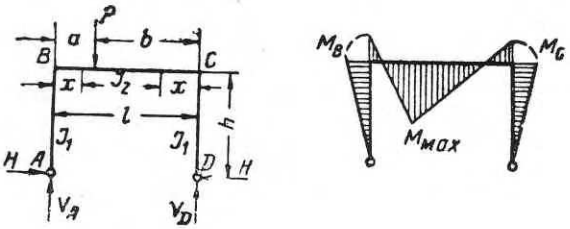
В табл. 4—3 даются формулы для расчета рамных конструкций, имеющих применение в гидротехническом строительстве.

Таблица 4—3

Решения некоторых рамных систем

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение

I. Однопролетные рамы



Фиг. 4—81

$$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l};\quad V_A=\frac{Pb}{l}$$

$$V_D=\frac{Pa}{l};\quad H=\frac{3Pab}{2hl\,(2k+3)}$$

$$M_A=M_D=0;\ M_B=M_C=-\frac{3}{2}\cdot\frac{Pab}{(2k+3)\,l}$$

Момент в любом сечении ригеля на расстоянии x от B или соответственно от C:
на участке a

$$M_x=\frac{Pb}{l}x+M_B$$

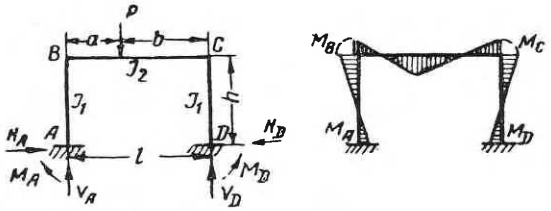
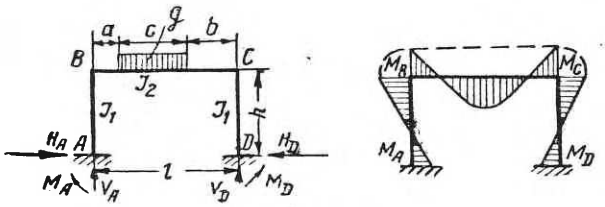
на участке b

$$M_x=\frac{Pa}{l}x+M_C$$

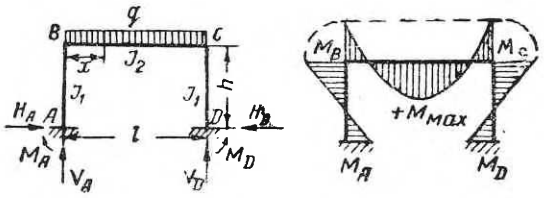
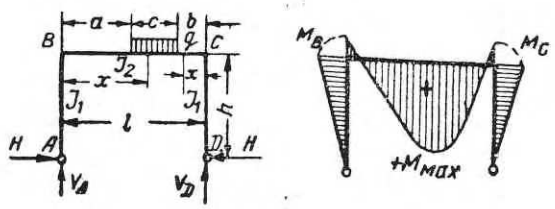
Опасное сечение при $x=a$:

$$+M_{max}=+\frac{4k+3}{2k+3}\cdot\frac{Pab}{2l}$$

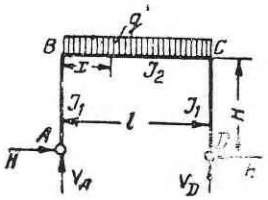
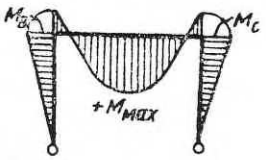
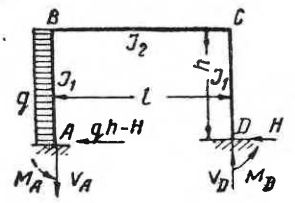
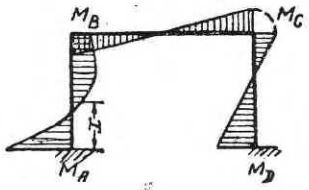
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—82*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}; \quad \delta = \frac{a}{l}$ $V_A = \frac{Pb}{l} \cdot \frac{1+\delta-2\delta^2+6k}{1+6k}$ $V_D = \frac{Pa}{l} \cdot \frac{3\delta-2\delta^2+6k}{1+6k}$ $H_A = H_D = \frac{3Pab}{2hl(2+k)}$ $M_A = \frac{Pab}{2l} \cdot \frac{5k-1+2\delta(2+k)}{(2+k)(1+6k)}$ $M_D = \frac{Pab}{2l} \cdot \frac{3+7k-2\delta(2+k)}{(2+k)(1+6k)}$ $M_B = M_A - H_A h; \; M_C = M_D - H_A h$ $M_P = M_A - H_A h + V_A a$
 *Фиг. 4—83*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}; \quad V_D = qc - V_A$ $V_A = \frac{qc}{l^3(1+6k)}\left[3abc+b^2(3l-2b)+ + c^2\left(l+b-\frac{c}{2}\right)+3l^2(2b+c)k\right]$ $H_A = H_D = \frac{qc}{4hl(2+k)}(6ab+3cl-2c^2)$ $M_A = \frac{q}{4l^2(2+k)(1+6k)}\left[6abcl+4a^2c^2+8ab^2c+ + \frac{10}{3}c^3l-c^2l^2-2c^4+(14abcl+2a^2c^2-4ab^2c- - 2c^3l+5c^2l^2-c^4)k\right]$ $M_D = \frac{q}{4l^2(2+k)(1+6k)}\left[6abcl+4b^2c^2+8a^2bc+ + \frac{10}{3}c^3l-c^2l^2-2c^4+(14abcl+2b^2c^2-4a^2bc- - 2c^3l+5c^2l^2-c^4)k\right]$ $M_B = M_A - H_A h; \; M_C = M_D - H_A h$

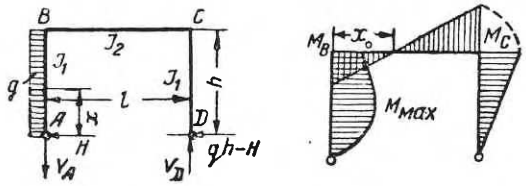
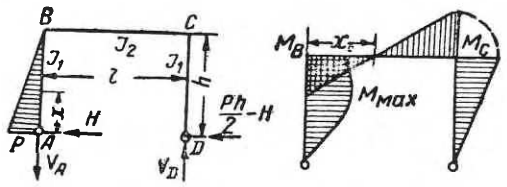
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—84*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $V_A=V_D=\frac{ql}{2}$ $H_A=H_D=\frac{ql^2}{4h(2+k)}$ $M_A=M_D=\frac{ql^2}{12(2+k)}$ $M_B=M_C=-\frac{ql^2}{6(2+k)}$ Момент в любом сечении ригеля BC на расстоянии x от B: $M_x=\frac{qx}{2}(l-x)-\frac{ql^2}{6(2+k)}$ Наибольший момент в ригеле: $+M_{max}=\frac{ql^2}{8}-\frac{ql^2}{6(2+k)}=\frac{ql^2}{24}\cdot\frac{2+3k}{2+k}$
 *Фиг. 4—85*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $V_A=\frac{qc}{2l}(2b+c)$; $V_D=\frac{qc}{2l}(2a+c)$ $H=\frac{qc(-6b^2+6bl-6bc-2c^2+3cl)}{4hl(2k+3)}$ $M_A=M_D=0$ $M_B=M_C=\frac{-qc(-6b^2+6bl-6bc-2c^2+3cl)}{4l(2k+3)}$ Момент в любом сечении ригеля: на участке a $M_x=V_A x+M_B$ (x измеряется от B) на участке c $M_x=V_A x-q\frac{(x-a)^2}{2}+M_B$ (x изменяется от B) на участке b $M_x=V_D x+M_C$ (x изменяется от C) Опасное сечение при $x=a+\frac{V_A}{q}=a+\frac{c}{2l}(2b+c)$: $+M_{max}=+\frac{qc(2b+c)}{2l}\left[a+\frac{c}{4l}(2b+c)\right]+M_B$

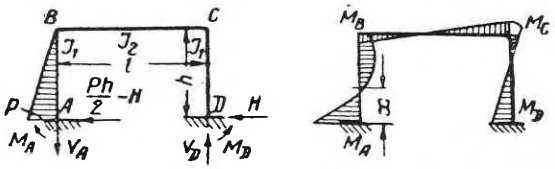
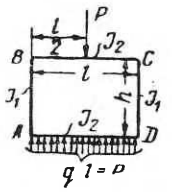
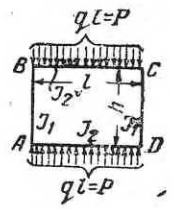
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $V_A=V_D=\frac{ql}{2}$ $H=\frac{ql^2}{4h(2k+3)}$; $M_A=M_D=0$ $M_B=M_C=-\frac{ql^2}{4(2k+3)}$ Момент в любом сечении ригеля на расстоянии x от B: $M_x=\frac{ql}{2}x-\frac{qx^2}{2}+M_B$ Опасное сечение при $x=\frac{l}{2}$: $+M_{max}=+\frac{ql^2}{8}\cdot\frac{2k+1}{2k+3}$ Момент в стойке, считая y от A или D: $M_{ст}=-\frac{y}{h}M_B$
Фиг. 4—86		
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $-V_A=V_D=\frac{qh^2k}{l(1+6k)}$ $H=\frac{qh}{8}\cdot\frac{3+2k}{2+k}$ $M_A=-\frac{qh^2}{24}\left(12-\frac{9+5k}{2+k}-\frac{12k}{1+6k}\right)$ $M_D=+\frac{qh^2}{24}\left(\frac{9+5k}{2+k}-\frac{12k}{1+6k}\right)$ Моменты в любом сечении стойки AB, на расстоянии x от A: $M_x=M_A+(qh-H)x-\frac{qx^2}{2}$ $M_B=M_A-Hh+\frac{qh^2}{2}$ $M_C=M_D-Hh$
Фиг. 4—87		

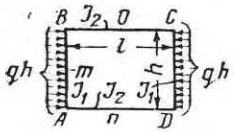
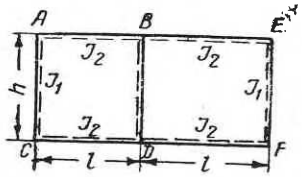
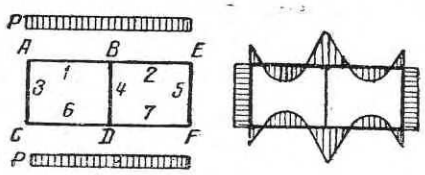
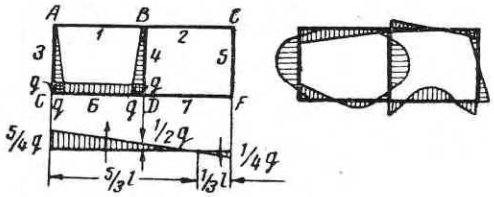
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—88*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}$; $-V_A = V_D = \frac{qh^2}{2l}$ $H = \frac{qh}{8} \cdot \frac{11k+18}{2k+3}$ Момент в любом сечении стойки AB: $M_x = Hx - \frac{qx^2}{2}$ Опасное сечение при $x = \frac{h}{8} \cdot \frac{11k+18}{2k+3}$: $+ M_{max} = \frac{q}{2}\left(\frac{h}{8} \cdot \frac{11k+18}{2k+3}\right)^2$ $M_B = + \frac{3qh^2(k+2)}{8(2k+3)}$; $M_C = -\frac{qh^2}{8} \cdot \frac{5k+6}{2k+3}$ Момент в ригеле равен нулю при $x_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{k+2}{2k+3} l$
 *Фиг. 4—89*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}$; $-V_A = V_D = \frac{ph^2}{6l}$ $H = \frac{ph}{40} \cdot \frac{31k+50}{2k+3}$ Момент в любом сечении стойки AB: $M_x = Hx - \frac{p}{6h} x^2 (3h - x)$ $M_B = + \frac{ph^2}{120} \cdot \frac{13k+30}{2k+3}$ $M_C = -\frac{ph^2}{40} \cdot \frac{9k+10}{2k+3}$ Момент в ригеле равен нулю при $x_0 = \frac{l}{20} \cdot \frac{9k+30}{2k+3}$

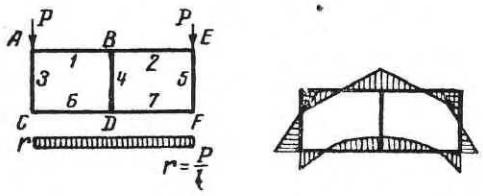
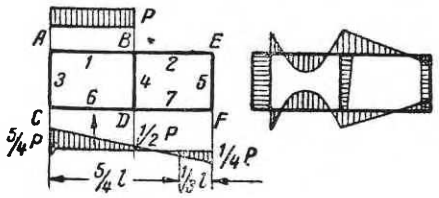
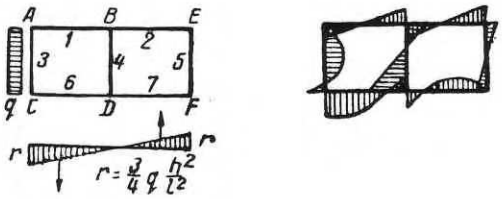
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—90*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}$; $-V_A = V_D = \frac{pkh^2}{4l(1+6k)}$ $H = \frac{ph}{40} \cdot \frac{4+3k}{2+k}$ $M_A = -\frac{ph^2}{120}\left(20 - \frac{12+7k}{2+k} - \frac{15k}{1+6k}\right)$ $M_D = +\frac{ph^2}{120}\left(\frac{12+7k}{2+k} - \frac{15k}{1+6k}\right)$ Моменты на участке AB (x измеряется от A): $M_x = M_A + \left(\frac{ph}{2} - H\right)x - \frac{px^2}{6h}(3h - x)$ $M_B = M_A - Hh + \frac{ph^2}{6}$ $M_C = M_D - Hh$
II. Замкнутые однопролетные рамы		
 *Фиг. 4—91*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}$; $H_B = \frac{1}{8} \cdot \frac{Pl}{h} \cdot \frac{1}{3+k}$ $M_0 = \frac{Pl}{24} \cdot \frac{6k^2+20k+9}{(k+3)(k+1)}$ (под силой) $M_h = M_0 = H_B h - \frac{ql^2}{8} = M_A + \frac{Pl}{8} = \frac{Pl}{24} \cdot \frac{3k^2+11k+3}{(k+3)(k+1)}$ (в середине нижнего ригеля) $M_B = M_0 - \frac{Pl}{4} = -\frac{Pl}{24} \cdot \frac{4k+9}{(k+3)(k+1)}$ $M_A = M_0 + H_B h - \frac{Pl}{4} = M_B + H_B h =$ $= -\frac{Pl}{24} \cdot \frac{k+6}{(k+3)(k+1)}$
 *Фиг. 4—92*		$k = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{h}{l}$; $H_0 = 0$ $M_0 = M_h = \frac{ql^2}{24} \cdot \frac{3k+1}{k+1}$ (в серединах верхнего и нижнего ригелей) $M_C = M_D = M_B = M_A = M_0 - \frac{ql^2}{8} =$ $= -\frac{ql^2}{12} \cdot \frac{1}{k+1}$

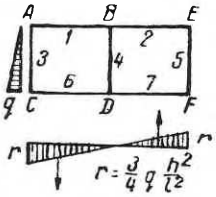
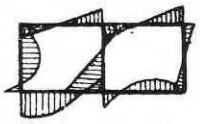
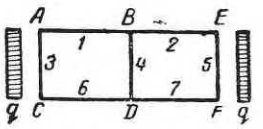
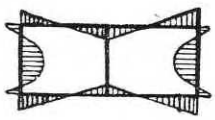
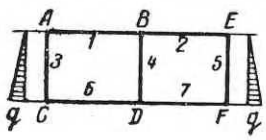
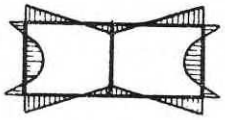
Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—93*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}\;;\;\; H_B=\frac{qh}{2}$ $M_A=M_B=M_C=M_D=M_0=M_n=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{k}{k+1}$ $M_m=M_A+\frac{qh^2}{4}=\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{2k+3}{k+1}$
III. Замкнутые двухпролетные рамы		
		
 *Фиг. 4—94*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$ $M_A=M_C=M_E=M_F=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{1}{2k+1}$ $M_{1B}=M_{2B}=M_{6D}=M_{7D}=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{3k+1}{2k+1}$ $M_{4B}=M_{4D}=0$
 *Фиг. 4—95*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}\;;\;\; m=20\,(k+2)\,(6k^2+6k+1)$ $n=\frac{10\,(k+6)\,(2k+1)}{k}\;;\;\; t=\frac{l^2}{h^2}$ $N_1=2k\,(24k^2+54k-1)-t\,(18k^2+5k+3)$ $N_2=2k\,(36k^2+66k+1)+t\,(42k^2+55k+7)$ $N_3=2k\,(24k^2+69k+29)-t\,(21k^2+8k-3)$ $N_4=2k\,(36k^2+81k+31)+t\,(39k^2+52k+13)$ $\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}>=+\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{8k+59}{n}\pm\frac{N_1}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}>=+\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{12k+61}{n}\pm\frac{N_1}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}>=+\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{7k+31}{n}\pm\frac{N_3}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}>=+\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{3k+29}{n}\pm\frac{N_4}{m}\right)$ $M_{4B}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m}\;;\;\; M_{4D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$

Продолжение табл. 4—3

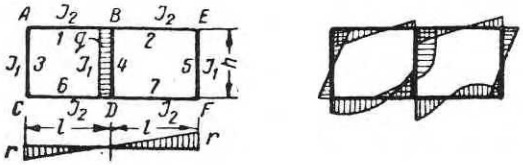
Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—96*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=24(k+6)(2k+1)$ $M_A=M_E=+Pl\frac{47k+18}{m}$ $M_{1B}=M_{2B}=-Pl\frac{15k^2+49k+18}{m}$ $M_C=M_F=-Pl\frac{49k+30}{m}$ $M_{6D}=M_{7D}=+Pl\frac{9k^2+11k+6}{m}$ $M_{4B}=M_{4D}=0$
 *Фиг. 4—97*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=20(k+2)(6k^2+6k+1)$ $N_1=138k^2+265k+43$; $N_3=81k^2+148k+37$ $N_2=78k^2+205k+33$; $N_4=21k^2+88k+27$ $\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}=-\frac{pl^2}{24}\left(\frac{1}{2k+1}\pm\frac{N_1}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}=-\frac{pl^2}{24}\left(\frac{1}{2k+1}\pm\frac{N_2}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}=-\frac{pl^2}{24}\left(\frac{3k+1}{2k+1}\pm\frac{N_3}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}=-\frac{pl^2}{24}\left(\frac{3k+1}{2k+1}\pm\frac{N_4}{m}\right)$ $M_{4B}=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m}$; $M_{4D}=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$
 *Фиг. 4—98*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=20(k+2)(6k^2+6k+1)$ $n=\frac{2k+1}{k}$ $N_1=120k^3+278k^2+335k+63$ $N_2=360k^3+742k^2+285k+27$ $N_3=120k^3+529k^2+352k+63$ $N_4=120k^3+611k^2+558k+87$ $\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}=+\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{2}{n}\pm\frac{N_1}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}=-\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{1}{n}\pm\frac{N_3}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}=-\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{2}{n}\pm\frac{N_2}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}=-\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{1}{n}\pm\frac{N_4}{m}\right)$ $M_{4B}=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m}$; $M_{4D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$

Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=20\,(k+2)\,(6k^2+6k+1)$ $n=\frac{10\,(k+6)\,(2k+1)}{k}$ $N_1=24k^3+50k^2+99k+1$ $N_2=144k^3+298k^2+109k+9$ $N_3=36k^3+169k^2+120k+21$ $N_4=36k^3+203k^2+192k+29$ $\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}\gtrless=+\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{8k+59}{n}\pm\frac{N_1}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}\gtrless=-\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{12k+61}{n}\pm\frac{N_2}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}\gtrless=-\frac{qh^2}{24}\left(-\frac{7k+31}{n}\pm\frac{N_3}{m}\right)$ $\begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}\gtrless=+\frac{qh^2}{24}\left(+\frac{3k+29}{n}\pm\frac{N_4}{m}\right)$ $M_{4B}=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m}$; $M_{4D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$
Фиг. 4—99		
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$ $M_A=M_C=M_E=M_F=-\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{k}{2k+1}$ $M_{1B}=M_{2B}=M_{6D}=M_{7D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{k}{2k+1}$ $M_{4B}=M_{4D}=0$
Фиг. 4—100		
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=\frac{20(k+6)(2k+1)}{k}$ $M_A=M_E=-\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{8k+59}{m}$ $M_C=M_F=-\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{12k+61}{m}$ $M_{1B}=M_{2B}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{7k+31}{m}$ $M_{6D}=M_{7D}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{3k+29}{m}$ $M_{4B}=M_{4D}=0$
Фиг. 4—101		

Продолжение табл. 4—9

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение



Фиг. 4—102

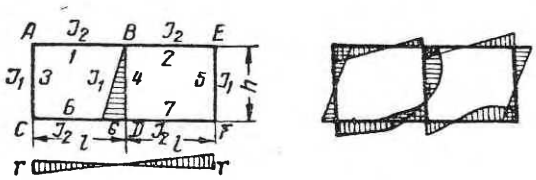
$$r=\frac{3}{4}q\frac{h^2}{l^2};\quad k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$$

$$m=20(k+2)(6k^2+6k+1)$$
$$N_1=240k^3+518k^2+335k+63$$
$$N_2=240k^3+502k^2+285k+27$$
$$N_3=229k^2+262k+63$$
$$N_4=240k^3+911k^2+678k+87$$

$$\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}=\pm\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_1}{m};\quad \begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}=\mp\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_3}{m}$$

$$\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}=\mp\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_2}{m};\quad \begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}=\pm\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_4}{m}$$

$$M_{4B}=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m};\quad M_{4D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$$



Фиг. 4—103

$$r=\frac{1}{4}q\frac{h^2}{l^2};\quad k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$$

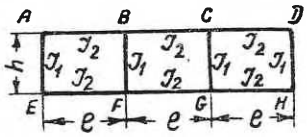
$$m=20(k+2)(6k^2+6k+1)$$
$$N_1=72k^3+158k^2+97k+21$$
$$N_2=72k^3+166k^2+107k+9$$
$$N_3=-12k^3+31k^2+62k+21$$
$$N_4=108k^3+365k^2+254k+29$$

$$\begin{matrix}M_A\\M_E\end{matrix}=\pm\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_1}{m};\quad \begin{matrix}M_{1B}\\M_{2B}\end{matrix}=\mp\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_3}{m}$$

$$\begin{matrix}M_C\\M_F\end{matrix}=\mp\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_2}{m};\quad \begin{matrix}M_{6D}\\M_{7D}\end{matrix}=\pm\frac{qh^2}{24}\cdot\frac{N_4}{m}$$

$$M_{4B}=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_3}{m};\quad M_{4D}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{N_4}{m}$$

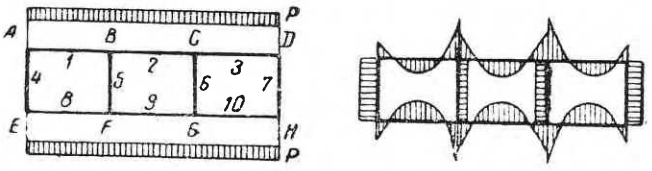
IV. Замкнутые трехпролетные рамы



Ниже даны формулы для всех угловых моментов приводимых схем, кроме среднего пролета. Угловые моменты среднего пролета определяются:

$$M_{2B}=M_{1B}-M_{5B};\quad M_{2C}=M_{3C}-M_{6C}$$

$$M_{9F}=M_{8F}-M_{5F};\quad M_{3G}=M_{10G}-M_{6G}$$



Фиг. 4—104

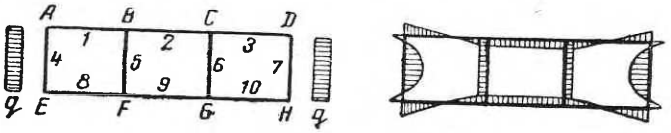
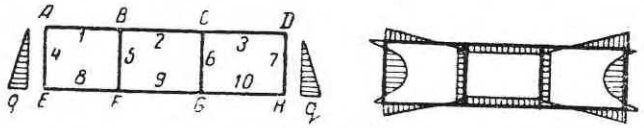
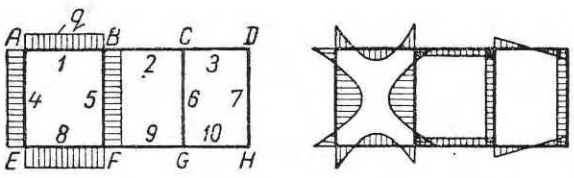
$$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l};\quad m=5k^2+5k+1$$

$$M_A=M_D=M_E=M_H=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{3k+1}{m}$$

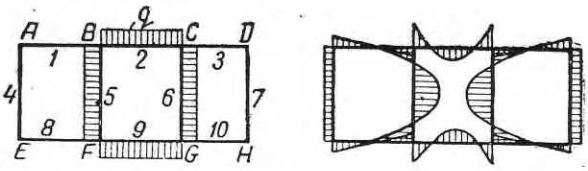
$$M_{1B}=M_{3C}=M_{8F}=M_{10G}=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{6k^2+6k+1}{m}$$

$$M_{5B}=M_{6C}=M_{5F}=M_{6G}=-\frac{pl^2}{12}\cdot\frac{k}{m}$$

Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
 *Фиг. 4—105*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=\frac{5k^2+5k+1}{k}$ $M_A=M_D=M_E=M_H=-\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{5k+2}{m}$ $M_{1B}=M_{3C}=M_{8F}=M_{10G}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{k+1}{m}$ $M_{5B}=M_{6C}=M_{5F}=M_{6G}=+\frac{qh^2}{12}\cdot\frac{1}{m}$
 *Фиг. 4—106*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $m=\frac{20(5k^2+5k+1)(k^2+12k+18)}{k}$ $M_A=M_D=-\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_1}{m}$ $M_E=M_H=-\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_2}{m}$ $M_{1B}=M_{3C}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_3}{m}$ $M_{8F}=M_{10G}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_4}{m}$ $M_{5B}=M_{6C}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_5}{m}$ $M_{5F}=M_{6G}=+\frac{qh^2}{6}\cdot\frac{N_6}{m}$ $N_1=20k^3+290k^2+554k+117$ $N_2=30k^3+330k^2+586k+183$ $N_3=10k^3+85k^2+166k+93$ $N_4=45k^2+134k+87$ $N_5=20k^2+75k+93$ $N_6=-10k^2+45k+87$
 *Фиг. 4—107*		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $n=5k^2+5k+1$; $m=9k^2+7k+1$ $\left.\begin{matrix}M_A=M_E\\M_D=M_H\end{matrix}\right\rangle=-\frac{q}{24}\left[\frac{l^2(4k+1)+h^2k(5k+1)}{n}\pm\right.$ $\left.\pm\frac{l^2(6k+1)+h^2k(9k+1)}{m}\right]$ $\left.\begin{matrix}M_{1B}=M_{8F}\\M_{3C}=M_{10G}\end{matrix}\right\rangle=-\frac{q}{24}\left[\frac{l^2(3k+1)(k+1)+h^2k(2k+1)}{n}\pm\right.$ $\left.\pm\frac{l^2(9k^2+6k+1)+h^2k}{m}\right]$ $\left.\begin{matrix}M_{5B}=M_{5F}\\M_{6C}=M_{6G}\end{matrix}\right\rangle=-\frac{q}{24}\left[\frac{l^2(3k+1)+h^2k(5k+2)}{n}\pm\right.$ $\left.\pm\frac{l^2(6k^2+5k+1)+h^2k(3k+2)}{m}\right]$ $\left.\begin{matrix}M_{2B}=M_{9F}\\M_{3C}=M_{9G}\end{matrix}\right\rangle=-\frac{q}{24}(l^2-h^2)k(3k+1)\left(\frac{1}{n}\pm\frac{1}{m}\right)$

Продолжение табл. 4—3

Схема рамы и воздействия на нее	Эпюры изгибающих моментов	Решение
		$k=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{h}{l}$; $n=5k^2+5k+1$ $M_A=M_E=M_D=M_H=-\frac{qk}{12}\cdot\frac{l^2-h^2}{n}$ $M_{1B}=M_{3C}=M_{8F}=M_{10G}=+\frac{qk}{12}\cdot\frac{(l^2-h^2)(3k+2)}{n}$ $M_{5B}=M_{6C}=M_{5F}=M_{6G}=$ $=-\frac{q}{12}\cdot\frac{h^2k(5k+3)+l^2(2k+1)}{n}$ $M_{2B}=M_{2C}=M_{9F}=M_{9G}=$ $=-\frac{q}{12}\cdot\frac{l^2(3k+1)(k+1)+h^2k(2k+1)}{n}$

Фиг. 4—108

4—3. ПЛИТЫ

1. Общие сведения

Исследование деформаций и напряжений плит построено на предпосылках и выводах теории упругости. Они могут быть даны в упрощенной форме для плиты, толщина которой незначительна по сравнению с остальными ее размерами. Если предположить, что прогибы плиты h, то горизонтальные смещения точек средней плоскости можно принять равными нулю.

Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении плиты σ_x и σ_y принимается по линейному закону.

Дифференциальное уравнение плиты имеет вид:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=\frac{p}{D}, \qquad (4—13)$$

где p — нагрузка;

D — цилиндрическая жесткость плиты, определяемая по (4—17).

Интегрирование этого уравнения (часто при помощи рядов Фурье) дает уравнение прогиба плиты. Если найдена функция w прогибов плиты, то можно определить моменты M_x, M_y, M_{xy} для подбора сечений плиты или проверки ее прочности из выражений:

$$M_x=\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}}\sigma_x z\,dz=-D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right); \qquad (4—14)$$

$$M_y=\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}}\sigma_y z\,dz=-D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right); \qquad (4—15)$$

$$M_{xy}=\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}}\tau_{xy} z\,dz=-(1-\mu)D\frac{\partial^2 w}{\partial x\,\partial y}, \qquad (4—16)$$

где

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}; \qquad (4—17)$$

z — расстояние от средней плоскости плиты до какого-либо волокна;

h — толщина плиты;

μ — коэффициент Пуассона;

σ_x, σ_y, τ_{xy} — нормальные и касательные напряжения;

E — модуль упругости материала плиты.

Приведенные формулы даны при расположении плоскости OXY в средней плоскости плиты.

2. Прямоугольные плиты

Точные решения для прямоугольных плит даны акад. Б. Г. Галеркиным и сведены в табл. 4—4, которая приведена ниже.

В таблице приняты следующие обозначения:

a и b — ширина и длина плиты;

h — толщина ее;

w — прогиб плиты;

M_y — изгибающий момент относительно оси, параллельной оси y, при котором нормальные напряжения направлены параллельно оси x;

M_x — изгибающий момент для направления напряжений параллельно оси y;

Q_x — реакция опоры, параллельной оси y, на единицу длины;

Q_y — реакция опоры, параллельной оси x, на единицу длины;

Q_0 — реакция в угловой точке плиты, сосредоточенная сила, направленная вниз;

V_{xz} и V_{yz} — поперечные силы в плоскостях xz и yz;

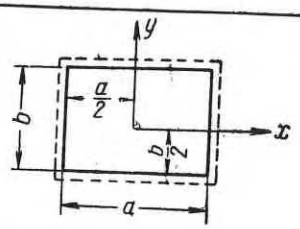
E — модуль упругости материала плиты;

μ — коэффициент Пуассона, принятый равным 0,25;

p — нагрузка на 1 $м^2$ плиты.

Расчетные схемы плит приведены для каждого случая.

Таблица 4—4



Фиг. 4—109

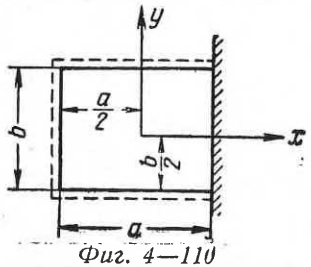
Случай 1. Плита, свободно опертая всеми краями, под равномерно распределенной нагрузкой

$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$															Добавочный множитель
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	3	4	5	∞	
Прогибы w в точках:																
$x=0;\ y=0$	0,0457	0,0546	0,0635	0,0718	0,0793	0,0868	0,0934	0,0991	0,1047	0,1096	0,1139	0,1376	0,1442	0,1459	0,1465	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
$x=0;\ y=\frac{b}{4}$	0,0329	0,0396	0,0464	0,0527	0,0587	0,0644	0,0698	0,0748	0,0792	0,0839	0,0869	0,1156	0,1301	0,1452	0,1465	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
$x=\frac{a}{4};\ y=0$	0,0329	0,0395	0,0457	0,0516	0,0571	0,0622	0,0669	0,0710	0,0749	0,0783	0,0814	0,0981	0,1028	0,1040	0,1044	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y:																
$x=0;\ y=0$	0,0460	0,0535	0,0609	0,0677	0,0738	0,0798	0,0849	0,0896	0,0938	0,0975	0,1008	0,1186	0,1234	0,1246	0,1250	pa^2
$x=0;\ y=\frac{b}{4}$	0,0340	0,0399	0,0456	0,0508	0,0557	0,0606	0,0650	0 0692	0,0726	0,0763	0,0795	0,1016	0,1128	0,1187	0,1250	pa^2
$x=\frac{a}{4};\ y=0$	0,0378	0,0432	0,0484	0,0532	0,0577	0,0617	0,0654	0,0687	0,0717	0,0743	0,0766	0,0892	0,0926	0,0935	0,0937	pa^2
Изгибающий момент M_x:																
$x=0;\ y=0$	0,0460	0,0472	0,0475	0,0474	0,0472	0,0462	0,0454	0,0444	0,0436	0,0425	0,0415	0,0345	0,0322	0,0315	0,0312	pa^2
$x=0;\ y=\frac{b}{4}$	0,0378	0,0395	0,0403	0,0411	0,0417	0,0420	0,0421	0,0422	0,0423	0,0420	0,0419	0,0392	0,0365	0,0344	0,0312	pa^2
$x=\frac{a}{4};\ y=0$	0,0340	0,0347	0,0349	0,0349	0,0345	0,0340	0,0334	0,0328	0,0321	0,0314	0,0307	0,0259	0,0242	0,0236	0,0234	pa^2
Поперечная сила V_{xz}:																
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,338	0,360	0,380	0, 397	0,411	0,424	0,435	0,444	0,452	0,459	0,465	0,493	0,498	0,500	0,500	pa
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{4}$	0,281	0,302	0,320	0, 336	0,350	0,363	0,376	0,386	0,395	0,404	0,412	0,461	0,482	0,492	0,500	pa
Поперечная сила V_{yz}:																
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0,338	0,315	0,294	0, 275	0,258	0,242	0,228	0,216	0,205	0,194	0,185	0,124	0,093	0,074	—	pb
$x=\frac{a}{4};\ y=\frac{b}{2}$	0,281	0,261	0,243	0, 227	0,213	0,200	0,188	0,178	0,168	0,160	0,152	0,102	0,076	0,061	—	pb

Продолжение табл. 4—4

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$															Добавочный множитель
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	3	4	5	∞	
Опорная реакция Q_x:																
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,426	0,445	0,460	0,473	0,483	0,490	0,495	0,500	0,502	0,505	0,506	0,506	0,502	0,501	0,500	pa
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{4}$	0,360	0,380	0,396	0,410	0,423	0,433	0,442	0,450	0,457	0,463	0,468	0,496	0,503	0,505	0,500	pa
Опорная реакция Q_y:																
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0,426	0,405	0,383	0,363	0,343	0,325	0,308	0,292	0,278	0,265	0,252	0,170	0,127	0,102	—	pb
$x=\frac{a}{4};\ y=\frac{b}{2}$	0,360	0,339	0,320	0,301	0,284	0,269	0,255	0,241	0,229	0,218	0,209	0,140	0,105	0,084	—	pb
Опорная реакция Q_0	−0,070	−0,069	−0,068	−0,066	−0,064	−0,061	−0,059	−0,056	−0,054	−0,052	−0,049	−0,034	−0,025	−0,020	—	pab



Фиг. 4—110

Случай 2. Плита, одним краем заделанная и тремя свободно опертая, под равномерно распределенной нагрузкой

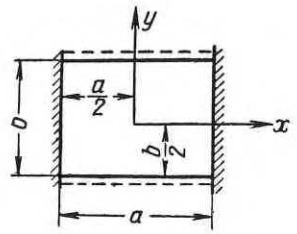
$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$							Добавочный множитель	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$							Добавочный множитель
	0	1:2	1:1,5	1:1,4	1:1,3	1:1,2	1:1,1	1,0		1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	∞	
Прогиб w в центре:																	
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$.	0,059	0,054	0,048	0,045	0,043	0,039	0,036	0,031	$\frac{pa^4}{Eh^3}$	0,040	0,048	0,056	0,065	0,072	0,104	0,146	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y:																	
$x=0;\ y=0$.	0,062	0,059	0,054	0,051	0,049	0,046	0,042	0,038	pa^2	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045	0,042	0,031	pb^2
$x=\frac{a}{2};\ y=0$.	−0,125	−0,122	−0,111	−0,108	−0,103	−0,098	−0,091	−0,084	pa^2	−0,092	−0,098	−0,104	−0,109	−0,112	−0,122	−0,125	pb^2
Изгибающий момент M_x:																	
$x=0;\ y=0$.	0,016	0,020	0,026	0,028	0,029	0,030	0,031	0,032	pa^2	0,040	0,047	0,055	0,061	0,068	0,093	0,125	pb^2
$x=\frac{a}{2};\ y=0$ . . .	−0,031	−0,031	−0,028	−0,027	−0,026	−0,024	−0,023	−0,021	pa^2	−0,023	−0,025	−0,026	−0,027	−0,028	−0,031	−0,031	pb^2

Продолжение табл. 4—4

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$								Добавочный множитель	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$							Добавочный множитель
	0	1:2	1:1,5	1:1,4	1:1,3	1:1,2	1:1,1	1,0		1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	∞	
Поперечная сила V_{xz}:																	
$x = -\frac{a}{2}$; $y = 0$ . .	0,375	0,371	0,361	0,355	0,348	0,340	0,328	0,313	pa	0,297	0,282	0,266	0,252	0,238	0,184	—	pa
$x = \frac{a}{2}$; $y = 0$ . .	0,625	0,644	0,633	0,628	0,622	0,612	0,598	0,581	pa	0,558	0,536	0,510	0,486	0,463	0,365	—	pa
Поперечная сила V_{yz}:																	
$x = 0$; $y = \frac{b}{2}$ . .	0	0,140	0,188	0,202	0,218	0,236	0,258	0,282	pb	0,308	0,331	0,353	0,372	0,389	0,448	0,500	pb
$x = \frac{a}{2}$; $y = \frac{b}{2}$ . .	0	−0,194	−0,261	−0,278	−0,299	−0,320	−0,345	−0,371	pb	−0,396	−0,417	−0,434	−0,451	−0,460	−0,489	−0,500	pb
Опорная реакция Q_x:																	
$x = -\frac{a}{2}$; $y = 0$.	0,375	0,389	0,400	0,400	0,399	0,397	0,391	0,383	pa	0,371	0,358	0,344	0,329	0,315	0,250	—	pa
$x = \frac{a}{2}$; $y = 0$ . . .	0,625	0,644	0,633	0,628	0,622	0,612	0,598	0,581	pa	0,558	0,536	0,510	0,486	0,463	0,365	—	pa
Опорная реакция Q_y:																	
$x = 0$; $y = \frac{b}{2}$ . . .	0	0,185	0,249	0,266	0,286	0,308	0,333	0,360	pb	0,376	0,391	0,404	0,417	0,434	0,466	0,500	pb
$x = \frac{a}{2}$; $y = \frac{b}{2}$.	0	−0,340	−0,456	−0,487	−0,523	−0,560	−0,603	−0,650	pb	−0,692	−0,729	−0,760	−0,789	−0,804	−0,856	−0,875	pb
Опорная реакция Q_0																	
$x = -\frac{a}{2}$; $y = -\frac{b}{2}$	—	−0,034	−0,042	−0,046	−0,050	−0,052	−0,055	−0,057	pba	−0,058	−0,060	−0,059	−0,059	−0,057	−0,049	—	pba

Продолжение табл. 4—4



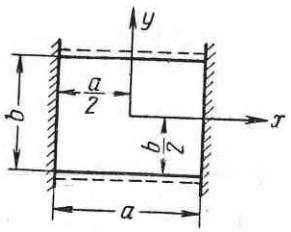
Фиг. 4-111

Случай 3. Плита, двумя краями заделанная и двумя краями свободно опертая, под равномерно распределенной нагрузкой

$\mu = 0{,}25$,

$a < b$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$								Добавочный множитель
	∞	2	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	
Прогиб w в центре:									
$x=0;\ y=0$	0,0293	0,0293	0,0278	0,0270	0,0262	0,0250	0,0235	0,0220	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y:									
$x=0;\ y=0$	0,0417	0,0420	0,0403	0,0395	0,0383	0,0369	0,0349	0,0325	pa^2
$x=\pm\frac{a}{2};\ y=0$	−0,0833	−0,0842	−0,0829	−0,0808	−0,0793	−0,0770	−0,0739	−0,0698	pa^2
Изгибающий момент M_x:									
$x=0;\ y=0$	0,0104	0,0121	0,0152	0,0170	0,0184	0,0199	0,0214	0,0230	pa^2
Поперечная сила V_{xz}:									
$x=\frac{a}{b};\ y=0$	0,500	0,511	0,524	0,525	0,527	0,526	0,523	0,516	pa
Поперечная сила V_{yz}:									
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0	0,119	0,160	0,171	0,185	0,202	0,221	0,214	pb
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,164	−0,219	−0,235	−0,253	−0,275	−0,299	−0,327	pb
Опорная реакция Q_y:									
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0	0,156	0,209	0,224	0,242	0,263	0,287	0,315	pb
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,287	−0,384	−0,411	−0,444	−0,480	−0,523	−0,571	pb



Фиг. 4 -112

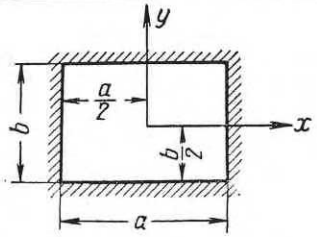
Случай 4. Плита, двумя краями заделанная и двумя краями свободно опертая, под равномерно распределенной нагрузкой

$\mu=0,25$

$a>b$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$															Добавочный множитель
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	3	4	5	∞	
Прогиб w в центре	0,0220	0,0284	0,0359	0,0438	0,0519	0,0599	0,0677	0,0752	0,0823	0,0889	0,1017	0,1314	0,1425	0,1455	0,1465	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y в центре	0,0325	0,0359	0,0387	0,0409	0,0425	0,0435	0,0441	0,0443	0,0442	0,0439	0,0434	0,0365	0,0329	0,0324	0,0312	pb^2
Изгибающий момент M_x в центре	0,0230	0,0293	0,0361	0,0431	0,0501	0,0569	0,0635	0,0697	0,0755	0,0808	0,0857	0,1139	0,1221	0,1243	0,1250	pb^2
Изгибающий момент M_y в центре опоры	−0,0698	−0,0788	−0,0868	−0,0938	−0,0998	−0,1049	−0,1090	−0,1124	−0,1152	−0,1173	−0,1191	−0,1246	−0,1250	−0,1250	−0,1250	pb^2
Поперечная сила V_{xz}:																
$x=\frac{a}{b}$; $y=0$	0,516	0,506	0,492	0,477	0,461	0,444	0,426	0,409	0,392	0,376	0,360	0,247	0,188	0,148	—	pa
Поперечная сила V_{yz}:																
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$	0,244	0,270	0,294	0,318	0,339	0,359	0,378	0,394	0,408	0,421	0,432	0,485	0,497	0,499	0,500	pb
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$	−0,327	−0,355	−0,380	−0,402	−0,421	−0,437	−0,450	−0,461	−0,469	−0,476	−0,481	−0,499	−0,500	−0,500	−0,500	pb
Опорная реакция Q_y:																
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$	0,315	0,344	0,370	0,394	0,415	0,433	0,449	0,461	0,472	0,480	0,487	0,506	0,505	0,501	0,500	pb
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$	−0,571	−0,621	−0,665	−0,703	−0,736	−0,764	−0,787	−0,806	−0,821	−0,833	−0,842	−0,873	−0,875	−0,875	−0,875	pb

Продолжение табл. 4—4

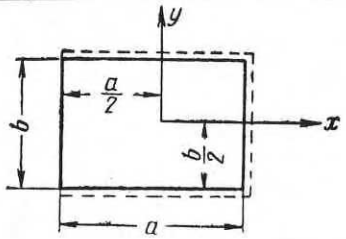


Фиг. 4—113

Случай 5. Плита, заделанная всеми краями, под равномерно распределенной нагрузкой

$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$						Добавочный множитель
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
Прогиб w в точке: $x=0;\ y=0$	0,0143	0,0170	0,0200	0,0216	0,0234	0,0248	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y: $x=0;\ y=0$	0,0220	0,0258	0,0293	0,0321	0,0344	0,0363	pa^2
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	−0,0517	−0,0554	−0,0612	−0,0668	−0,0714	−0,0753	pa^2
Изгибающий момент M_x: $x=0;\ y=0$	0,0220	0,0223	0,0219	0,0210	0,0199	0,0187	pa^2
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	−0,0517	−0,0491	−0,0504	−0,0508	−0,0511	−0,0515	pa^2
Поперечная сила V_{xz}: $x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,452	0,448	0,471	0,491	0,505	0,517	pa
Поперечная сила V_{yz}: $x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0,452	0,412	0,381	0,352	0,327	0,305	pb



Фиг. 4—114

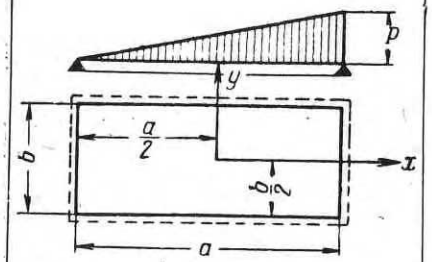
Случай 6. Плита, свободно опертая тремя краями, под равномерно распределенной нагрузкой

$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$															Добавочный множитель
	1:2	1:1,5	1:1,4	1:1,3	1:1,2	1:1,1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	3	∞	
Прогиб w в точках: $x=0;\ y=0$	0,0414	0,0598	0,0646	0,0699	0,0756	0,0820	0,0885	0,0951	0,1010	0,1061	0,1107	0,1148	0,1293	0,1417	0,1465	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x=-\frac{a}{2}\ y=0$	0,0735	0,1040	0,1106	0,1176	0,1249	0,1326	0,1390	0,1451	0,1498	0,1534	0,1563	0,1585	0,1636	0,1652	0,1653	$\frac{pb^4}{Eh^3}$

Продолжение табл. 4—4

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$															Добавочный множитель
	1:2	1:1,5	1:1,4	1:1,3	1:1,2	1:1,1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	3	∞	
Изгибающий момент M_x:																
$x=0;\ y=0$ . . .	0,0370	0,0536	0,0578	0,0625	0,0675	0,0731	0,0787	0,0842	0,0892	0,0935	0,0973	0,1006	0,1121	0,1215	0,1250	pb^2
$x=-\frac{a}{2};\ y=0$ . .	0,0589	0,0819	0,0873	0,0930	0,0992	0,1054	0,1106	0,1157	0,1196	0,1225	0,1249	0,1267	0,1309	0,1322	0,1322	pb^2
Изгибающий момент M_y:																
$x=0;\ y=0$ . . .	0,0218	0,0286	0,0306	0,0322	0,0336	0,0350	0,0362	0,0373	0,0376	0,0378	0,0378	0,0377	0,0361	0,0330	0,0312	pb^2
Поперечная сила V_{xz}:																
$x=\frac{a}{2};\ y=0$, . .	0,300	0,336	0,343	0,349	0,354	0,359	0,362	0,365	0,367	0,368	0,369	0,370	0,371	0,371	0,371	pb
$x=-\frac{a}{2};\ y=0.$	0,088	0,088	0,087	0,085	0,083	0,080	0,077	0,073	0,070	0,068	0,066	0,064	0,059	0,057	0,057	pb
Поперечная сила V_{yz}:																
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$ . .	0,249	0,312	0,327	0,343	0,360	0,378	0,396	0,412	0,426	0,437	0,447	0,455	0,480	0,496	0,500	pb
$x=-\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$.	0,237	0,296	0,310	0,325	0,340	0,356	0,369	0,381	0,391	0,399	0,405	0,409	0,420	0,423	0,423	pb
Опорная реакция Q_x:																
$x=\frac{a}{2};\ y=0$ . . .	0,404	0,458	0,467	0,476	0,483	0,488	0,496	0,501	0,503	0,506	0,507	0,508	0,510	0,510	0,510	pb
Опорная реакция Q_y:																
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$ . .	0,338	0,384	0,395	0,405	0,416	0,427	0,438	0,448	0,456	0,463	0,469	0,473	0,488	0,498	0,500	pb
$x=-\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$.	0,177	0,222	0,233	0,243	0,255	0,267	0,277	0,286	0,293	0,299	0,303	0,307	0,315	0,317	0,317	pb
Опорная реакция Q_0:																
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$ . .	−0,080	−0,090	−0,092	−0,093	−0,095	−0,097	−0,098	−0,099	−0,100	−0,101	−0,101	−0,101	−0,102	−0,102	−0,102	pb^2
$x=-\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$.	0,061	0,062	0,061	0,059	0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,049	0,047	0,046	0,043	0,042	0,042	pb^2



Фиг. 4—115

Случай 7. Плита, свободно опертая всеми краями, под нагрузкой, распределенной по закону треугольника

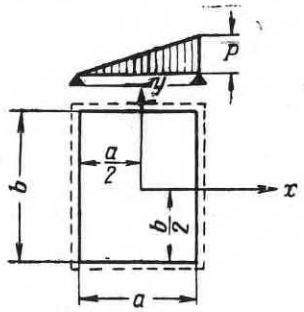
$\mu = 0{,}25$,

$a > b$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$															Дэбавочный множитель
	∞	5	4	3	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	
Прогибы w в точках:																
$x = -\frac{a}{4}$; $y = 0$	0,0366	0,0366	0,0366	0,0360	0,0325	0,0316	0,0304	0,0294	0,0280	0,0263	0,0245	0,0224	0,0201	0,0172	0,0147	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x = 0$; $y = 0$	0,0732	0,0729	0,0721	0,0688	0,0569	0,0548	0,0523	0,0497	0,0467	0,0434	0,0397	0,0359	0,0317	0,0273	0,0228	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x = \frac{a}{10}$; $y = 0$	0,0879	0,0875	0,0845	0,0709	0,0610	0,0583	0,0552	0,0521	0,0486	0,0449	0,0409	0,0366	0,0321	0,0276	0,0227	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x = \frac{a}{4}$; $y = 0$	0,1099	0,1086	0,0935	0,0796	0,0553	0,0523	0,0488	0,0454	0,0418	0,0381	0,0342	0,0303	0,0263	0,0224	0,0182	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y:																
$x = -\frac{a}{4}$; $y = 0$	0,0078	0,0078	0,0078	0,0081	0,0094	0,0097	0,0102	0,0104	0,0108	0,0112	0,0116	0,0119	0,0122	0,0127	0,0126	pb^2
$x = 0$; $y = 0$	0,0156	0,0157	0,0161	0,0172	0,0207	0,0212	0,0218	0,0222	0,0227	0,0231	0,0236	0,0237	0,0238	0,0236	0,0230	pb^2
$x = \frac{a}{10}$; $y = 0$	0,0187	0,0193	0,0201	0,0223	0,0260	0,0264	0,0268	0,0271	0,0273	0,0275	0,0275	0,0274	0,0272	0,0265	0,0255	pb^2
$x = \frac{a}{4}$; $y = 0$	0,0234	0,0265	0,0286	0,0312	0,0325	0,0323	0,0321	0,0318	0,0314	0,0308	0,0301	0,0292	0,0281	0,0268	0,0252	pb^2
Изгибающий момент M_x:																
$x = -\frac{a}{4}$; $y = 0$	0,0312	0,0312	0,0312	0,0309	0,0282	0,0276	0,0267	0,0259	0,0249	0,0236	0,0221	0,0206	0,0188	0,0165	0,0144	pb^2
$x = 0$; $y = 0$	0,0625	0,0623	0,0617	0,0593	0,0504	0,0487	0,0469	0,0448	0,0424	0,0399	0,0369	0,0338	0,0304	0,0267	0,0230	pb^2
$x = \frac{a}{10}$; $y = 0$	0,0750	0,0742	0,0726	0,0676	0,0547	0,0526	0,0502	0,0477	0,0449	0,0419	0,0386	0,0351	0,0313	0,0275	0,0235	pb^2
$x = \frac{a}{4}$; $y = 0$	0,0937	0,0875	0,0816	0,0708	0,0513	0,0487	0,0459	0,0432	0,0401	0,0369	0,0337	0,0303	0,0268	0,0234	0,0196	pb^2

Продолжение табл. 4—4

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$															Добавочный множитель
	∞	5	4	3	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	
Поперечная сила V_{xz}:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=0$ . .	—	0,005	0,008	0,014	0,031	0,033	0,037	0,041	0,045	0,051	0,057	0,063	0,071	0,080	0,090	pb
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$.	—	0,004	0,006	0,010	0,023	0,025	0,028	0,031	0,034	0,038	0,043	0,048	0,054	0,061	0,069	pb
$x=\frac{a}{2}$; $y=0$ . . .	—	0,069	0,085	0,110	0,154	0,161	0,168	0,175	0,183	0,192	0,201	0,212	0,223	0,235	0,248	pb
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$ . .	—	0,057	0,070	0,091	0,129	0,134	0,140	0,147	0,154	0,162	0,170	0,179	0,189	0,200	0,212	pb
Поперечная сила V_{yz}:																
$x=-\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$.	0,125	0,125	0,125	0,125	0,122	0,121	0,119	0,118	0,116	0,114	0,112	0,109	0,105	0,100	0,095	pb
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,250	0,250	0,249	0,246	0,232	0,229	0,226	0,222	0,217	0,212	0,205	0,198	0,190	0,180	0,169	pb
$x=\frac{a}{10}$; $y=\frac{b}{2}$ . . .	0,300	0,299	0,297	0,292	0,267	0,263	0,258	0,252	0,246	0,238	0,230	0,221	0,211	0,199	0,186	pb
$x=\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$ . . .	—	0,367	0,358	0,337	0,290	0,283	0,275	0,268	0,259	0,249	0,239	0,227	0,215	0,202	0,187	pb
Опорная реакция Q_x:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=0$ . .	—	0,009	0,014	0,024	0,052	0,057	0,062	0,068	0,075	0,082	0,090	0,099	0,108	0,119	0,129	pa
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$.	—	0,007	0,010	0,018	0,039	0,043	0,047	0,051	0,056	0,062	0,068	0,075	0,083	0,092	0,101	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	—	0,093	0,114	0,146	0,200	0,208	0,216	0,224	0,233	0,243	0,253	0,264	0,275	0,286	0,297	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=0$ . .	—	0,077	0,095	0,121	0,169	0,175	0,182	0,190	0,198	0,207	0,216	0,226	0,236	0,247	0,259	pa
Опорная реакция Q_y:																
$x=-\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$.	0,125	0,125	0,125	0,126	0,127	0,128	0,128	0,128	0,128	0,127	0,127	0,126	0,124	0,122	0,117	pb
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$ . . .	0,250	0,250	0,251	0,253	0,253	0,252	0,251	0,250	0,247	0,245	0,241	0,236	0,230	0,222	0,213	pb
$x=\frac{a}{10}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,300	0,301	0,302	0,305	0,298	0,296	0,293	0,290	0,286	0,282	0,276	0,269	0,260	0,250	0,237	pb
$x=\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,375	0,380	0,378	0,370	0,341	0,335	0,329	0,322	0,314	0,306	0,296	0,284	0,272	0,259	0,243	pb
Опорная реакция Q_0:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$.	0	−0,002	−0,004	−0,007	−0,014	−0,015	−0,017	−0,018	−0,020	−0,021	−0,023	−0,025	−0,026	−0,027	−0,028	pab
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	—	−0,018	−0,021	−0,027	−0,035	−0,036	−0,037	−0,038	−0,039	−0,040	−0,041	−0,042	−0,042	−0,042	−0,042	pab



Фиг. 4—116

Случай 8. Плита, свободно опертая всеми краями, под нагрузкой, распределенной по закону треугольника

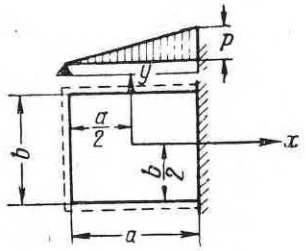
$\mu = 0{,}25$

$a < b$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$															Добавочный множитель
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	3	4	5	∞	
Прогибы w в точках:																
$x = -\frac{a}{4};\ y = 0$	0,0147	0,0179	0,0209	0,0238	0,0265	0,0290	0,0313	0,0333	0,0352	0,0369	0,0384	0,0468	0,0491	0,0497	0,0499	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
$x = 0;\ y = 0$	0,0228	0,0273	0,0317	0,0359	0,0397	0,0434	0,0467	0,0497	0,0523	0,0548	0,0569	0,0688	0,0721	0,0729	0,0732	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
$x = \frac{a}{10};\ y = 0$	0,0227	0,0272	0,0314	0,0354	0,0392	0,0426	0,0458	0,0486	0,0512	0,0535	0,0555	0,0667	0,0700	0,0708	0,0710	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
$x = \frac{a}{4};\ y = 0$	0,0182	0,0216	0,0248	0,0279	0,0307	0,0333	0,0357	0,0377	0,0397	0,0414	0,0429	0,0513	0,0537	0,0543	0,0545	$\frac{pa^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y:																
$x = -\frac{a}{4};\ y = 0$	0,0126	0,0150	0,0173	0,0195	0,0216	0,0235	0,0251	0,0268	0,0282	0,0295	0,0306	0,0368	0,0385	0,0389	0,0391	pa^2
$x = 0;\ y = 0$	0,0230	0,0267	0,0304	0,0338	0,0369	0,0399	0,0424	0,0448	0,0469	0,0487	0,0504	0,0593	0,0617	0,0623	0,0625	pa^2
$x = \frac{a}{10};\ y = 0$	0,0255	0,0293	0,0330	0,0364	0,0394	0,0422	0,0448	0,0470	0,0490	0,0508	0,0524	0,0609	0,0632	0,0638	0,0640	pa^2
$x = \frac{a}{4};\ y = 0$	0,0252	0,0283	0,0311	0,0338	0,0362	0,0383	0,0403	0,0419	0,0435	0,0448	0,0460	0,0524	0,0541	0,0545	0,0547	pa^2
Изгибающий момент M_x:																
$x = -\frac{a}{4};\ y = 0$	0,0144	0,0149	0,0151	0,0151	0,0150	0,0148	0,0146	0,0143	0,0140	0,0137	0,0133	0,0110	0,0101	0,0099	0,0098	pa^2
$x = 0;\ y = 0$	0,0260	0,0236	0,0237	0,0237	0,0236	0,0231	0,0227	0,0222	0,0218	0,0212	0,0207	0,0172	0,0161	0,0157	0,0156	pa^2
$x = \frac{a}{10};\ y = 0$	0,0235	0,0239	0,0240	0,0239	0,0236	0,0232	0,0228	0,0224	0,0219	0,0214	0,0209	0,0177	0,0165	0,0161	0,0160	pa^2
$x = \frac{a}{4};\ y = 0$	0,0196	0,0198	0,0199	0,0197	0,0194	0,0192	0,0188	0,0185	0,0181	0,0177	0,0174	0,0149	0,0140	0,0138	0,0137	pa^2

Продолжение табл. 4—4

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{b}{a}$															Добавочный множитель
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	3	4	5	∞	
Поперечная сила V_{xz}:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=0$ . .	0,090	0,100	0,109	0,117	0,124	0,130	0,135	0,139	0,143	0,146	0,149	0,163	0,166	0,167	0,167	pa
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$ . .	0,069	0,077	0,085	0,091	0,098	0,103	0,109	0,113	0,117	0,121	0,125	0,148	0,158	0,163	0,167	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=0$ . . .	0,248	0,260	0,271	0,280	0,288	0,294	0,300	0,305	0,309	0,313	0,316	0,330	0,332	0,333	0,333	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$ . .	0,212	0,224	0,235	0,244	0,253	0,260	0,267	0,273	0,278	0,283	0,287	0,313	0,324	0,329	0,333	pa
Поперечная сила V_{yz}:																
$x=-\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$.	0,095	0,089	0,083	0,078	0,073	0,069	0,065	0,062	0,058	0,055	0,053	0,035	0,027	0,021	—	pb
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$ . . .	0,169	0,157	0,147	0,137	0,129	0,121	0,114	0,108	0,102	0,097	0,092	0,062	0,046	0,037	—	pb
$x=\frac{a}{10}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,186	0,173	0,161	0,151	0,141	0,133	0,125	0,118	0,112	0,106	0,101	0,067	0,051	0,040	—	pb
$x=\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,187	0,173	0,160	0,149	0,139	0,131	0,123	0,116	0,110	0,104	0,099	0,066	0,050	0,040	—	pb
Опорная реакция Q_x:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=0$ . .	0,129	0,138	0,146	0,152	0,157	0,161	0,164	0,166	0,167	0,169	0,169	0,169	0,168	0,167	0,167	pa
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$.	0,101	0,110	0,117	0,123	0,128	0,134	0,138	0,142	0,145	0,148	0,150	0,164	0,168	0,169	0,167	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=0$, . .	0,297	0,307	0,315	0,321	0,325	0,329	0,332	0,334	0,335	0,336	0,337	0,336	0,334	0,334	0,333	pa
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{4}$ . .	0,259	0,270	0,280	0,287	0,294	0,299	0,304	0,308	0,312	0,315	0,318	0,332	0,335	0,335	0,333	pa
Опорная реакция Q_y:																
$x=-\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$.	0,117	0,112	0,107	0,102	0,097	0,092	0,087	0,083	0,079	0,075	0,072	0,049	0,036	0,029	—	pb
$x=0$; $y=\frac{b}{2}$ . . .	0,213	0,202	0,192	0,181	0,172	0,163	0,154	0,146	0,139	0,132	0,126	0,085	0,064	0,051	—	pb
$x=\frac{a}{10}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	0,237	0,224	0,212	0,200	0,188	0,178	0,169	0,160	0,152	0,144	0,138	0,093	0,070	0,056	—	pb
$x=\frac{a}{4}$; $y=\frac{b}{2}$, .	0,243	0,227	0,213	0,200	0,188	0,177	0,167	0,158	0,150	0,142	0,136	0,091	0,068	0,055	—	pb
Опорная реакция Q_0:																
$x=-\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$.	−0,028	−0,028	−0,028	−0,027	−0,027	−0,026	−0,025	−0,024	−0,023	−0,023	−0,022	−0,016	−0,012	−0,009	—	pab
$x=\frac{a}{2}$; $y=\frac{b}{2}$ . .	−0,042	−0,040	−0,040	−0,039	−0,037	−0,036	−0,034	−0,032	−0,031	−0,030	−0,028	−0,019	−0,015	−0,012	—	pab



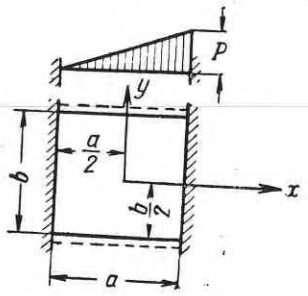
Фиг. 4—117

Случай 9. Плита, заделанная одним краем и свободно опертая тремя краями, под нагрузкой, распределенной по закону треугольника

$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$				Добавочный множитель	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$			Добавочный множитель
	0	1:2	1:1,5	1		1,5	2	∞	
Прогиб w в точке: $x=0;\ y=0$	0,026	0,026	0,022	0,014	$\frac{pa^4}{Eh^3}$	0,034	0,050	0,073	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_y: $x=0;\ y=0$	0,029	0,029	0,025	0,018	$\frac{pa^4}{Eh^3}$	0,027	0,021	0,016	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x=\frac{a}{2}\ y=0$	−0,067	−0,063	−0,061	−0,048	$\frac{pa^4}{Eh^3}$	−0,071	−0,084	−0,125	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_x*: $x=0;\ y=0$	0,007	0,010	0,012	0,015	$\frac{pa^4}{Eh^3}$	0,033	0,045	0,062	$\frac{pb^4}{Eh^3}$
Поперечная сила V_{xz}: $x=-\frac{a}{2};\ y=0$	0,100	0,100	0,095	0,076	pa	0,048	0,030	0	pa
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,400	0,408	0,400	0,381	pa	0,329	0,277	—	pa
Поперечная сила V_{yz}: $x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0	0,068	0,091	0,136	pb	0,190	0,221	0,250	pb
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,128	−0,170	−0,245	pb	−0,321	−0,365	−0,500	pb
Опорная реакция Q_x: $x=-\frac{a}{2};\ y=0$	0,100	0,105	0,111	0,104	pa	0,075	0,050	0	pa
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,400	0,408	0,400	0,381	pa	0,329	0,277	—	pa
Опорная реакция Q_y: $x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0	0,093	0,119	0,174	pb	0,233	0,246	0,250	pb
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,224	−0,298	−0,429	pb	−0,562	−0,639	−0,875	pb
Опорная реакция Q_0: $x=-\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	—	−0,012	−0,016	−0,020	pab	−0,019	−0,014	—	pab

* Для получения опорного момента M_x $\left(x=\frac{a}{2};\ y=0\right)$ надо цифры, соответствующие M_x $(x=0;\ y=0)$, умножить на μ.



Фиг. 4—118

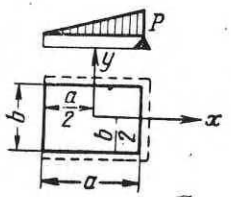
Случай 10. Плита, заделанная двумя краями и свободно опертая двумя краями, под нагрузкой, распределенной по закону треугольника

$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$				Добавочный множитель	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$			Добавочный множитель
	0	1:2	1:1,5	1		1,5	2	∞	
Изгибающий момент M_y:									
$x=0;\ y=0$	0,0208	0,0210	0,0201	0,0162	pa^2	0,0218	0,0217	0,0156	pb^2
$x=-\frac{a}{2};\ y=0$	−0,0333	−0,0296	−0,0331	−0,0268	pa^2	−0,0362	−0,0354	0	pb^2
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	−0,0500	−0,0546	−0,0498	−0,0431	pa^2	−0,0686	−0,0837	−0,0152	pb^2
Изгибающий момент M_x*:									
$x=0;\ y=0$	0,0052	0,0061	0,0076	0,0115	pa^2	0,0285	0,0428	0,0625	pb^2
Поперечная сила V_{xz}:									
$x=-\frac{a}{2};\ y=0$	0,150	0,146	0,162	0,	pa	0,122	0,0089	—	pa
$x=\frac{a}{2};\ y=0$	0,350	0,366	0,362	0,359	pa	0,322	0,271	—	pa
Поперечная сила V_{yz}:									
$x=-\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,047	−0,068	−0,100	pb	−0,124	−0,119	0	pb
$x=0;\ y=\frac{b}{2}$	0	0,060	0,080	0,122	pb	0,180	0,210	0,250	pb
$x=\frac{a}{2};\ y=\frac{b}{2}$	0	−0,117	−0,151	−0,226	pb	−0,313	−0,362	−0,500	pb

* На опорах $M_x = \mu M_y$.

Продолжение табл. 4—4



Фиг. 4 – 119

Случай 11. Плита, свободно опертая тремя краями, под нагрузкой, распределенной по закону треугольника

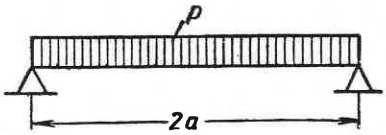
$\mu = 0{,}25$

Наименование расчетных величин в точках с координатами	Отношение сторон плиты $\frac{a}{b}$						Добавочный множитель
	1:2	1:1,5	1	1,5	2	∞	
Прогиб w в точках:							
$x = 0;\ y = 0$	0,0147	0,0229	0,0352	0,0501	0,0600	0,0732	$-\frac{pb^4}{Eh^3}$
$x = -\frac{a}{2};\ y = 0$	0,0246	0,0328	0,0400	0,0379	0,0319	0	$-\frac{pb^4}{Eh^3}$
Изгибающий момент M_x:							
$x = 0;\ y = 0$	0,0139	0,0213	0,0324	0,0448	0,0526	0,0625	pb^2
$x = -\frac{a}{2};\ y = 0$	0,0193	0,0262	0,0325	0,0308	0,0259	0	pb^2
Изгибающий момент M_y:							
$x = 0;\ y = 0$	0,0115	0,0151	0,0202	0,0211	0,0197	0,0156	pb^2

3. Круглые плиты

Для круглых плит дифференциальное уравнение упругой поверхности плиты (4—13) преобразуется в полярных координатах. При нагрузке, симметричной относительно центра тяжести плиты, это уравнение представляет полное дифференциальное уравнение. Если r — полярная координата произвольной точки, то для полной или частичной нагрузки при свободном опирании или полной заделке решения уравнения дают следующие результаты.

а) Загрузка по всей площади, свободное опирание
(фиг. 4—120)



Фиг. 4—120

Прогиб

$$w=\frac{pa^4}{64\,D\,(1+\mu)}\left[(5+\mu)-2(3+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2+(1+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^4\right]. \qquad (4—18)$$

Момент в радиальной плоскости

$$M_r=\frac{pa^2}{16}(3+\mu)\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]. \qquad (4—19)$$

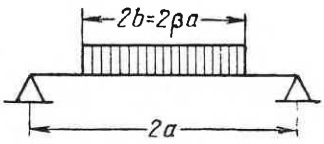
Момент в плоскости, перпендикулярной радиусу:

$$M_\varphi=\frac{pa^2}{16}\left[(3+\mu)-(1-3\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]. \qquad (4—20)$$

Поперечная сила

$$Q_r=-\frac{pr}{2}. \qquad (4—21)$$

б) Частичная загрузка по площади круга диаметром 2b, свободное опирание
(фиг. 4—121).



Фиг. 4—121

При $\frac{r}{a}<\beta$

$$w=\frac{pa^4}{64D(1+\mu)}\left\{[4(3+\mu)-(7+3\mu)\beta^2]\beta^2-\left(\frac{r}{a}\right)^2[8-2(1-\mu)\beta^2]\beta^2+(1+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^4+4(1+\mu)\beta^2\left[\beta^2+2\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]\ln\beta\right\}; \qquad (4—22)$$

$$M_r=\frac{pa^2}{16}\left\{[4-(1-\mu)\beta^2\,\beta^2]-(3+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2-4(1+\mu)\beta^2\ln\beta\right\}; \qquad (4—23)$$

$$M_\varphi=\frac{pa^2}{16}\left\{[4-(1-\mu)\beta^2]\beta^2-(1+3\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2-4(1+\mu)\beta^2\ln\beta\right\}; \qquad (4—24)$$

$$Q_r=-\frac{pr}{2}. \qquad (4—25)$$

При $\frac{r}{a}>\beta$

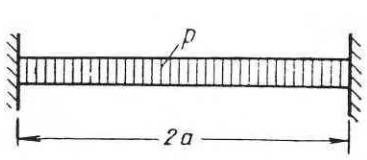
$$w=\frac{pa^2b^2}{32\,D\,(1+\mu)}\left\{2(3+\mu)-(1-\mu)\beta^2-\left(\frac{r}{a}\right)^2[2(3+\mu)-(1-\mu)\beta^2]+2(1+\mu)\left[\beta^2+2\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]\ln\frac{r}{a}\right\}; \qquad (4—26)$$

$$M_r=-\frac{pa^2}{16}\left\{(1-\mu)\beta^2\left[1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]+4(1+\mu)\beta^2\ln\frac{r}{a}\right\}; \qquad (4—27)$$

$$M_\varphi=\frac{pa^2}{16}\left\{(1-\mu)\beta^2\left[4-\beta^2\left\{1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right\}\right]-4(1+\mu)\beta^2\ln\frac{r}{a}\right\}; \qquad (4—28)$$

$$Q_r=-\frac{pb}{2}\cdot\frac{b}{r}. \qquad (4—29)$$

в) Загрузка по всей площади, заделка
(фиг. 4—122)



Фиг. 4—122

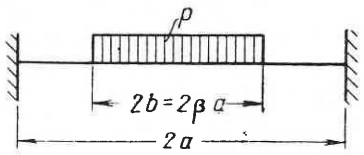
$$w=\frac{pa^4}{64D}\left[1-2\left(\frac{r}{a}\right)^2+\left(\frac{r}{a}\right)^4\right]; \qquad (4-30)$$

$$M_r=\frac{pa^2}{16}\left[(1+\mu)-(3+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]; \qquad (4-31)$$

$$M_\varphi=\frac{pa^2}{16}\left[(1+\mu)+(1+3\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]; \qquad (4-32)$$

$$Q_r=-\frac{pr}{2}. \qquad (4-33)$$

г) Частичная загрузка по площади круга диаметром 2b, заделка (фиг. 4—123)



Фиг. 4—123

При $\frac{r}{a}<\beta$

$$w=\frac{pa^4}{64D}\left\{4\beta^2-3\beta^4-2\beta^4\left(\frac{r}{a}\right)^2+\left(\frac{r}{a}\right)^4+\right.$$

$$\left.+4\beta^2\left[\beta^2+2\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]\ln\beta\right\}; \qquad (4-34)$$

$$M_r=\frac{pa^2}{16}\left[(1+\mu)\beta^4-(3+\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2-\right.$$

$$\left.-4(1+\mu)\beta^2\ln\beta\right]; \qquad (4-35)$$

$$M_\varphi=\frac{pa^2}{16}\left[(1+\mu)\beta^4-(1+3\mu)\left(\frac{r}{a}\right)^2-\right.$$

$$\left.-4(1+\mu)\beta^2\ln\beta\right]; \qquad (4-36)$$

$$Q_r=-\frac{pr}{2}. \qquad (4-37)$$

При $\frac{r}{a}>\beta$

$$w=\frac{pa^4}{32D}\beta^2\left\{(2+\beta^2)\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]+\right.$$

$$\left.+2\left[\beta^2+2\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]\ln\frac{r}{a}\right\}; \qquad (4-38)$$

$$M_r=-\frac{pa^2}{16}\left[4\beta^2-(1+\mu)\beta^4-(1-\mu)\beta^4\left(\frac{a}{r}\right)^2+\right.$$

$$\left.+4(1+\mu)\beta^2\ln\frac{r}{a}\right]; \qquad (4-39)$$

$$M_\varphi=-\frac{pa^2}{16}\left[4\mu\beta^2-(1+\mu)\beta^4+(1-\mu)\beta^4\left(\frac{a}{r}\right)^2+\right.$$

$$\left.+4(1+\mu)\beta^2\ln\frac{r}{a}\right]; \qquad (4-40)$$

$$Q_r=-\frac{pb}{2}\beta\frac{a}{r}. \qquad (4-41)$$

4. Прочие виды плит

Расчет плит в виде равнокатетного прямоугольного треугольника, плит в виде неполного и полного секторов, плит, ограниченных двумя дугами концентрических кругов и двумя радиусами, эллиптических и полуэллиптических плит приведен в [1].

Расчетные данные для прямоугольных плит и плит в виде равностороннего треугольника под треугольной нагрузкой, полученные инж. Смотровым [9] на основе решений методом конечных разностей, приведены в табл. 4—5.

Таблица 4—5

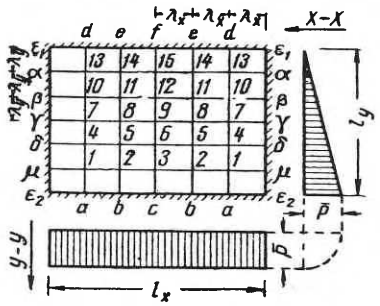
Решение прямоугольных и треугольных плит под треугольной нагрузкой

Принятые обозначения:

прогибы- w; опорные реакции—Q; кривизны – W; изгибающие моменты—M; жесткость плиты—

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)},$$

где E—модуль упругости материала плиты; h—толщина плиты; μ—коэффициент Пуассона материала плиты.



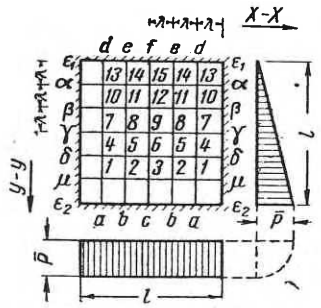
Фиг. 4—124

Случай 1. Прямоугольная плита, заделанная по всему контуру

$1{,}5\ l_y=l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,564	0	0,4582	—0,0764	—0,4582
e	0	0,497	0	0,3992	—0,0665	—0,3992
d	0	0,258	0	0,2183	—0,0364	—0,2183
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,134	0,0970	0	—0,0970	—0,0161
β	0	0,493	0,2423	0	—0,2423	—0,0404
γ	0	0,749	0,3326	0	—0,3326	—0,0554
δ	0	0,816	0,3069	0	—0,3069	—0,0511
μ	0	0,622	0,1610	0	—0,1610	—0,0268
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,944	0	0,3622	—0,0604	—0,3622
b	0	1,289	0	0,5994	—0,0999	—0,5994
c	0	1,372	0	0,6700	—0,1117	—0,6700
1	0,08048	—	—0,0279	—0,0170	0,0306	0,0216
2	0,13320	—	—0,0370	—0,0006	0,0371	0,0067
3	0,14889	—	—0,0314	0,0089	0,0299	—0,0036
4	0,15343	—	—0,0407	—0,1351	0,0632	0,1419
5	0,26615	—	—0,0771	—0,2306	0,1156	0,2435
6	0,30173	—	—0,0712	—0,2601	0,1145	0,2719
7	0,16631	—	—0,0360	—0,1306	0,0578	0,1366
8	0,29660	—	—0,0879	—0,2419	0,1282	0,2566
9	0,33898	—	—0,0848	—0,2798	0,1314	0,2939
10	0,12113	—	—0,0227	—0,0618	0,0330	0,0655
11	0,21950	—	—0,0660	—0,1208	0,0861	0,1318
12	0,25189	—	—0,0648	—0,1417	0,0884	0,1525
13	0,04850	—	—0,0083	0,0543	—0,0007	—0,0530
14	0,08871	—	—0,0271	0,0947	0,0113	—0,0902
15	0,10183	—	—0,0262	0,1085	0,0081	—0,1042
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\bar{p}\lambda_x^4}{D}$	$\cdot\bar{p}\lambda_x$	$\cdot\frac{\bar{p}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot\frac{\bar{p}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot\bar{p}\lambda_x^2$	$\cdot\bar{p}\lambda_x^2$

Продолжение табл. 4—5



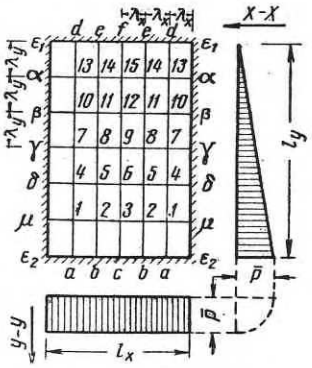
Фиг. 4—125

Случай 2. Квадратная плита, заделанная по всему контуру

$l_y = l_x = l$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,578	0	0,5992	−0,0999	−0,5992
e	0	0,468	0	0,4949	−0,0825	−0,4949
d	0	0,157	0	0,2302	−0,0384	−0,2302
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,240	0,2302	0	−0,2302	−0,0384
β	0	0,766	0,5729	0	−0,5729	−0,0955
γ	0	1,158	0,8051	0	−0,8051	−0,1342
δ	0	1,271	0,7835	0	−0,7835	−0,1306
μ	0	0,940	0,4485	0	−0,4485	−0,0747
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	1,023	0	0,4485	−0,0747	−0,4485
b	0	1,569	0	0,8615	−0,1436	−0,8615
c	0	1,737	0	1,0110	−0,1685	−1,0110
1	0,22426	—	−0,0178	−0,0567	0,0272	0,0597
2	0,43076	—	−0,1318	−0,0756	0,1443	0,0975
3	0,50550	—	−0,1495	−0,0764	0,1622	0,1014
4	0,39177	—	0,0024	−0,1567	0,0237	0,1563
5	0,78596	—	−0,2456	−0,3116	0,2975	0,3526
6	0,93455	—	−0,2972	−0,3693	0,3587	0,4188
7	0,40256	—	0,0244	−0,1269	−0,0033	0,1228
8	0,82953	—	−0,2622	−0,2718	0,3075	0,3155
9	0,99428	—	−0,3295	−0,3295	0,3844	0,3844
10	0,28643	—	0,0285	−0,0552	−0,0193	0,0504
11	0,60132	—	−0,1917	−0,1257	0,2127	0,1576
12	0,72451	—	−0,2464	−0,1551	0,2722	0,1962
13	0,11513	—	0,0172	0,0562	−0,0265	−0,0590
14	0,24744	—	−0,0801	0,1064	0,0624	−0,0931
15	0,29961	—	−0,1043	0,1253	0,0835	−0,1079
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda 2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5



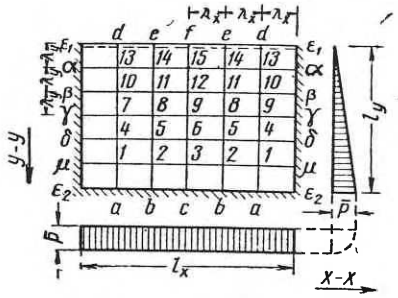
Фиг. 4—126

Случай 3. Прямоугольная плита, заделанная по всему контуру

$l_y = 1{,}50 l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,253	0	0,2014	−0,0336	−0,2014
e	0	0,194	0	0,1631	−0,0271	−0,1631
d	0	0,036	0	0,0718	−0,0120	−0,0718
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,244	0,1615	0	−0,1615	−0,0269
β	0	0,636	0,3857	0	−0,3857	−0,0643
γ	0	0,968	0,5641	0	−0,5641	−0,0940
δ	0	1,150	0,6129	0	−0,6129	−0,1021
μ	0	0,958	0,4189	0	−0,4189	−0,0698
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,721	0	0,1862	−0,0310	−0,1862
b	0	1,115	0	0,3860	−0,0643	−0,3860
c	0	1,246	0	0,4639	−0,0773	−0,4639
1	0,09310	—	0,0153	−0,0500	−0,0070	0,0474
2	0,19300	—	−0,1371	−0,0920	0,1524	0,1149
3	0,23196	—	−0,1753	−0,1063	0,1930	0,1355
4	0,13620	—	0,0486	−0,0539	−0,0396	0,0458
5	0,29398	—	−0,2119	−0,1182	0,2316	0,1535
6	0,35759	—	−0,2862	−0,1442	0,3103	0,1920
7	0,12536	—	0,0587	−0,0288	−0,0539	0,0190
8	0,27681	—	−0,2009	−0,0680	0,2122	0,1014
9	0,33898	—	−0,2798	−0,0848	0,2939	0,1314
10	0,08571	—	0,0456	−0,0102	−0,0439	0,0026
11	0,19167	—	−0,1396	−0,0250	0,1437	0,0482
12	0,23560	—	−0,1977	−0,0316	0,2029	0,0645
13	0,03589	—	0,0220	0,0139	−0,0243	−0,0176
14	0,08157	—	−0,0598	0,0285	−0,0551	−0,0186
15	0,10065	—	−0,0859	0,0343	−0,0802	−0,0200
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda_y^4}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda_y$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda_y^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda_y^2}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda_y^2$	$\cdot \bar{p}\lambda_y^2$

Продолжение табл. 4—5



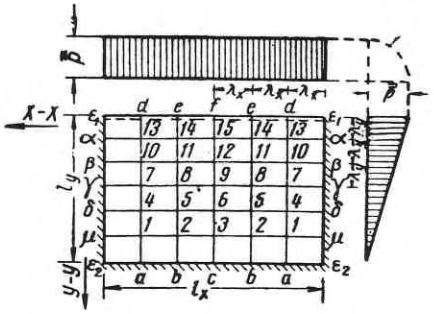
Фиг. 4—127

Случай 4а. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне

$1{,}5\ l_y = l_x$

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,411	0	0	0	0
e	0	0,354	0	0	0	0
d	0	0,109	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,360	0,2104	0	−0,2104	−0,0351
β	0	0,664	0,3691	0	−0,3691	−0,0615
γ	0	0,852	0,4291	0	−0,4291	−0,0715
δ	0	0,856	0,3605	0	−0,3605	−0,0600
μ	0	0,613	0,1777	0	−0,1777	−0,0296
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,961	0	0,3999	−0,0666	−0,3999
b	0	1,368	0	0,6902	−0,1151	−0,6902
c	0	1,475	0	0,7828	−0,1305	−0,7828
1	0,08886	—	−0,0243	0,0057	0,0233	−0,0017
2	0,15337	—	−0,0439	0,0445	0,0365	−0,0372
3	0,17397	—	−0,0412	0,0627	0,0307	−0,0559
4	0,18027	—	−0,0340	−0,1285	0,0554	0,1342
5	0,32652	—	−0,0969	−0,2225	0,1340	0,2387
6	0,37582	—	−0,0986	−0,2521	0,1406	0,2686
7	0,21455	—	−0,0283	−0,1447	0,0524	0,1494
8	0,40077	—	−0,1214	−0,2776	0,1677	0,2978
9	0,46560	—	−0,1297	−0,3249	0,1838	0,3465
10	0,18453	—	−0,0174	−0,1109	0,0359	0,1138
11	0,35164	—	−0,1078	−0,2244	0,1451	0,2423
12	0,41100	—	−0,1187	−0,2667	0,1632	0,2865
13	0,10523	—	−0,0076	−0,0583	0,0174	0,0596
14	0,20280	—	−0,0625	−0,1214	0,0828	0,1318
15	0,23785	—	−0,0701	−0,1456	0,0944	0,1572
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda_x^4}{D}$	$\cdot\bar{p}\lambda_x$	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda_x^2}{D}$	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda_x^2}{D}$	$\cdot\bar{p}\lambda_x^2$	$\cdot\bar{p}\lambda_x^2$

Продолжение табл. 4—5



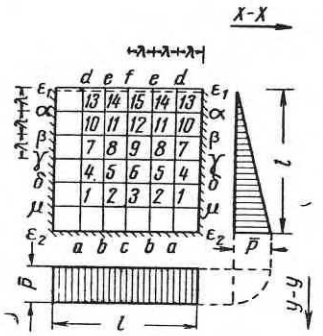
Фиг. 4—128

Случай 4б. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне

$1{,}5\ l_y = l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	1,145	0	0	0	0
e	0	1,070	0	0	0	0
d	0	0,711	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,979	0,3370	0	−0,3370	−0,0562
β	0	1,081	0,5017	0	−0,5017	−0,0836
γ	0	0,907	0,4800	0	−0,4800	−0,0800
δ	0	0,555	0,3240	0	−0,3240	−0,0540
μ	0	0,120	0,1225	0	−0,1225	−0,0204
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,285	0	0,2756	−0,0460	−0,2756
b	0	0,616	0	0,5360	−0,0893	−0,5360
c	0	0,718	0	0,6277	−0,1046	−0,6277
1	0,06125	—	−0,0034	0,0889	−0,0114	−0,0883
2	0,11911	—	−0,0375	0,1627	0,0104	−0,1564
3	0,13949	—	−0,0408	0,1894	0,0092	−0,1826
4	0,16200	—	−0,0135	−0,0512	0,0220	0,0534
5	0,31052	—	−0,0959	−0,1085	0,1139	0,1245
6	0,36317	—	−0,1053	−0,1300	0,1270	0,1476
7	0,23999	—	−0,0263	−0,1511	0,0515	0,1554
8	0,45371	—	−0,1383	−0,2957	0,1876	0,3187
9	0,52906	—	−0,1507	−0,3481	0,2087	0,3732
10	0,25085	—	−0,0362	−0,2097	0,0712	0,2157
11	0,46548	—	−0,1399	−0,3869	0,2044	0,4102
12	0,54023	—	−0,1495	−0,4482	0,2242	0,4731
13	0,16850	—	−0,0317	−0,1939	0,0640	0,1991
14	0,30532	—	−0,0899	−0,3266	0,1443	0,3416
15	0,35222	—	−0,0938	−0,3695	0,1554	0,3851
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x^2$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x^2$

Продолжение табл. 4—5



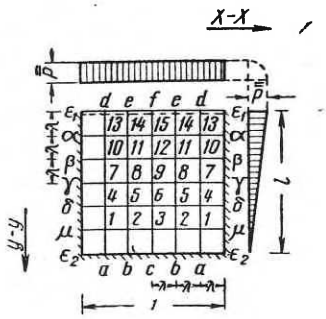
Фиг. 4—129

Случай 5а. Квадратная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне

$l_y = l_x = l$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,444	0	0	0	0
e	0	0,337	0	0	0	0
d	0	—0,021	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,488	0,3998	0	—0,3998	—0,0666
β	0	0,925	0,7295	0	—0,7295	—0,1216
γ	0	1,237	0,9049	0	—0,9049	—0,1508
δ	0	1,299	0,8315	0	—0,8315	—0,1385
μ	0	0,937	0,4617	0	—0,4617	—0,0770
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	1,020	0	0,4617	—0,0770	—0,4617
b	0	1,589	0	0,8981	—0,1497	—0,8981
c	0	1,767	0	1,0583	—0,1764	—0,0583
1	0,23087	—	—0,0127	—0,0460	0,0203	0,0481
2	0,44906	—	—0,1381	—0,0527	0,1469	0,0757
3	0,52915	—	—0,1602	—0,0485	0,1683	0,0752
4	0,41575	—	0,0139	—0,1482	0,0107	0,1458
5	0,84545	—	—0,2654	—0,2950	0,3145	0,3392
6	1,00976	—	—0,3286	—0,3498	0,3869	0,4045
7	0,45245	—	0,0420	—0,1244	—0,0212	0,1174
8	0,94686	—	0,3007	—0,2709	0,3453	0,3210
9	1,14061	—	—0,3875	—0,3299	0,4425	0,3944
10	0,36473	—	0,0479	—0,0771	—0,0351	0,0691
11	0,77740	—	—0,2485	—0,1775	0,2780	0,2189
12	0,94160	—	—0,3284	—0,2196	0,3650	0,2743
13	0,19991	—	0,0307	—0,0351	—0,0248	0,0300
14	0,43048	—	—0,1380	—0,0836	0,1520	0,1066
15	0,52302	—	—0,1851	—0,1044	0,2025	0,1353
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5



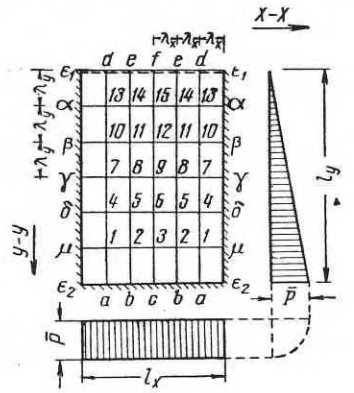
Фиг. 4—130

Случай 5б. Квадратная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне

$l_y = l_x = l$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	M_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	1,495	0	0	0	0
e	0	1,333	0	0	0	0
d	0	0,721	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	1,388	0,7502	0	−0,7502	−0,1250
β	0	1,553	1,0593	0	−1,0593	−0,1765
γ	0	1,298	0,9798	0	−0,9798	−0,1633
δ	0	0,814	0,6566	0	−0,6566	−0,1094
μ	0	0,236	0,2533	0	−0,2533	−0,0422
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,152	0	0,2533	−0,0422	−0,2533
b	0	0,503	0	0,5585	−0,0931	−0,5585
c	0	0,631	0	0,6815	−0,1136	−0,6815
1	0,12666	—	0,0259	0,0750	−0,0384	−0,0793
2	0,27927	—	−0,0911	0,1463	0,0667	−0,1311
3	0,34075	—	−0,1230	0,1738	0,0940	−0,1533
4	0,32827	—	0,0483	−0,0400	−0,0417	0,0319
5	0,70487	—	−0,2262	−0,0966	0,2423	0,1343
6	0,85528	—	−0,3008	−0,1122	−0,3210	0,1713
7	0,48992	—	0,0540	−0,1219	−0,0337	0,1129
8	1,03888	—	−0,3292	−0,2700	0,3742	0,3249
9	1,24863	—	−0,4295	−0,3305	0,4846	0,4020
10	0,52963	—	0,0336	−0,1942	−0,0012	0,1886
11	1,09288	—	−0,3446	−0,4018	0,4115	0,4592
12	1,31151	—	−0,4373	−0,4820	0,5177	0,5549
13	0,37512	—	−0,0002	−0,2206	−0,0370	0,2206
14	0,75000	—	−0,2325	−0,4071	0,3004	0,4459
15	0,89237	—	−0,2847	−0,4732	0,3636	0,5207
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\overline{\overline{p}}\lambda^4}{D}$	$\cdot \overline{\overline{p}}\lambda$	$\cdot \frac{\overline{\overline{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\overline{\overline{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \overline{\overline{p}}\lambda^2$	$\cdot \overline{\overline{p}}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5



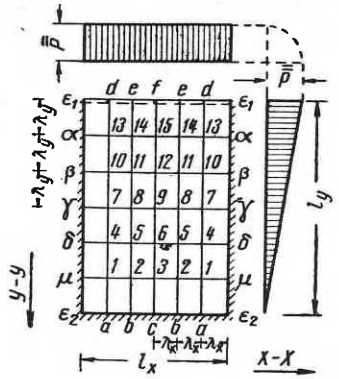
Фиг. 4—131

Случай 6а. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне

$l_y = 1{,}5 l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0	0,220	0	0	0	0
e	0	0,154	0	0	0	0
d	0	—0,049	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	0,342	0,2167	0	—0,2167	—0,0361
β	0	0,679	0,4203	0	—0,4203	—0,0700
γ	0	0,981	0,5787	0	—0,5787	—0,0964
δ	0	1,152	0,6174	0	—0,6174	—0,1029
μ	0	0,958	0,4197	0	—0,4197	—0,0700
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,720	0	—0,1865	—0,0311	—0,1865
b	0	1,115	0	0,3872	—0,0645	—0,3872
c	0	1,246	0	0,4655	—0,0776	—0,4655
1	0,09327	—	0,0158	—0,0493	—0,0076	0,0467
2	0,19358	—	—0,1376	—0,0904	0,1526	0,1133
3	0,23275	—	—0,1763	—0,1043	0,1937	0,1337
4	0,13721	—	0,0502	—0,0526	—0,0415	0,0442
5	0,29674	—	—0,2140	—0,1150	0,2331	0,1506
6	0,36117	—	—0,2899	—0,1403	0,3133	0,1886
7	0,12859	—	0,0625	—0,0266	—0,0580	0,0162
8	0,28495	—	—0,2070	—0,0633	0,2175	0,0978
9	0,34932	—	—0,2897	—0,0792	0,3029	0,1274
10	0,09340	—	0,0518	—0,0100	—0,0504	0,0014
11	0,20984	—	—0,1530	—0,0258	0,1572	0,0513
12	0,25830	—	—0,2181	—0,0329	0,2235	0,0693
13	0,04815	—	0,0284	0,0291	0,0279	—0,0018
14	0,10892	—	0,0795	—0,0080	0,0808	0,0213
15	0,13436	—	—0,1144	—0,0104	0,1162	0,0295
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_y^4}{D}$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_y$	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_y^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_y^2}{D}$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_y^2$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_y^2$

Продолжение табл. 4—5

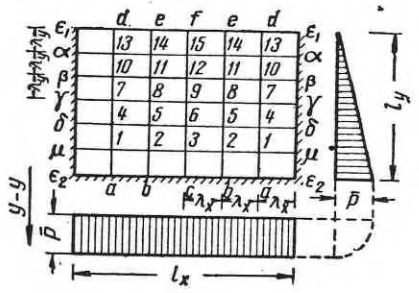


Фиг. 4—132

Случай 6б. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и свободно опертая по четвертой стороне $l_y = 1{,}5 l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	W_{yy}
f	0	1,154	0	0	0	0
e	0	1,015	0	0	0	0
d	0	0,537	0	0	0	0
ε_1	0	0	0	0	0	0
α	0	1,196	0,5509	0	−0,5509	−0,0918
β	0	1,251	0,6951	0	−0,6951	−0,1158
γ	0	0,998	0,5985	0	−0,5985	−0,0997
δ	0	0,642	0,3964	0	−0,3964	−0,0661
μ	0	0,242	0,1634	0	−0,1634	−0,0272
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,034	0	0,0726	−0,0121	−0,0276
b	0	0,194	0	0,1659	−0,0276	−0,1659
c	0	0,254	0	0,2050	−0,0342	−0,2050
1	0,03630	—	0,0232	0,0155	−0,0258	−0,0193
2	0,08294	—	−0,0609	0,0323	0,0555	−0,0221
3	0,10252	—	−0,0881	0,0390	0,0816	−0,0243
4	0,03809	—	0,0495	−0,0069	−0,0484	−0,0014
5	0,19819	—	−0,1445	−0,0174	0,1474	0,0415
6	0,24405	—	−0,2064	−0,0222	0,2101	0,0566
7	0,13301	—	0,0675	−0,0235	−0,0636	0,0122
8	0,29603	—	−0,2152	−0,0569	0,2247	0,0928
9	0,36338	—	−0,3031	−0,0715	0,3150	0,1221
10	0,15446	—	0,0630	−0,0535	−0,0541	0,0430
11	0,33692	—	−0,2435	−0,1201	0,2635	0,1607
12	0,41116	—	−0,3341	−0,1476	0,3587	0,2032
13	0,12243	—	−0,0290	−0,0904	−0,0139	0,0856
14	0,25773	—	−0,1837	−0,1785	0,2135	0,2092
15	0,31139	—	−0,2415	−0,2116	0,2767	0,2519
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}} \lambda_y^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}} \lambda_y$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}} \lambda_y^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}} \lambda_y^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}} \lambda_y^2$	$\cdot \bar{\bar{p}} \lambda_y^2$

Продолжение табл. 4—5



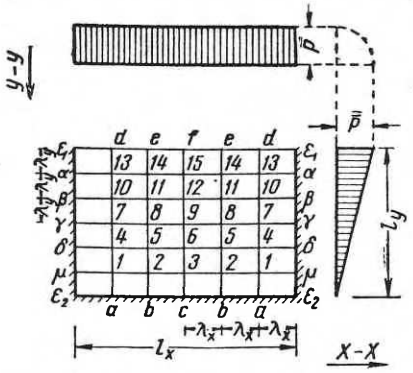
Фиг. 4—133

Случай 7а. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу

$1{,}5\ l_y = l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0,89308	0	—0,3414	0,0569	0,3319	0
e	0,72236	0	—0,2376	0,0396	0,2310	0
d	0,31401	0	0,0943	—0,0157	—0,0917	0
ε_1	0	0,515	0,6280	0	—0,6280	—0,1047
α	0	0,663	0,6335	0	—0,6335	—0,1056
β	0	0,811	0,6262	0	—0,6262	—0,1044
γ	0	0,903	0,5664	0	—0,5664	—0,0944
δ	0	0,851	0,4184	0	—0,4184	—0,0697
μ	0	0,581	0,1907	0	—0,1907	—0,0318
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,937	0	0,4291	—0,0715	—0,4291
b	0	1,408	0	0,7912	—0,1318	—0,7912
c	0	1,547	0	0,9185	—0,1531	—0,9185
1	0,09535	—	—0,0149	0,0416	0,0079	—0,0391
2	0,17583	—	—0,0522	0,1273	0,0310	—0,1185
3	0,20412	—	—0,0566	0,1659	0,0289	—0,1565
4	0,20918	—	—0,0102	—0,0896	0,0251	0,0913
5	0,40820	—	—0,1252	—0,1393	0,1484	0,1602
6	0,48199	—	—0,1476	—0,1514	0,1728	0,1760
7	0,28319	—	0,0123	—0,0992	0,0043	0,0972
8	0,57865	—	—0,1815	—0,1844	0,2122	0,2146
9	0,69258	—	—0,2279	—0,2135	0,2635	0,2515
10	0,31310	—	0,0410	—0,0591	—0,0311	0,0522
11	0,66716	—	—0,2129	—0,1224	0,2333	0,1579
12	0,80829	—	—0,2823	—0,1468	0,3067	0,1938
13	0,31676	—	—0,0677	—0,0144	0,0653	0,0031
14	0,70125	—	—0,2270	—0,0292	0,2318	0,0670
15	0,85875	—	—0,3150	—0,0363	0,3211	0,0888
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_x^4}{D}$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_x$	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_x^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\,\lambda_x^2}{D}$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_x^2$	$\cdot\,\bar{p}\,\lambda_x^2$

Продолжение табл. 4—5



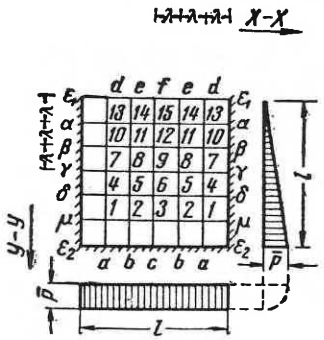
Фиг. 4—134

Случай 7б. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу

$1{,}5\ l_y = l_x$

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	2,80109	0	—0,9929	0,1655	0,9654	0
e	2,30462	0	—0,7360	0,1226	0,7155	0
d	1,07218	0	0,1602	—0,0267	—0,1558	0
ε_1	0	3,857	2,1444	0	—2,1444	—0,3574
α	0	2,046	1,7535	0	—1,7535	—0,2922
β	0	1,582	1,3487	0	—1,3487	—0,2247
γ	0	1,079	0,9266	0	—0,9266	—0,1544
δ	0	0,540	0,5105	0	—0,5105	—0,0851
μ	0	0,017	0,1643	0	—0,1643	—0,0274
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,209	0	0,3695	—0,0616	—0,3695
b	0	0,739	0	0,8542	—0,1423	—0,8542
c	0	0,939	0	1,0525	—0,1754	—1,0525
1	0,08211	—	0,0256	0,2048	—0,0597	—0,2091
2	0,18983	—	—0,0636	0,4251	—0,0072	—0,4145
3	0,23389	—	—0,0881	0,5147	0,0023	0,5000
4	0,25526	—	0,0581	0,0785	—0,0712	—0,0882
5	0,56859	—	—0,1854	0,1577	0,1591	—0,1268
6	0,69654	—	—0,2559	0,1883	0,2245	—0,1456
7	0,46330	—	0,0909	0,0067	—0,0920	—0,0219
8	1,01747	—	—0,3288	0,0046	0,3280	0,0502
9	1,24288	—	—0,4508	0,0023	0,4505	0,0728
10	0,67433	—	0,1197	—0,0194	—0,1165	—0,0005
11	1,46840	—	—0,4722	—0,0582	0,4819	0,1369
12	1,79024	—	—0,6437	—0,0754	0,6562	0,1827
13	0,87674	—	0,1400	—0,0157	—0,1337	—0,0077
14	1,89347	—	—0,6061	—0,0313	0,6113	0,1323
15	2,30409	—	—0,8212	—0,0379	0,8276	0,1748
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda_x^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x^2$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda_x^2$

Продолжение табл. 4—5

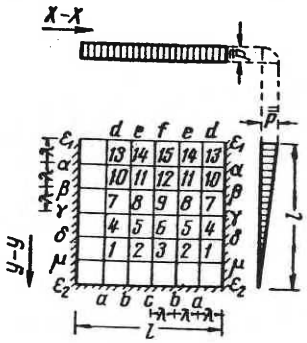


Фиг. 4—135

Случай 8а. Квадратная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу $l_y=l_x=l$

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0,83852	0	—0,3528	0,0588	0,3430	0
e	0,66213	0	—0,2226	0,0371	0,2164	0
d	0,26317	0	0,1358	—0,0226	—0,1320	0
ε_1	0	0,269	0,5263	0	—0,5263	—0,0877
α	0	0,677	0,7036	0	—0,7036	—0,1173
β	0	0,993	0,8787	0	—0,8787	—0,1464
γ	0	1,251	0,9670	0	—0,9670	—0,1612
δ	0	1,294	0,8511	0	—0,8511	—0,1418
μ	0	0,928	0,4643	0	—0,4643	—0,0774
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	1,011	0	0,4643	—0,0774	—0,4643
b	0	1,587	0	0,9117	—0,1519	—0,9117
c	0	1,769	0	1,0778	—0,1796	—1,0778
1	0,23215	—	—0,0085	—0,0388	0,0149	0,0402
2	0,45583	—	—0,1406	—0,0346	0,1464	0,0580
3	0,53890	—	—0,1661	—0,0255	0,1704	0,0532
4	0,42554	—	0,0260	—0,1354	—0,0034	0,1311
5	0,87705	—	—0,2763	—0,2638	0,3203	0,3098
6	1,05226	—	—0,3504	—0,3104	0,4022	0,3688
7	0,48350	—	0,0675	—0,1021	—0,0505	0,0909
8	1,03451	—	—0,3303	—0,2178	0,3666	0,2729
9	1,25520	—	—0,4414	—0,2635	0,4853	0,3371
10	0,43934	—	0,0955	—0,0434	—0,0882	0,0275
11	0,97415	—	—0,3144	—0,0987	0,3308	0,1511
12	1,19459	—	—0,4409	—0,1217	0,4612	0,1951
13	0,35181	—	0,1115	—0,0011	—0,1113	—0,0175
14	0,81512	—	—0,2661	0,0060	0,2651	0,0383
15	1,01231	—	—0,3944	0,0085	0,3930	0,0572
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\overline{p}\,\lambda^4}{D}$	$\cdot\overline{p}\,\lambda$	$\cdot\frac{\overline{p}\,\lambda^2}{D}$	$\cdot\frac{\overline{p}\,\lambda^2}{D}$	$\cdot\overline{p}\,\lambda^2$	$\cdot\overline{p}\,\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5



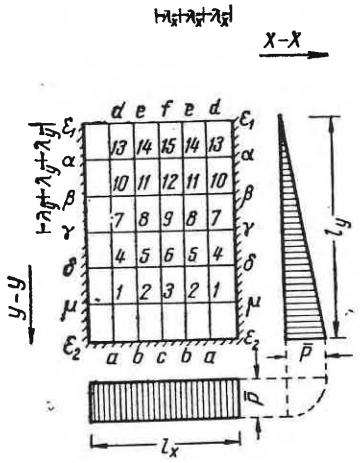
Фиг. 4—136

Случай 8б. Квадратная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу

$l_y = l_x = l$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	3,48090	0	−1,2931	0,2155	1,2571	0
e	2,83437	0	−0,9162	0,1527	0,8908	0
d	1,27162	0	0,2911	−0,0485	−0,2830	0
ε_1	0	3,500	2,5432	0	−2,5432	−0,4239
α	0	2,320	2,1397	0	−2,1397	−0,3566
β	0	1,862	1,7142	0	−1,7142	−0,2857
γ	0	1,356	1,2435	0	−1,2435	−0,2072
δ	0	0,790	0,7369	0	−0,7369	−0,1228
μ	0	0,198	0,2630	0	−0,2630	−0,0438
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,114	0	0,2630	−0,0438	−0,2630
b	0	0,492	0	0,6124	−0,1021	−0,6124
c	0	0,637	0	0,7593	−0,1265	−0,7593
1	0,13150	—	0,0432	0,1054	−0,0608	−0,1126
2	0,30620	—	−0,1012	0,2216	0,0643	−0,2048
3	0,37966	—	−0,1469	0,2692	0,1020	−0,2447
4	0,36844	—	0,0972	0,0164	−0,0999	−0,0325
5	0,83404	—	−0,2711	0,0366	0,2650	0,0086
6	1,02856	—	−0,3890	0,0446	0,3816	0,0203
7	0,62174	—	0,1550	−0,0179	−0,1520	−0,0079
8	1,39845	—	−0,4531	−0,0409	0,4600	0,1164
9	1,72202	—	−0,6471	−0,0510	0,6556	0,1588
10	0,85710	—	0,2077	−0,0226	−0,2040	−0,0120
11	1,92193	—	−0,6222	−0,0587	0,6320	0,1624
12	2,36453	—	−0,8852	−0,0744	0,8976	0,2219
13	1,06983	—	0,2471	−0,0109	−0,2453	−0,0302
14	2,38675	—	−0,7710	−0,0172	0,7739	0,1457
15	2,93265	—	−1,0918	−0,0199	1,0951	0,2018
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda^2$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5

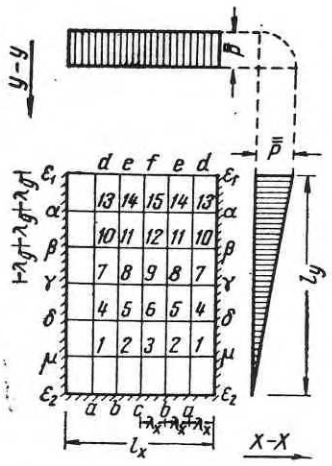


Фиг. 4—137

Случай 9а. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу $l_y = 1{,}5 l_x$

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0,10694	0	—0,1072	0,0179	0,1042	0
e	0,08312	0	—0,0635	0,0106	0,0617	0
d	0,03109	0	0,0471	—0,0078	—0,0458	0
ε_1	0	—0,026	0,1399	0	—0,1399	—0,0233
α	0	0,391	0,2772	0	—0,2772	—0,0462
β	0	0,687	0,4393	0	—0,4393	—0,0732
γ	0	0,979	0,5826	0	—0,5826	—0,0971
δ	0	1,149	0,6174	0	—0,6174	—0,1029
μ	0	0,957	0,4193	0	—0,4193	—0,0698
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,720	0	0,1864	—0,0310	—0,1864
b	0	1,114	0	0,3869	—0,0643	—0,3869
c	0	1,245	0	0,4653	—0,0774	—0,4653
1	0,09319	—	0,0160	—0,0492	—0,0077	0,0465
2	0,19347	—	—0,1375	—0,0899	0,1525	0,1128
3	0,23264	—	—0,1763	—0,1036	0,1936	0,1330
4	0,13721	—	0,0509	—0,0518	—0,0423	0,0443
5	0,29705	—	—0,2142	—0,1128	0,2330	0,1485
6	0,36167	—	—0,2908	—0,1374	0,3137	0,1859
7	0,12946	—	0,0651	—0,0241	—0,0611	0,0132
8	0,28786	—	—0,2092	—0,0569	0,2187	0,0917
9	0,35328	—	—0,2944	—0,0710	0,3062	0,1200
10	0,09763	—	0,0596	—0,0042	—0,0589	—0,0057
11	0,22176	—	—0,1620	—0,0111	0,1638	0,0381
12	0,27390	—	—0,2346	—0,0143	0,2370	0,0534
13	0,06159	—	0,0480	0,0055	—0,0489	—0,0135
14	0,14452	—	—0,1062	0,0157	0,1036	0,0019
15	0,18023	—	—0,1607	0,0204	0,1573	0,0064
Добавочный множитель	$\frac{\bar{p}\lambda_y^4}{D}$	$\bar{p}\,\lambda_y$	$\frac{\bar{p}\,\lambda_y^2}{D}$	$\frac{\bar{p}\,\lambda_y^2}{D}$	$\bar{p}\,\lambda_y^2$	$\bar{p}\,\lambda_y^2$

Продолжение табл. 4—5

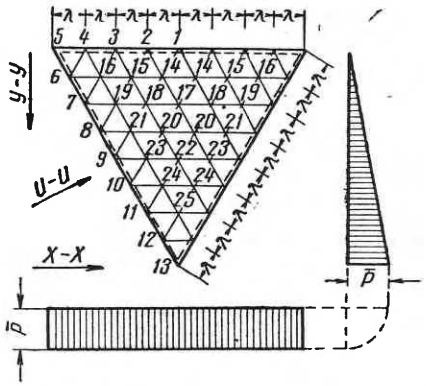


Фиг. 4—138

Случай 9б. Прямоугольная плита, заделанная по трем сторонам и имеющая четвертую сторону, свободную, неопертую и находящуюся на весу $l_y = 1{,}5 l_x$

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
f	0,74970	0	—0,6391	0,1065	0,6214	0
e	0,60767	0	—0,4442	0,0740	0,4318	0
d	0,26824	0	0,1602	—0,0267	—0,1557	0
ε_1	0	2,135	1,2071	0	—1,2071	—0,2012
α	0	1,612	1,0229	0	—1,0229	—0,1705
β	0	1,310	0,8339	0	—0,8339	—0,1390
γ	0	0,983	0,6248	0	—0,6248	—0,1041
δ	0	0,624	0,3952	0	—0,3952	—0,0659
μ	0	0,235	0,1604	0	—0,1604	—0,0267
ε_2	0	0	0	0	0	0
a	0	0,031	0	0,0713	—0,0119	—0,0713
b	0	0,188	0	0,1639	—0,0273	—0,1639
c	0	0,247	0	0,2030	—0,0338	—0,2030
1	0,03565	—	0,0240	0,0165	—0,0268	—0,0205
2	0,08197	—	—0,0602	0,0358	0,0543	—0,0257
3	0,10152	—	—0,0880	0,0437	0,0807	—0,0291
4	0,08783	—	0,0542	—0,0012	0,0540	—0,0079
5	0,19973	—	—0,1459	—0,0019	0,1462	0,0262
6	0,24678	—	—0,2117	—0,0022	0,2122	0,0374
7	0,13884	—	0,0853	—0,0045	—0,0845	—0,0097
8	0,31558	—	—0,2305	—0,0106	0,2323	0,0490
9	0,38988	—	—0,3343	—0,0132	0,3365	0,0690
10	0,18531	—	0,1130	—0,0044	—0,1122	—0,0144
11	0,42083	—	—0,3074	—0,0118	0,3093	0,0630
12	0,51974	—	—0,4451	—0,0150	0,4477	0,0892
13	0,22732	—	0,1343	—0,0011	—0,1341	—0,0213
14	0,51432	—	—0,3752	—0,0001	0,3752	0,0627
15	0,63456	—	—0,5411	—0,0003	0,5410	0,0899
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\,\lambda_y^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\,\lambda_y$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\,\lambda_y^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\,\lambda_y^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\,\lambda_y^2$	$\cdot \bar{\bar{p}}\,\lambda_y^2$

Продолжение табл. 4—5

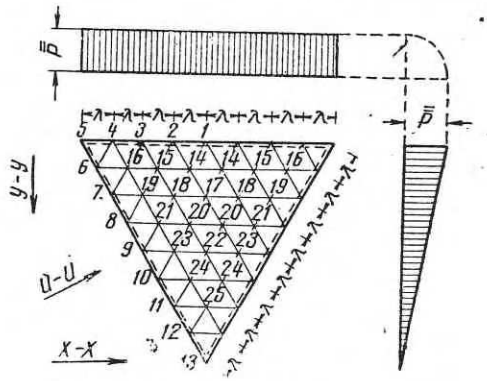


Фиг. 4—139

Случай 10а. Равносторонняя треугольная плита, свободно опертая по всему контуру

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	0,409	0	0	0	0
2	0	0,351	0	0	0	0
3	0	0,189	0	0	0	0
4	0	—0,018	0	0	0	0
5	0	—0,123	0	0	0	0
6	0	0,027	0,1279	—0,1279	—0,1066	0,1066
7	0	0,300	0,1848	—0,1848	—0,1540	0,1540
8	0	0,590	0,1585	—0,1585	—0,1321	0,1321
9	0	0,866	0,0594	—0,0594	—0,0495	0,0495
10	0	0,953	—0,0824	0,0824	0,0686	—0,0686
11	0	0,877	—0,2119	0,2119	0,1766	—0,1766
12	0	0,478	—0,2364	0,2364	0,1970	—0,1970
13	0	—0,227	0	0	0	0
14	0,40440	—	—0,1107	—0,1521	0,1361	0,1705
15	0,29368	—	—0,0551	—0,1510	0,0802	0,1602
16	0,12790	—	0,0379	—0,1452	—0,0137	0,1389
17	0,82617	—	—0,2364	—0,2557	0,2790	0,2951
18	0,60796	—	—0,1770	—0,2513	0,2189	0,2808
19	0,31273	—	—0,0175	—0,2329	0,0563	0,2353
20	0,79707	—	—0,3259	—0,2718	0,3712	0,3261
21	0,47120	—	—0,1453	—0,2405	0,1854	0,2648
22	0,75283	—	—0,4444	—0,1990	0,4776	0,2730
23	0,53064	—	—0,3084	—0,1679	0,3364	0,2193
24	0,44827	—	—0,4483	—0,0327	0,4537	0,1074
25	0,23638	—	—0,4728	0,1249	0,4519	—0,0461
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda^4}{D}$	$\cdot\bar{p}\,\lambda$	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda^2}{D}$	$\cdot\frac{\bar{p}\,\lambda^2}{D}$	$\cdot\bar{p}\,\lambda^2$	$\cdot\bar{p}\,\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5

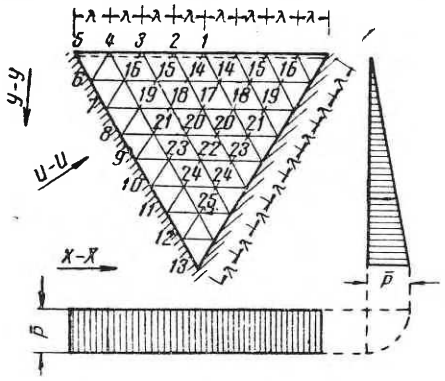


Фиг. 4—140

Случай 10б. Равносторонняя треугольная плита, свободно опертая по всему контуру

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	1,661	0	0	0	0
2	0	1,544	0	0	0	0
3	0	1,177	0	0	0	0
4	0	0,506	0	0	0	0
5	0	—0,350	0	0	0	0
6	0	0,460	0,3643	—0,3643	—0,3036	0,3036
7	0	1,066	0,3777	—0,3777	—0,3147	0,3147
8	0	1,304	0,1931	—0,1931	—0,1609	0,1609
9	0	1,204	—0,0594	0,0594	0,0495	—0,0495
10	0	0,940	—0,2692	0,2692	0,2243	—0,2243
11	0	0,489	—0,3506	0,3506	0,2922	—0,2922
12	0	0,009	—0,2558	0,2558	0,2132	—0,2132
13	0	—0,246	0	0	0	0
14	1;00184	—	—0,2408	—0,6214	0,3444	0,6615
15	0,76100	—	—0,1559	—0,5755	0,2518	0,6015
16	0,36428	—	0,0324	—0,4876	0,0488	0,4822
17	1,59414	—	—0,4667	—0,7287	0,5881	0,8065
18	1,36079	—	—0,3855	—0,6862	0,4998	0,7504
19	0,74195	—	—0,1231	—0,5639	0,2171	0,5345
20	1,52324	—	—0,5882	—0,5016	0,6718	0,5996
21	0,93505	—	—0,3468	—0,3923	0,4122	0,4501
22	1,21592	—	—0,6806	—0,1760	0,7100	0,2895
23	0,87561	—	—0,5353	—0,1134	0,5542	0,2026
24	0,60642	—	—0,6064	0,1499	0,5814	—0,0488
25	0,25581	—	—0,5116	0,2969	0,4621	—0,2117
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda^2$	$\cdot \bar{\bar{p}}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5

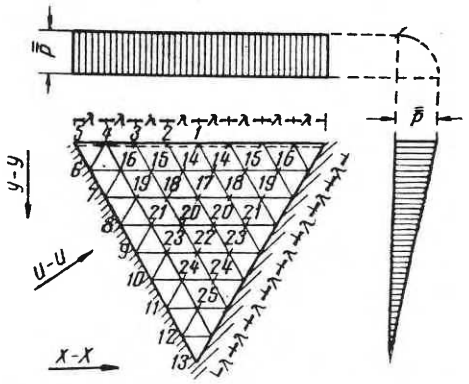


Фиг. 4—141

Случай 11а. Равносторонняя треугольная плита, заделанная по двум сторонам и свободно опертая по третьей стороне

Координаты точек схемы \ Расчетные величины	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{uu}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	0,253	0	0	—	0	0
2	0	0,194	0	0	—	0	0
3	0	0,078	0	0	—	0	0
4	0	—0,069	0	0	—	0	0
5	0	—0,041	0	0	0	0	0
6	0	0,126	0,0427	0,0142	—0,0569	—0,0451	—0,0213
7	0	0,369	0,1537	0,0512	—0,2050	—0,1623	—0,0769
8	0	0,651	0,2815	0,0938	—0,3753	—0,2971	—0,1408
9	0	0,869	0,3612	0,1204	—0,4816	—0,3813	—0,1806
10	0	0,942	0,3466	0,1155	—0,4621	—0,3658	—0,1733
11	0	0,815	0,2317	0,0772	—0,3089	—0,2446	—0,1158
12	0	0,551	0,0759	0,0252	—0,1012	—0,0801	—0,0379
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0,19923	—	—0,0690	—0,0925	—	0,0844	0,1040
15	0,13020	—	—0,0185	—0,0840	—	0,0324	0,0871
16	0,04271	—	0,0448	—0,0548	—	—0,0356	0,0473
17	0,34902	—	—0,0489	—0,1456	—	0,1732	0,1705
18	0,27456	—	—0,0891	—0,1343	—	0,1114	0,1491
19	0,11104	—	0,0525	—0,0847	—	—0,0384	0,0759
20	0,35235	—	—0,1819	—0,1294	—	0,2034	0,1597
21	0,17047	—	0,0114	—0,0742	—	0,0010	0,0728
22	0,31006	—	—0,2386	—0,0697	—	0,2502	0,1095
23	0,19076	—	—0,0715	—0,0324	—	0,0769	0,0444
24	0,15581	—	—0,1558	0,0209	—	0,1523	0,0051
25	0,07583	—	—0,1518	0,0560	—	0,1424	—0,0307
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5

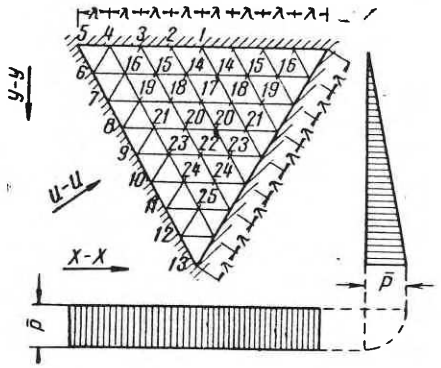


Фиг. 4—142

Случай 11б. Равносторонняя треугольная плита, заделанная по двум сторонам и свободно опертая по третьей стороне

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{uu}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	1,359	0	0	—	0	0
2	0	1,220	0	0	—	0	0
3	0	0,827	0	0	—	0	0
4	0	0,284	0	0	—	0	0
5	0	−0,163	0	0	0	0	0
6	0	0,745	0,1697	0,0566	−0,2262	−0,1791	−0,0848
7	0	1,279	0,4900	0,1633	−0,6534	−0,5173	−0,2450
8	0	0,477	0,6866	0,2289	−0,9155	−0,7247	−0,3433
9	0	1,318	0,6642	0,2214	−0,8856	−0,7011	−0,3321
10	0	0,896	0,4612	0,1537	−0,6149	−0,4868	−0,2306
11	0	0,396	0,2056	0,0685	−0,2741	−0,2170	−0,1028
12	0	0,092	0,0424	0,0141	−0,0565	−0,0448	−0,0212
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0,60141	—	−0,1765	−0,4787	—	0,2563	0,5081
15	0,42489	—	−0,0787	−0,4158	—	0,1480	0,4289
16	0,16966	—	0,0856	−0,2674	—	−0,4100	0,2531
17	0,88314	—	−0,3339	−0,4814	—	0,4142	0,5372
18	0,71617	—	−0,2288	−0,4250	—	0,2996	0,4631
19	0,32037	—	0,0754	−0,2390	—	−0,0356	0,2264
20	0,72033	—	−0,3541	−0,2204	—	0,3908	0,2794
21	0,36621	—	−0,0121	−0,0828	—	0,0259	0,0848
22	0,47637	—	−0,3567	0,0266	—	0,3522	0,0329
23	0,19803	—	−0,1197	0,0783	—	0,1066	−0,0584
24	0,16318	—	−0,1632	0,1638	—	0,1359	−0,1366
25	0,04241	—	−0,0848	0,1327	—	0,0627	−0,1186
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\bar{\bar{p}}\lambda^4}{D}$	$\cdot\bar{\bar{p}}\lambda$	$\cdot\frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot\frac{\bar{\bar{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot\bar{\bar{p}}\lambda^2$	$\cdot\bar{\bar{p}}\lambda^2$	$\cdot\bar{\bar{p}}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5

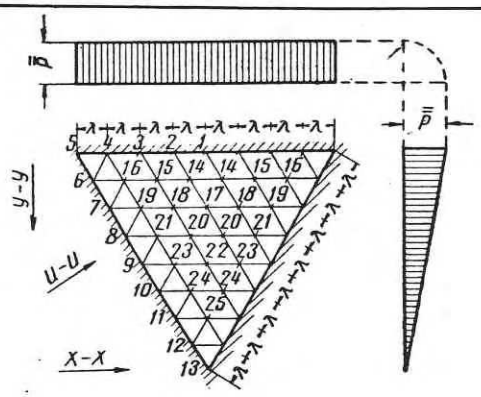


Фиг. 4—143

Случай 12а. Равносторонняя треугольная плита, заделанная по всему контуру

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{uu}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	0,345	0	0,2891	—	—0,0482	—0,2891
2	0	0,281	0	0,2367	—	—0,0394	—0,2367
3	0	0,132	0	0,1202	—	—0,0200	—0,1202
4	0	0,007	0	0,0280	—	—0,0047	—0,0280
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0,061	0,0210	0,0070	—0,0280	—0,0221	—0,0105
7	0	0,271	0,1006	0,0335	—0,1341	—0,1062	—0,0503
8	0	0,565	0,2239	0,0746	—0,2985	—0,2363	—0,1119
9	0	0,819	0,3204	0,1068	—0,4271	—0,3382	—0,1602
10	0	0,926	0,3272	0,1091	—0,4361	—0,3454	—0,1636
11	0	0,816	0,2268	0,0756	—0,3025	—0,2394	—0,1134
12	0	0,496	0,0757	0,0252	—0,1010	—0,0790	—0,0379
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0,10840	—	—0,0393	0,0297	—	0,0343	—0,0232
15	0,06914	—	—0,0089	0,0058	—	0,0080	—0,0048
16	0,02098	—	0,0272	—0,0119	—	—0,0252	0,0074
17	0,25736	—	—0,1124	—0,1048	—	0,1298	0,1235
18	0,20117	—	—0,0655	—0,1004	—	0,0821	0,1113
19	0,07962	—	0,0419	—0,0700	—	—0,0303	0,0630
20	0,29962	—	—0,1553	—0,1334	—	0,1776	0,1593
21	0,14427	—	0,0111	—0,0838	—	0,0029	0,0820
22	0,28610	—	—0,2200	—0,0886	—	0,2348	0,1253
23	0,17610	—	—0,0661	—0,0509	—	0,0746	0,0619
24	0,15113	—	—0,1511	0,0060	—	0,1501	0,0192
25	0,07573	—	—0,1541	0,0500	—	0,1431	—0,0248
Добавочный множитель	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^4}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \frac{\bar{p}\lambda^2}{D}$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$	$\cdot \bar{p}\lambda^2$

Продолжение табл. 4—5



Фиг. 4—144

Случай 126. Равносторонняя треугольная плита, заделанная по всему контуру

Расчетные величины / Координаты точек схемы	w	Q	W_{xx}	W_{yy}	M_{uu}	M_{xx}	M_{yy}
1	0	1,638	0	0,8543	—	—0,1424	—0,8543
2	0	1,491	0	0,7348	—	—0,1225	—0,7348
3	0	1,087	0	0,4366	—	—0,0728	—0,4366
4	0	0,557	0	0,1289	—	—0,0215	—0,1289
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0,503	0,0967	—0,0322	—0,1289	—0,1021	—0,0483
7	0	0,948	0,3170	0,1057	—0,4226	—0,3346	—0,1585
8	0	1,206	0,5048	0,1683	—0,6730	—0,5328	—0,2524
9	0	1,164	0,5372	0,1791	—0,7162	—0,5670	—0,2686
10	0	0,846	0,4014	0,1338	—0,5352	—0,4237	—0,2007
11	0	0,402	0,1907	0,0636	—0,2534	—0,2013	—0,0954
12	0	0,069	0,0420	0,0140	—0,0560	—0,0443	—0,0210
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0,32036	—	—0,0896	—0,1001	—	0,1063	0,1150
15	0,23075	—	—0,0444	—0,1288	—	0,0659	0,1362
16	0,09671	—	0,0373	—0,1235	—	—0,0168	0,1173
17	0,59925	—	—0,2240	—0,3535	—	0,2829	0,3909
18	0,48728	—	—0,1550	—0,3193	—	0,2082	0,3452
19	0,22027	—	0,0467	—0,1950	—	—0,0142	0,1872
20	0,55699	—	—0,2725	—0,2334	—	0,3114	0,2788
21	0,28450	—	—0,0120	—0,1145	—	0,0311	0,1165
22	0,40235	—	—0,2994	—0,0321	—	0,3047	0,0820
23	0,25267	—	—0,1030	0,0207	—	0,0995	—0,0035
24	0,14877	—	—0,1488	0,1175	—	0,1292	—0,0927
25	0,04196	—	—0,0839	0,1144	—	0,0649	—0,1005
Добавочный множитель	$\cdot\frac{\overline{\overline{p}}\lambda^4}{D}$	$\cdot\overline{\overline{p}}\lambda$	$\cdot\frac{\overline{\overline{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot\frac{\overline{\overline{p}}\lambda^2}{D}$	$\cdot\overline{\overline{p}}\lambda^2$	$\cdot\overline{\overline{p}}\lambda^2$	$\cdot\overline{\overline{p}}\lambda^2$

4—4. БАЛКИ, ПЛИТЫ и РАМЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

1. Балки на упругом основании

а) Расчет балок на упругом основании методом теории упругости

1) **Общие положения.** Теория упругости дает возможность решить задачу в двух основных постановках:

в условиях пространственной задачи, когда рассчитываемая балка лежит на поверхности упругого полупространства;

в условиях плоской задачи, когда: а) балка лежит на упругом вертикальном слое (полуплоскости) той же ширины, что и балка (плоское напряженное состояние); б) рассматривается узкая полоска, выделенная в поперечном направлении из бесконечной, однородно нагруженной полосы (плоская деформация).

Если балка располагается на поверхности земли, а затем обсыпается по бокам грунтом, необходимо учитывать эту обсыпку грунтом как боковую пригрузку.

2) **Определение расчетной категории балки.** Показатель гибкости балки для случая плоского напряженного состояния:

$$\lambda = \frac{\pi E_0 b_0 l^3}{4 E_1 J}. \qquad (4-42)$$

В случае плоской деформации:

$$\lambda = \frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{\left(1-\mu_0^2\right)} \cdot \frac{\pi E_0 b_0 l^3}{4 E_1 J}, \qquad (4-43)$$

где l — полудлина балки в $м$;

b_0 — ширина балки в $м$; в случае вырезания полосы принимается $b_0 = 1$;

J — момент инерции балки в $м^4$;

E_1 — модуль упругости материала балки в $т/м^2$;

E_0 — модуль деформации основания в $т/м^2$;

μ_0 и μ_1 — коэффициенты Пуассона соответственно основания и материала балки.

В зависимости от величины λ балка относится к одной из следующих категорий:

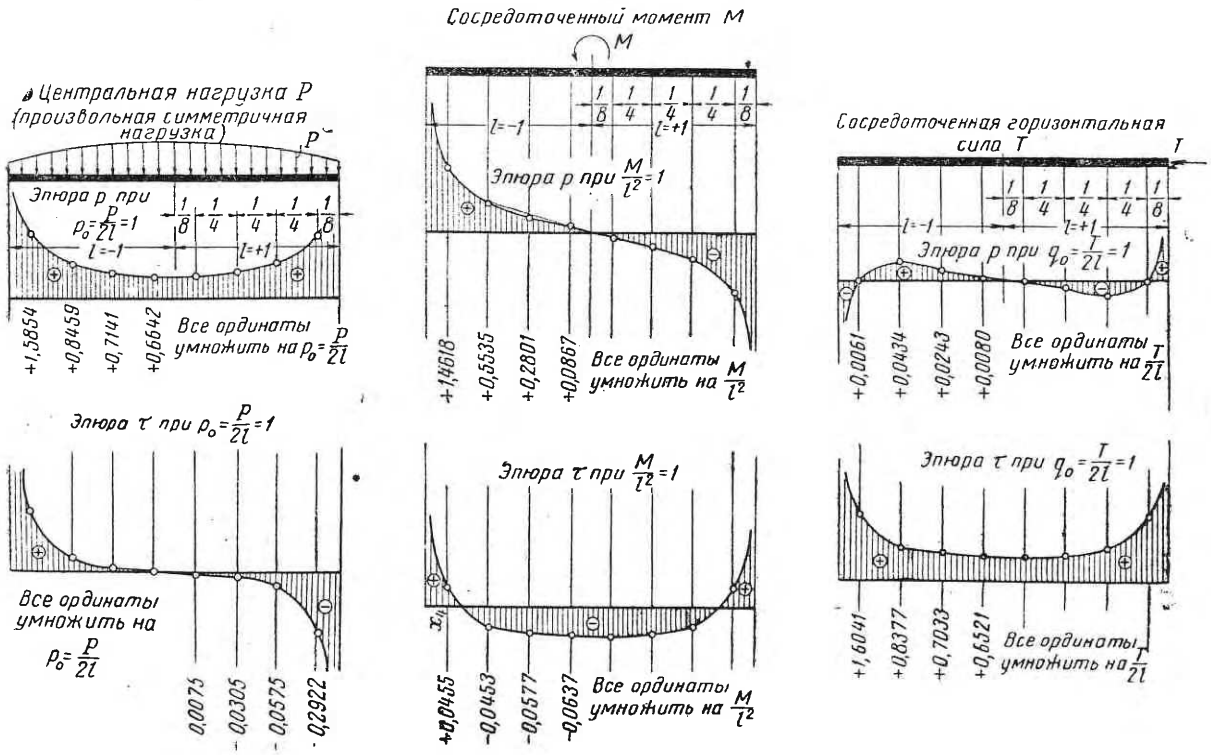
при $\lambda \leqslant 1$ балка с достаточной точностью может приближенно считаться абсолютно жесткой;

при $1 \leqslant \lambda \leqslant 10$ балка рассчитывается как имеющая конечную длину и конечную жесткость;

при $\lambda > 10$ балка с достаточной точностью может считаться бесконечно длинной, если расстояние от силы до ближайшего конца балки, больше чем $2h\sqrt[3]{\frac{E_1}{6_0 E_0}}$, где h — высота балки.

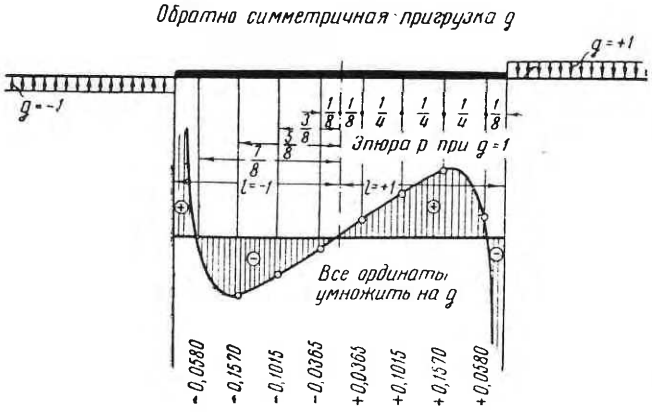
3) **Расчет абсолютно жестких балок.** Для определения реакции основания абсолютно жесткой балки в различных случаях нагрузок и пригрузок можно пользоваться эпюрами: от внешних нагрузок (фиг. 4—145÷4—147), от симметричной и обратно симметричной пригрузки неограниченной длины (фиг. 4—148, 4—149) и ограниченной длины (фиг. 4—150÷4—153). Пригрузка учитывается только в том случае, если ее воздействие начинается после возведения балки.

При определении моментов и поперечных сил удобно распределенную нагрузку заменять сосредоточенными силами.

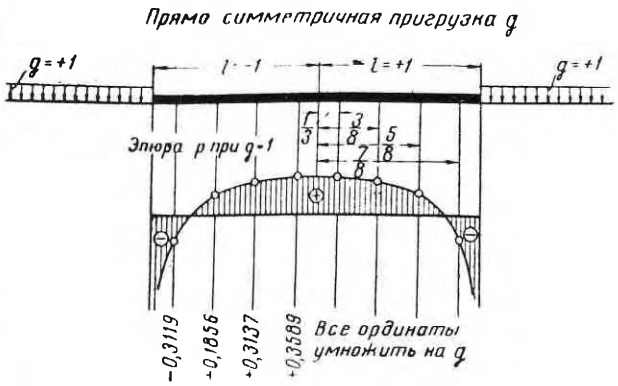


Фиг. 4—145÷4—147. Решения абсолютно жесткой балки

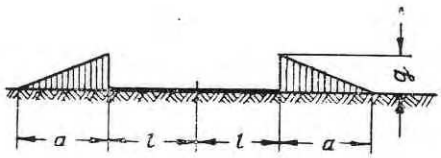
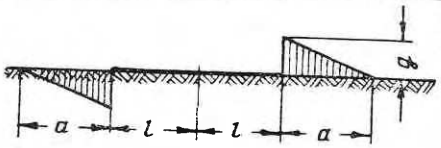
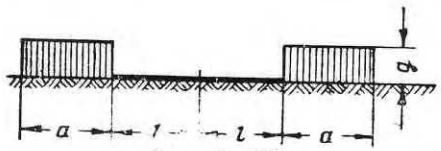
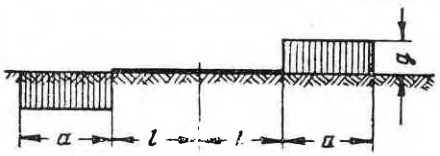
Примечание. Все ординаты эпюр после умножения на соответствующие множители означают интенсивность нормальных $\bar{p}$ и касательных τ напряжений в $т/м^2$ или $кг/см^2$.



Фиг. 4—148



Фиг. 4—149

Схемы пригрузок	Длина пригрузки a	$\xi = \frac{x}{l}$ (левая половина)					
		0	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90
 Фиг. 4—150	0,5l	0,0851	0,0849	0,084	0,0796	0,0624	—0,0630
	1,0l	0,1298	0,1294	0,1257	0,1143	0,0783	—0,1250
	1,5l	0,1596	0,1589	0,1528	0,1358	0,0857	—0,1676
	2,0l	0,1810	0,1802	0,1723	0,1506	0,0901	—0,2007
	3,0l	0,2110	0,2099	0,1992	0,1707	0,0950	—0,2336
	4,0l	0,2120	0,2110	0,2020	0,1750	0,0960	—0,2342
 Фиг. 4—151	1,0l	±0	—0,0155	—0,0465	—0,0770	—0,1035	+0,0010
	2,0l	0	—0,0200	—0,0600	—0,0970	—0,1260	+0,0020
	4,0l	0	—0,0224	—0,0699	—0,1090	—0,1420	+0,0030
 Фиг. 4—152	1,0l	0,194	0,197	0,205	0,162	0,077	—0,1790
	2,0l	0,249	0,252	0,254	0,198	0,082	—0,2570
	4,0l	0,292	0,295	0,292	0,223	0,084	—0,3160
 Фиг. 4—153	1,0l	0	—0,0226	—0,0675	—0,1070	—0,1450	+0,0050
	2,0l	0	—0,0261	—0,0760	—0,1198	—0,1560	+0,0100
	4,0l	0	—0,0280	—0,0805	—0,1250	—0,1590	+0,0150

Примечание. Реактивные давления, соответствующие фактическим значениям g, получаются путем умножения приведенных значений для единичных пригрузок на g. Эпюры реактивных давлений имеют примерно тот же вид, что и на фиг. 4—148, 4—149.

Краевые ординаты эпюр реактивных напряжений в действительности не могут иметь бесконечно большие значения (как это показано на фиг. 4—145÷4—149) из-за пластических деформаций. Предельные значения их с учетом пластических деформаций могут быть определены зависимостью:

$$p_0 = \gamma H_0 \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} e^{\pi \operatorname{tg}\varphi} + c \operatorname{ctg}\varphi \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} e^{\pi \operatorname{tg}\varphi} - 1 \right) \qquad (4-44)$$

или

$$p_0 = A\gamma H_0 + Bc, \qquad (4-45)$$

где φ — угол внутреннего трения грунта основания;
c — коэффициент сцепления;
γ — объемный вес грунта;
H_0 — заглубление фундамента (выемка и засыпка пригрузки).

Начиная от крайних предельных ординат, эпюра реакций должна быть срезана наклонными линиями, соответствующими нижней границе эпюры предельного напряжения. Причем ордината наклонных линий в точке их пересечения (в середине балки) равна[1]:

$$p_0 + 2\gamma l (770^{\operatorname{tg}\varphi} - 1) = p_0 + Dl\gamma. \qquad (4-46)$$

Значения коэффициентов A, B и D следующие.

Коэффициенты	Углы внутреннего трения $\varphi°$						
	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
A	2,46	3,95	6,40	10,65	18,30	33,30	64,40
B	8,28	11,00	14,83	20,70	30,00	46,20	75,40
D	4,46	9,87	20,49	42,39	90,90	208,16	527,12

Увеличение ординат средней части эпюры за счет срезанной производится пропорционально ординатам первоначальной эпюры реактивных давлений с соблюдением при этом условия равновесия внешних сил и моментов.

4) Расчет бесконечно длинных балок. Ординаты эпюр реакций основания, моментов, поперечных сил и осадок бесконечно длинной балки на упругой полуплоскости, нагруженной единичным сосредоточенным грузом, можно определить по табл. 4—6.

[1] М. В. Малышев, Теоретические и экспериментальные исследования несущей способности песчаного основания, издание ВНИИ Водгео, 1953.

Таблица 4—6

Ординаты эпюр для бесконечно длинной балки на упругой полуплоскости, нагруженной единичным сосредоточенным грузом

(Случай плоского напряженного состояния)

Расстояние от точки приложения груза x	Реакция основания (на полную ширину балки) p	Моменты M	Поперечные силы Q	Осадки y
0	+0,306	+0,488	—0,500	1,840
0,5	+0,268	+0,275	—0,355	1,789
1	+0,210	+0,129	—0,235	1,669
2	+0,105	—0,020	—0,081	1,356
3	+0,041	—0,061	—0,011	1,059
4	+0,010	—0,057	+0,013	0,822
5	—0,002	—0,042	+0,016	0,646
6	—0,004	—0,027	+0,013	0,515
7	—0,004	—0,017	+0,008	0,416
8	—0,003	—0,010	+0,005	0,337
9	—0,002	—0,006	+0,003	0,273
10	—0,001	—0,004	+0,002	0,219
Добавочный множитель	$\cdot\sqrt[3]{\frac{E_1 J}{E_0 b_0}}$	$\cdot\sqrt[3]{\frac{E_0 b_0}{E_1 J}}$	$\cdot\sqrt[3]{\frac{E_1 J}{E_0 b_0}}$	$\cdot 1$	$\cdot\frac{1}{E_0 b_0}$

Примечания. 1. Эпюры p, M и y симметричны, эпюра Q — обратно симметрична.

2. В случае плоской деформации следует в множителях вместо E_0 (модуль деформации основания) поставить $\frac{E_0}{1-\mu_0^2}$, где μ_0 — коэффициент Пуассона основания, а вместо E_1 (модуль упругости материала балки) поставить $\frac{E_1}{1-\mu_1^2}$, где μ_1 — коэффициент Пуассона материала балки.

2. Осадки y могут отсчитываться от любого условного горизонта.

3. Ординаты эпюр от единичного груза являются ординатами линий влияния.

Для приближенного решения бесконечно длинной балки от действия сосредоточенной силы эпюру реактивного давления приближенно можно представить в виде треугольника (фиг. 4—154) с основанием

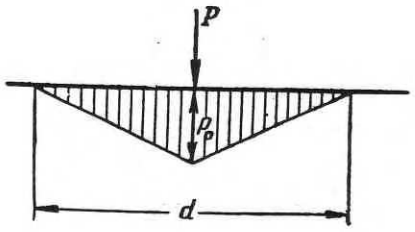
$$d = 6{,}5 \sqrt[3]{\frac{\left(1-\mu_0^2\right)}{\left(1-\mu_1^2\right)} \cdot \frac{E_1 J}{E_0 b_0}} \qquad (4-47)$$

и с ординатой под грузом

$$p_0 = 0{,}31\, P \sqrt[3]{\frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{\left(1-\mu_0^2\right)} \cdot \frac{E_0 b_0}{E_1 J}}; \qquad (4-48)$$

при этом максимальный момент под грузом равен:

$$M_{max} = 0{,}49\, P \sqrt[3]{\frac{\left(1-\mu_0^2\right)}{\left(1-\mu_1^2\right)} \cdot \frac{E_1 J}{E_0 b_0}}. \qquad (4-49)$$



Фиг. 4—154

Формулы (4—47) — (4—49) даны для случая плоской деформации. Для плоского напряженного состояния в приведенных формулах

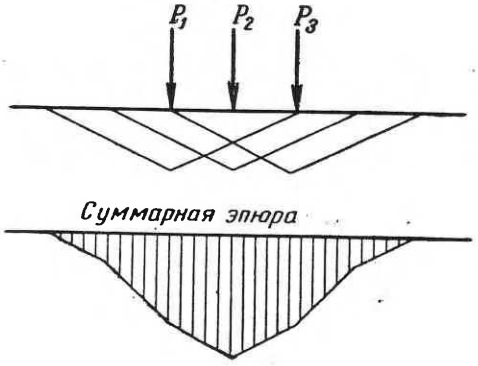
$$\frac{1-\mu_1^2}{1-\mu_0^2}=1.$$

Суммарная эпюра реакций от системы сил P_i получится графическим сложением треугольников, как показано на фиг. 4—155.

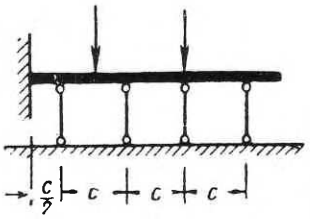
5) **Расчет балок конечной жесткости на упругой полуплоскости методом проф. Б. Н. Жемочкина.** Балка на упругом основании заменяется статически неопределимой системой, где контакт балки с основанием осуществляется при помощи отдельных опорных стержней (фиг. 4—156), расположенных на одинаковых расстояниях c друг от друга. Основная система представляет собой консольную балку с условной заделкой на одном из концов ее (фиг. 4—157) или в любом промежуточном сечении. Давление на грунт от каждого опорного стержня считается равномерно распределенным на ширине c (ступенчатая эпюра). Неизвестными являются усилия в этих стержнях, равные по величине площадям отдельных ступеней эпюры давлений на грунт. Кроме усилий в стержнях, неизвестными являются осадка (y_0) и угол поворота (φ_0) фиктивной заделки балки.

Канонические уравнения составляют, исходя из условий, что суммарные перемещения по направлению каждого разрезанного стержня (см. фиг. 4—157) равны нулю.

Эти перемещения зависят от действия всех сил X, от осадки y_0 (причем положительному y_0 соответствуют перемещения против действия сил X), от угла поворота φ_0 (положительный угол поворота вызывает перемещения против действия сил X) и, наконец, от действия внешней нагрузки.



Фиг. 4—155



Фиг. 4—156

В какой-нибудь точке k (где находится стержень с усилием X_k) перемещение от осадки y_0 равно $-y_0$, а перемещение, вызванное углом поворота, равно $-a_k\varphi_0$ (фиг. 4—159).

Уравнение, выражающее условие, что суммарное перемещение по направлению X_k равно нулю, будет иметь вид:

$$X_1\delta_{k1}+X_2\delta_{k2}+X_3\delta_{k3}+\cdots-y_0-a_k\varphi_0+\Delta_{kp}=0. \qquad (4—50)$$

Здесь δ_{k1}, δ_{k2}, δ_{k3}, ..., — перемещения по направлению силы X_k от действия единичных сил, приложенных в точках *1*, *2*, *3*, ...;

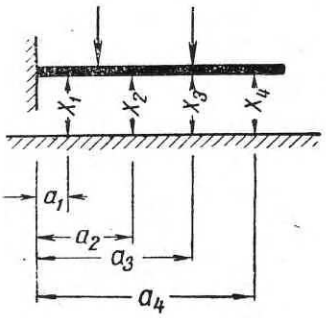
Δ_{kp} — перемещение по направлению X_k от внешней нагрузки (прогиб консоли).

Кроме того, составляются еще два уравнения равновесия: первое — сумма проекций всех сил на вертикальную ось равна нулю, второе — сумма моментов всех сил относительно начальной точки (фиктивной заделки) равна нулю.

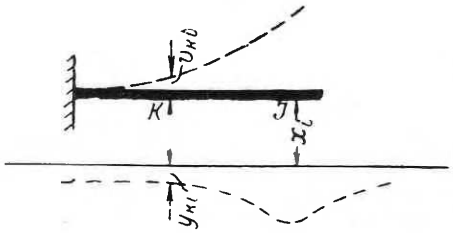
а) Канонические уравнения для схемы, приведенной на фиг. 4—157 имеют вид:

$$\begin{aligned}
&X_1\delta_{11}+X_2\delta_{12}+X_3\delta_{13}+X_4\delta_{14}-y_0-a_1\varphi_0+\Delta_{1p}=0;\\
&X_1\delta_{21}+X_2\delta_{22}+X_3\delta_{23}+X_4\delta_{24}-y_0-a_2\varphi_0+\Delta_{2p}=0;\\
&X_1\delta_{31}+X_2\delta_{32}+X_3\delta_{33}+X_4\delta_{34}-y_0-a_3\varphi_0+\Delta_{3p}=0;\\
&X_1\delta_{41}+X_2\delta_{42}+X_3\delta_{43}+X_4\delta_{44}-y_0-a_4\varphi_0+\Delta_{4p}=0;\\
&-X_1-X_2-X_3-X_4+\Sigma P=0;\\
&-X_1a_1-X_2a_2-X_3a_3-X_4a_4+\Sigma M=0.
\end{aligned}$$

б) Вычисление перемещений. Перемещение в какой-либо точке K (по направлению силы X_k) от действия единичной силы, приложенной в точке J, т. е. δ_{kl}, со-



Фиг. 4—157



Фиг. 4—158

стоит из перемещения от осадки основания y_{ki} и из прогиба балки v_{ki} (фиг. 4—158):

$$\delta'_{ki} = y_{ki} + v_{ki} \qquad (4—51)$$

или после умножения равенства (4—51) на πE_0:

$$_{ki} = F_{ki} + \alpha w_{ki}, \qquad (4—52)$$

где

$$\alpha = \frac{\pi E_0 c^3}{6E_1 J}. \qquad (4—53)$$

Значения функции F_{ki} зависят от расстояний между точками K и J, выраженных в долях c и берутся по табл. 4—7.

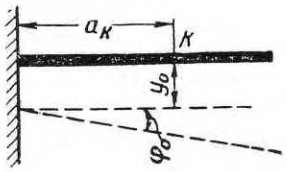
Значения w_{ki} зависят от отношений $\frac{a_k}{c}$ и $\frac{a_i}{c}$ и берутся по табл. 4—8, где a_k и a_i — расстояния от заделки до соответствующих сил X_k и X_i (см. фиг. 4 — 157 ÷ 4 — 158.

Свободные члены уравнений Δ_{ki}, представляющие прогибы балки от внешней нагрузки, могут, как и w_{ki}, находиться по табл. 4—8, если внешние силы приложены в местах опорных стержней; табличные данные следует при этом умножить на α и на величину внешней нагрузки.

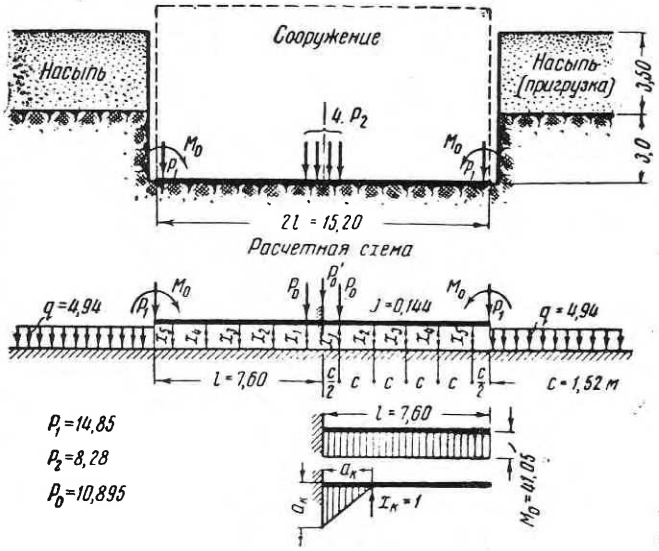
Если внешние силы не совпадают с опорными стержнями, следует каждую силу разложить на две в местах опорных стержней.

Выше рассмотрен случай плоского напряженного состояния. При плоской деформации общий порядок расчета остается тот же. В этом случае необходимо вырезать из балки (ширина которой значительно превышает длину) и из упругого основания полосу шириной в единицу. Коэффициенты уравнений можно находить, как и раньше, по табл. 4—7 и 4—8. Однако коэффициент α здесь равен:

$$\alpha = \frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{\left(1-\mu_0^2\right)} \cdot \frac{\pi E_0 c^3}{6E_1 J}. \qquad (4—54)$$



Фиг. 4—159



Фиг. 4—160

Таблица 4—7

Единичные осадки F_{ki} для упругой полуплоскости

$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}
0	0	6	−6,967	11	−8,181	16	−8,931
1	−3,296	7	−7,276	12	−8,356	17	−9,052
2	−4,751	8	−7,544	13	−8,516	18	−9,167
3	−5,574	9	−7,780	14	−8,664	19	−9,275
4	−6,154	10	−7,991	15	−8,802	20	−9,378
5	−6,602					21	−9,474

Примечания. 1. В таблице приняты обозначения: x — расстояние от той точки, где определяется осадка, до точки, где приложена нагрузка (вернее, до середины участка длиной c, в пределах которого нагрузка предполагается равномерно распределенной); c — длины участков, на которые разбивается балка для расчета.

2. При составлении таблицы нагрузка принята равной единице и равномерно распределенной на участке длиной c.

3. Истинная величина осадки для полуплоскости не может быть найдена, поэтому определяется только разность осадок в данной точке и в точке, достаточно далеко расположенной (на расстоянии d). Эта разность равна:

$$y_{ki} = \frac{1}{\pi E_0}\left(F_{ki} + C\right).$$

Здесь E_0 — модуль деформации основания; C — произвольная постоянная, зависящая от расстояния d. Для случая плоской деформации

$$y_{ki} = \frac{\left(1-\mu_0^2\right)}{\pi E_0}\left(F_{ki} + C\right),$$

где μ_0 — коэффициент Пуассона для основания.

$$C = 2\ln\frac{d}{c} + 2 + 2\ln 2.$$

Таблица 4—8

Единичные прогибы w балки от сосредоточенных единичных сил

$\frac{a_k}{c}$ \ $\frac{a_i}{c}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0,5	0,25	0,625	1	1,375	1,75	2,125	2,5	2,875	3,25	3,625	4	4,375	4,75	5,125	5,5	5,875	6,25	6,625	7	7,375
1	—	2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29
1,5	—	—	6,75	10,125	13,5	16,875	20,25	23,625	27	30,375	33,75	37,125	40,5	43,875	47,25	50,625	54	57,375	60,75	64,125
2	—	—	—	16	22	28	34	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100	106	112
2,5	—	—	—	—	31,25	40,625	50	59,375	68,75	78,125	87,5	96,875	106,25	115,625	125	134,375	143,75	153,125	162,5	171,875
3	—	—	—	—	—	54	67,5	81	94,5	108	121,5	135	148,5	162	175,5	189	202,5	216	229,5	243
3,5	—	—	—	—	—	—	85,75	104,125	122,5	140,875	159,25	177,625	196	214,375	232,75	251,125	269,5	287,875	306,25	324,625
4	—	—	—	—	—	—	—	128	152	176	200	224	248	272	296	320	344	368	392	416
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	182,25	212,625	243	273,375	303,75	334,125	364,5	394,875	425,25	455,625	486	516,375
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	287,5	325	362,5	400	437,5	475	512,5	550	587,5	625
5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	332,75	378,125	423,5	468,875	514,25	559,625	605	650,375	695,75	741,125
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	432	486	540	594	648	702	756	810	864
6,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	549,25	612,625	676	739,375	802,75	866,125	929,5	992,875
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	686	759,5	833	906,5	980	1 053,5	1 127
7,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	843,75	928,125	1 012,5	1 096,875	1 181,25	1 265,625
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 024	1 120	1 216	1 312	1 408
8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 228,25	1 336,625	1 445	1 553,375
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 458	1 579,5	1 701
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 714,75	1 850,125
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 000

Примечания. 1. В таблице приняты обозначения:

a_i — расстояние от заделки балки до места приложения нагрузки;

a_k — расстояние от заделки балки до сечения, где определяется прогиб;

c — длины участков, на которые разбивается балка для расчета.

2. В таблице даны не прогибы v, а величины w.

Действительные же прогибы:

$$v_{ki} = \frac{c^3}{6EI} w_{ki}.$$

Для случая плоской деформации или при расчете плит $v_{ki} = \frac{c^3}{6D} w_{ki}$,

где $D = \frac{h^3}{12(1-\mu_1^2)} E_1$;

h — высота балки или плиты;

μ_1 — коэффициент Пуассона материала балки или плиты.

3. Нагрузка принята равной единице.

Пример расчета методом теории упругости

Сооружение возводится частично в выемке (3,0 *м*) и частично обсыпается грунтом (3,5 *м*), причем обсыпка производится после возведения сооружения, следовательно, она дает пригрузку, которую необходимо учитывать.

Насыпь из всей толщины 3,50 *м* частично погружена в воду (на 1,70 *м*) и частично (1,80 *м*) находится выше уровня грунтовых вод, поэтому интенсивность пригрузки:

$$g = 1.8 \cdot 1,80 + 1,70 \cdot 1,0 = 4,94\ т/м^2.$$

Расчетная схема с нагрузками приведена на фиг. 4—160.

Модуль деформации $E_0 = 2\,500\ т/м^2$.

Показатель гибкости балки по формуле (4—43):

$$\lambda = \frac{\pi E_0 b l^3 \left(1-\mu_1^2\right)}{4E_1 J \left(1-\mu_0^2\right)} =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 2\,500 \cdot 1 \cdot 7,6^3 (1 - 0,167^2)}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,144 (1 - 0,35^2)} = 3 > 1,$$

значит, балка относится к категории балок конечной жесткости. Расчет ведем методом Б. Н. Жемочкина.

а) Расчет от действия нагрузок

По формуле (4—54):

$$\alpha = \frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{\left(1-\mu_0^2\right)} \cdot \frac{\pi E_0 c^3}{6E_1 J} =$$

$$= \frac{(1 - 0,167^2) \cdot 3,14 \cdot 2\,500 \cdot 1,52^3}{(1 - 0,35^2) \cdot 6 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,144} = 0,0169.$$

Коэффициенты уравнений:

$$\delta_{ki} = (F_{ki})_{пр} + (F_{ki})_{лев} + \alpha w_{ki},$$

где $(F_{ki})_{пр}$ и $(F_{ki})_{лев}$ — определяются по табл. (4—7) для сил, расположенных в правой и левой половине балки, w_{ki} — по табл. (4—8).

Например, δ_{23}:

$$\delta_{23} = -3,296 - 6,154 + 0,0169 \cdot 13,5 = -9,222.$$

Остальные коэффициенты уравнений приведены ниже в системе уравнений. Из свободных членов покажем пример определения Δ_{2p}.

От сил P_1 и P_0 — по табл. (4—8), от момента M_0 — при помощи перемножения эпюр согласно фиг. 4—160, умножив перемещение от момента на $\frac{\pi E_0}{1-\mu_0^2}$, получим:

$$\Delta_{2p} = -\alpha \left(w_{2p_1} \cdot P_1 + w_{2p_0} P_0\right) + \frac{\pi E_0}{\left(1-\mu_0^2\right)} \cdot \frac{a_2^2}{2} \times$$

$$\times M_0 \frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{E_1 J} = -0,0169\ (30,375 \cdot 14,85 + 1,0 \cdot 10,895) +$$

$$+ \frac{3,14 \cdot 2\,500}{(1 - 0,35^2)} \cdot \frac{(1,5 \cdot 1,52)^2}{2}\ 41,05 \times$$

$$\times \frac{(1 - 0,167^2)}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,144} = -4,737.$$

Определенные аналогично остальные свободные члены приведены ниже, в системе уравнений.

б) Расчет от действия пригрузок

Влияние пригрузок отражается только на свободных членах, которые будут представлять из себя перемещения основания по направлениям X_k от действия пригрузки, коэффициенты же останутся прежними.

В рассматриваемом примере пригрузкой является вес насыпи. Эта насыпь простирается на значительное расстояние от сооружения, поэтому свободные члены можно определить по формуле, дающей разность перемещений точки поверхности основания, расположенной на расстоянии x и точки в середине балки, от действия симметричной равномерно распределенной пригрузки:

$$\Delta_{kg} = 2gl[(1 + \xi) \ln (1 + \xi) + (1 - \xi) \ln (1 - \xi)]. \quad (4-55)$$

В формуле уже учтено умножение на $\frac{\pi E_0}{1-\mu_0^2}$.

При обратно симметричной пригрузке второе слагаемое было бы со знаком минус.

В рассматриваемом примере свободные члены определяются для следующих значений при g=4,94 $т/м^2$:

$$\xi_i = \frac{x_i}{l};\ \xi_1 = 0,10;\ \xi_2 = 0,30;\ \xi_3 = 0,50;\ \xi_4 = 0,70;\ \xi_5 = 0,90.$$

Для примера определим Δ_{2g}, при $\xi_2 = 0,30$:

$$\Delta_{2g} = 2 \cdot 4,94 \cdot 7,60 (1,30 \ln 1,30 + 0,70 \ln 0,70) = 6,854.$$

Определенные таким образом Δ_{kg} можно сложить со свободными членами от действия нагрузок Δ_{kp} и определить суммарные реактивные давления.

Однако для того, чтобы наглядно показать влияние пригрузок, реактивные давления X_k определены отдельно от действия нагрузок и пригрузок, поэтому в нижеприведенной системе уравнений Δ_{kp} и Δ_{kg} выписаны в виде отдельных слагаемых:

$$-3,292X_1 - 8,030X_2 - 10,295X_3 - 11,686X_4 - 12,701X_5 - y_0 - 0,615 + 0,751 = 0.$$

$$-8,030X_1 - 5,460X_2 - 9,222X_3 - 11,011X_4 - 12,085X_5 - y_0 - 4,737 + 6,854 = 0.$$

$$-10,295X_1 - 9,222X_2 - 6,074X_3 - 9,418X_4 - 10,865X_5 - y_0 - 11,400 + 19,734 = 0.$$

$$-11,686X_1 - 11,011X_2 - 9,418X_3 - 5,827X_4 - 8,770X_5 - y_0 - 19,099 + 40,565 = 0.$$

$$-12,701X_1 - 12,085X_2 - 10,865X_3 - 8,770X_4 - 4,700X_5 - y_0 - 25,328 + 74,194 = 0.$$

$$-X_1 - X_2 - X_3 - X_4 - X_5 + 31,410 + 0 = 0,$$

где $\Sigma P = P_1 + 2P_2 = 14,85 + 2 \cdot 8,28 = 31,41$.

Все коэффициенты отрицательные. Можно было бы переменить знаки на обратные. Но мы поступим иначе: прибавим ко всем коэффициентам постоянное число 12,701. Тогда получим главные перемещения много больше побочных и, кроме того, один из коэффициентов станет равным нулю. Все это упростит решение уравнений. В частности, например, $\delta_{23} = -9,222 + 12,701 = +3,479$. От этого все X_k не изменятся, а изменится лишь y_0.

Здесь же отметим, во избежание ошибок, что при решении обратно симметричной задачи, в отличие от симметричной, ко всем Δ_{kp} можно было бы прибавить[1] число, равное Az_k, где A — постоянное число, z_k — числа, пропорциональные расстоянию от заделки до X_k. Например, для рассматриваемого примера: 0,50; 1,50; 2,5; 3,5 и 4,5. От этого X_k не изменятся, а изменится лишь жесткий поворот условной заделки φ_0, который является неизвестной величиной при решении обратно симметричной задачи.

Вычисленные, как показано выше, коэффициенты и свободные члены сводим в нижеследующую таблицу (см. Б. Н. Жемочкин, О решении системы линейных уравнений, изд. ВИА, 1947 г.).

Коэффициенты, симметричные относительно нисходящей диагонали (в клетках с точками), не вписаны.

№ уравнений	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	y_0	Свободные члены	
							Δ_{kp}	Δ_{kg}
1	+9,409	+4,671	+2,406	+1,015	0	−1	− 0,615	+ 0,751
2	·	+7,241	+3,479	+1,690	+0,616	−1	− 4,737	+ 6,854
3	·	·	+6,627	+3,283	+1,836	−1	−11,400	+19,734
4	·	·	·	+6,874	+3,931	−1	−19,099	+40,565
5	·	·	·	·	+8,001	−1	−25,328	+74,194
6	−1	−1	−1	−1	−1	0	+31,41	0

В результате решения уравнений получаем:

а) от нагрузок

$X_{1p} = 5,22\,m$; $X_{2p} = 5,13\,m$; $X_{3p} = 5,20\,m$; $X_{4p}=5,56\,m$; $X_{5p} = 10,30\,m$;

б) от пригрузок

$X_{1g} = 1,954\,m$; $X_{2g} = 1,846\,m$; $X_{3g} = 1,516\,m$; $X_{4g} = 0,837\,m$; $X_{5g} = -6,154\,m$.

Изгибающий момент в середине балки определяется по формуле:

$$M = c(0,5X_1 + 1,5X_2 + 2,5X_3 + 3,5X_4 + 4,5X_5) + M_{\text{нагр}},$$

где $c = \frac{l}{5} = 1,52\,м$;

$M_{\text{нагр}}$ — момент от нагрузок.

По полученным в результате решения уравнений реактивным силам X_k определим изгибающие моменты:

а) от действия нагрузок

$$M_p = 1,52(0,5\cdot 5,22 + 1,5\cdot 5,13 + 2,5\cdot 5,20 + 3,5\cdot 5,56 + 4,5\cdot 10,30) + 41,05 - 14,85\cdot 7,6 - 8,28(0,25 + 0,75) = +55,50\,тм.$$

б) от действия пригрузок

$$M_g = 1,52(0,5\cdot 1,954 + 1,5\cdot 1,846 + 2,5\cdot 1,516 + 3,50,837 - 4,5\cdot 6,154) = -26,20\,тм.$$

Суммарный момент M=55,5—26,2=+29,30 *тм*;

Примечания. 1. Несимметричные нагрузки и пригрузки разбиваются на симметричные и обратно симметричные.

При симметричных схемах поступают как в примере, а при обратно симметричных:

$$\delta_{ki} = +(F_{ki})_{\text{пр}} - (F_{ki})_{\text{лев}} + \alpha w_{ki};$$

$$\Delta_{kp} = -\alpha\Sigma P_i w_{kp};$$

$$\Delta_{kg} = \sum_{i=1}^{n}[(F_{ki})_{\text{пр}} - (F_{ki})_{\text{лев}}]Q_i,$$

где предполагается, что пригрузка состоит из n обратно симметричных сил по Q_i.

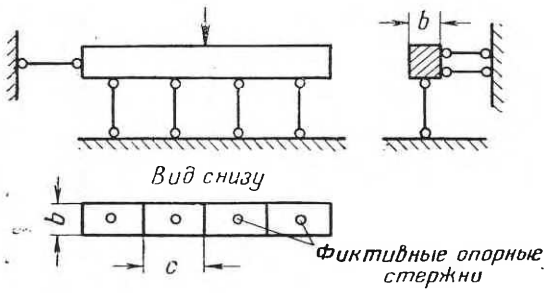
2. Рассмотренный выше пример от действия нагрузок можно решить так же по таблицам М. И. Горбунова-Посадова (см. М. И. Горбунов-Посадов, Расчет конструкций на упругом основании, 1953 г.).

Так, при P_1l=14,85 · 7,60=113,0; P_2l=8,28 · 7,60=63,0, момент в середине балки будет:

$$M_p = -0,31\cdot 113,0 + (0,48 + 0,43)63 - 0,77\,(-41,05) = 54,0\,тм.$$

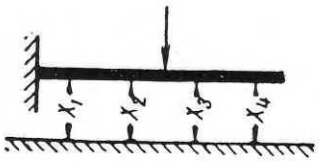
От действия же пригрузок можно решить практически только методом Б. Н. Жемочкина.

6) Расчет балок на упругом полупространстве методом проф. Б. Н. Жемочкина. Балка на упругом полупространстве рассчитывается аналогично балке на упругой полуплоскости. Балка разбивается по длине на равные участки c, в срединах участков предполагаются опорные стержни (фиг. 4—161). Указанные на



Фиг. 4—161

[1] Такое прибавление постоянного числа при симметричной задаче и Az_k — при обратно симметричной возможно только для частных видов рассматриваемых систем уравнений, когда во всех уравнениях симметричной задачи (за исключением уравнения равновесия) содержится один и тот же член y_0, в уравнениях обратно симметричной задачи — φ_0.



Фиг. 4—162

чертеже горизонтальные стержни поставлены для того, чтобы сделать систему неизменяемой, но усилия в них при вертикальной нагрузке равны нулю.

Для балки, показанной на фиг. 4—162, канонические уравнения имеют такой же вид, как и для балки на полуплоскости. Перемещения так же находятся по формуле, аналогичной формуле для полуплоскости:

$$\delta_{ki} = F_{ki} + \alpha w_{ki}. \qquad (4—56)$$

Функция F_{ki} определяется по табл. 4—9 для соответствующих расчетному случаю отношений $\frac{b}{c}$.

Таблица 4—9

Единичные осадки F_{k_i} для упругого полупространства. Нагрузка по прямоугольнику (для расчета балок)

$\frac{x}{c}$	$\frac{c}{x}$	F_{ki}					
		$\frac{b}{c}=\frac{2}{3}$	$\frac{b}{c}=1$	$\frac{b}{c}=2$	$\frac{b}{c}=3$	$\frac{b}{c}=4$	$\frac{b}{c}=5$
0	∞	4,265	3,525	2,406	1,867	1,542	1,322
1	1	1,069	1,038	0,929	0,829	0,746	0,678
2	0,500	0,508	0,505	0,490	0,469	0,446	0,424
3	0,333	0,336	0,335	0,330	0,323	0,315	0,305
4	0,250	0,251	0,251	0,249	0,246	0,242	0,237
5	0,200	0,200	0,200	0,199	0,197	0,196	0,193
6	0,167	0,167	0,167	0,166	0,165	0,164	0,163
7	0,143	0,143	0,143	0,143	0,142	0,141	0,140
8	0,125	0,125	0,125	0,125	0,124	0,124	0,123
9	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,110
10	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,099
11	0,091						
12	0,083			0,091			
13	0,077			0,083			
14	0,071			0,077			
15	0,067			0,071			
16	0,063			0,067			
17	0,059			0,063			
18	0,056			0,059			
19	0,053			0,056			
20	0,050			0,053			
				0,050			

Примечания. 1. В таблице приняты обозначения:
x — расстояние от той точки, где определяется осадка, до точки, где приложена нагрузка (вернее, до середины загруженного участка);
b — ширина балки;
c — длины участков, на которые разбивается балка для расчета.
2. При составлении таблицы нагрузка принята равной единице и равномерно распределенной по площади прямоугольника $b \times c$.
3. Истинная величина осадки равна:

$$y_{k_i} = \frac{1-\mu_0^2}{\pi E_0 c} F_{ki},$$

где E_0 — модуль деформации основания;
μ_0 — коэффициент Пуассона для основания.

Коэффициент α для полупространства:

$$\alpha = \frac{(1-\mu_1^2)\,\pi E_0 c^4}{(1-\mu_0^2)\,6E_1 J}. \qquad (4—57)$$

Значения функции w_{ki} попрежнему берутся по табл. 4—8.

б) О методах расчета балок на упругом основании по гипотезе коэффициента постели

Расчет балок на упругом основании по гипотезе коэффициента постели широко применялся ранее и только последние 20 лет эта гипотеза почти полностью вытеснена гипотезой линейно деформируемой среды, применение которой приводит к расчетам по теории упругости (см. выше).

Гипотеза коэффициента постели, допускающая прямую пропорциональность между удельным давлением (p) на грунт и его осадкой (y), т. е. $p = k_0 y$ предполагает, что соседние незагруженные точки поверхности грунта остаются несмещенными. Как показывают наблюдения за осадками сооружений, последнее предположение не соответствует действительности даже в песчаных грунтах. Кроме того, принятие этой гипотезы не дает возможности учитывать влияние боковой пригрузки, которое в некоторых случаях может быть значительным, что видно из рассмотренного выше примера.

Основным же недостатком этой гипотезы является то, что коэффициент пропорциональности k_0, называемый иногда коэффициентом постели, является неопределенной величиной. Этот коэффициент зависит от размера сооружения в плане, формы и жесткости фундамента, от величины и расположения нагрузки на балке, характеристик грунта и других факторов.

Однако, если сооружение располагается на упругом слое, подстилаемом скальным основанием и если мощность сжимаемого слоя не превышает половины ширины подошвы рассчитываемого сооружения (при плоской деформации), расчет балки на упругом основании может быть произведен методом коэффициента постели. В этом случае влияние боковой пригрузки становится практически незначительным, а значение коэффициента постели может быть установлено как среднее между значениями, определяемыми формулами:

$$k_0 = \frac{E_0}{(1-\mu_0^2)\,H_{сл}}; \qquad (4—58)$$

$$k_0 = \frac{(1-\mu_0)\,E_0}{(1+\mu_0)(1-2\mu_0)\,H_{сл}}. \qquad (4—59)$$

где E_0 и μ_0 — модуль деформации и коэффициент Пуассона основания;
$H_{сл}$ — мощность сжимаемого слоя.

Первая из этих формул предполагает, что между сжимаемым слоем и подстилающим нет трения, а вторая, что сжимаемый слой вовсе не может перемещаться в горизонтальном направлении вдоль подстилающего скального основания.

При очень малой мощности сжимаемого слоя меньшей половины ширины опытного штампа — испытание не может дать значение модуля деформации, а дает только значение коэффициента постели, определяемое по формуле:

$$k_0 = \frac{P}{yF_ш}; \qquad (4—60)$$

где P — полная нагрузка на штамп;
$F_ш$ — его площадь;
y — осадка.

Наиболее простые и удобные методы расчета, основанные на гипотезе коэффициента постели, следующие:
1) метод начальных параметров[1] (см. В. А. Киселев, Балки и рамы на упругом основании, 1936 г.);
2) метод П. Л. Пастернака (см. В. В. Кречмер, Расчет и проектирование плоских железобетонных фундаментов, 1937 г.);
3) метод Б. Н. Жемочкина, коротко излагаемый ниже.

При простой нагрузке и постоянной жесткости балки наиболее простое решение дает метод начальных параметров, при переменной жесткости—метод Пастернака, а при переменной жесткости, сложных нагрузках и при переменном коэффициенте постели можно рассчитать балку только методом Б. Н. Жемочкина.

Расчет балок на упругом основании по гипотезе коэффициента постели методом Б. Н. Жемочкина. Сущность метода излагается применительно к расчетной системе, приведенной на фиг. 4—160, для оснований, представляющих упругий слой.

Преимущество этого метода по сравнению с другими заключается в том, что им можно учесть неоднородность основания на различных участках по длине балки, что довольно часто встречается на практике.

Допустим, что для рассматриваемой схемы имеем симметричную относительно оси балки неоднородность основания, а именно: на участках опорных стержней X_1, X_2 и X_3 — коэффициент постели k_1, а на участках X_4 и X_5—k_2.

Канонические уравнения имеют тот же вид, что было в примере применительно к методу теории упругости, изменяются лишь значения δ_{ki} и Δ_{ki}.

Коэффициенты δ_{ki} и δ_{kk}

Суммарные перемещения:

$$\left.\begin{aligned} \delta'_{ki} &= v_{ki}; \\ \delta'_{kk} &= y'_{kk} + v_{kk}, \end{aligned}\right\} \qquad (4—61)$$

так как по гипотезе коэффициента постели $y'_{ki} = 0$.

Если интенсивность напряжения от единичной силы $p = \frac{1}{c}$, то перемещение основания $y'_{kk} = \frac{1}{ck_n}$, где c — расстояние между опорными стержнями.

Прогиб балки от единичной силы остается без изменения, по Б. Н. Жемочкину:

$$v_{ki} = \frac{\left(1-\mu_1^2\right)c^3}{6E_1J} w_{ki},$$

где w_{ki} — определяются по табл. 4—8.

Умножив выражения (4—61) на $k_1 c$ и подставив соответствующие значения, получаем:

$$k_1 c\delta'_{ki} = k_1 \frac{\left(1-\mu_1^2\right)c^4}{6E_1J} w_{ki};$$

$$k_1 c\delta'_{kk} = \frac{k_1}{k_n} + k_1 \frac{\left(1-\mu_1^2\right)c^4}{6E_1J} w_{kk}.$$

Обозначим:

$$\delta_{ki} = k_1 c\delta'_{ki}; \quad \alpha' = k_1 \frac{\left(1-\mu_1^2\right)}{6E_1J} c^4. \qquad (4—62)$$

Тогда

$$\left.\begin{aligned} \delta_{ki} &= \alpha' w_{ki} \\ \delta_{kk} &= y_{kk} + \alpha' w_{kk}, \end{aligned}\right\} \qquad (4—63)$$

где $y_{kk} = \frac{k_1}{k_n}$;

Для рассматриваемого примера:

$$y_{11} = y_{22} = y_{33} = \frac{k_1}{k_1} = 1; \; y_{44} = y_{55} = \frac{k_1}{k_2}.$$

Свободные члены. Прогиб балки от внешней нагрузки определяется как обычно, например, от сосредоточенной силы P:

$$\Delta_{kp} = -k_1 cP \frac{c^3\left(1-\mu_1^2\right)}{6E_1J} w_{kp} = -P\alpha' w_{kp}. \qquad (4—64)$$

Свободные члены — перемещения основания от пригрузок равны нулю ввиду принятия гипотезы коэффициента постели. Вычисленные таким путем δ_{ki} и Δ_{kp} все же могут иметь малые абсолютные значения и неудобны для решения уравнений. От этого неудобства можно избавиться, если все δ_{ki} и Δ_{kp} одновременно умножить на одно и то же число, например, на 10. От этого X_k не изменится, а увеличится во столько же раз только y_0, что не имеет значения для рассматриваемой задачи.

О расчете балок на упругом слое. Балки, расположенные на упругом слое, подстилаемом скальным основанием, с допустимой практической точностью можно также решать методом теории упругости как балку, расположенную на упругой полуплоскости безграничной глубины, если толщина слоя больше длины балки (или ширины фундамента при плоской деформации).

Если же толщина упругого слоя меньше полудлины балки, то фундамент можно рассчитывать, как сказано выше, методами, основанными на гипотезе коэффициента постели.

Кроме того, можно пользоваться методом теории упругости по Б. Н. Жемочкину, использовав для определения перемещений поверхности упругого слоя работу О. Я. Шехтер (см. Гидротехническое строительство № 10, 1937 г.).

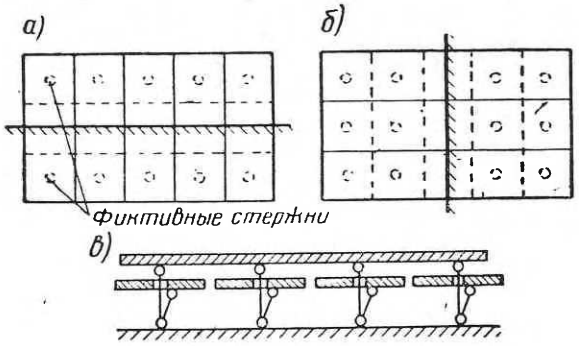
2. Плиты на упругом основании

Ниже даются указания по расчету прямоугольных плит на упругом основании приближенным методом проф. Б. Н. Жемочкина. Более точное решение плит дается М. И. Горбуновым-Посадовым [2], но ввиду сложности метода, он здесь не приводится.

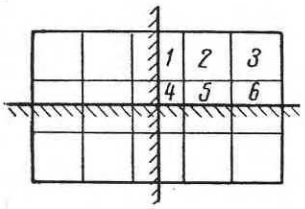
а) Расчет плит по методу проф. Б. Н. Жемочкина

При расчете плит на упругом основании общий порядок решения задачи остается тот же, что и при расчете балок.

[1] Метод начальных параметров был предложен в разное время Н. Н. Пузыревским (Расчеты фундаментов, Петроград, 1923 г.), Б. Н. Жемочкиным (Расчет одежд откосов, изд. МИИТ, 1928 г.), Г. Д. Дутовым (О расчете балки на упругом основании, Стройиздат, 1929 г.) и А. Н. Крыловым (О расчете балок на упругом основании, изд. Академии наук, 1931 г.).



Фиг. 4—163



Фиг. 4—164

Плита заменяется рядом перекрещивающихся балок (фиг. 4—163, *а, б, в*). При применении этого приема не учитываются крутящие моменты в плите. Связь между балками предполагается только в местах пересечения их осей, где помещаются опорные стержни (фиктивные стержни).

Следует считать, что обе системы балок имеют свои опорные стержни (см. фиг. 4—163,*в*), т. е. в середине каждого квадрата (или прямоугольника) будут два опорных стержня.

Осадки основания (F_{ki}) определяются по табл. 4—10.

При составлении таблицы принято, что нагрузка распределяется не по площадям прямоугольников, а по площадям равновеликих кругов.

Прямоугольные плиты на упругом основании характеризуются показателем жесткости:

$$r = \frac{3\pi F a E_0 \left(1-\mu_1^2\right)}{E_1 h^3 \left(1-\mu_0^2\right)}, \qquad (4-65)$$

где a — полудлина плиты (по большей стороне);
F — площадь плиты;
h — толщина плиты.

Квадратную плиту можно рассчитывать как абсолютно жесткую при $r \leqslant 10$, прямоугольную плиту при $r \leqslant \frac{8}{\sqrt{\alpha}}$,

где $\alpha = \frac{2a}{2b}$ — отношение сторон плиты.

Для примера возьмем прямоугольную плиту, нагруженную какой-либо симметричной нагрузкой (фиг. 4—164), заделку наметим в серединах балок в точках *1, 4, 5* и *6*. За неизвестные примем силы X и осадки точек *1, 4, 5* и *6*.

Неизвестными будут: шесть неизвестных сил, приложенных к системе продольных балок (обозначим их X_1, X_2,..., X_6), шесть неизвестных сил, приложенных к системе поперечных балок (обозначим их X_{I}, X_{II}, ..., X_{VI}) и четыре — неизвестные осадки. Всего 6+6+4=16 неизвестных (при обратно симметричной нагрузке вместо осадок неизвестными будут углы поворота).

Таблица 4—10

Единичные осадки для упругого полупространства. Нагрузка по площади круга (для расчета плит и балок ломаного очертания в плане)

$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}	$\frac{x}{c}$	F_{ki}
0	3,545	1,6	0,635	2,8	0,359	4,0	0,251
0,5	2,682	1,7	0,597	2,9	0,346	4,1	0,244
0,6	1,984	1,8	0,563	3,0	0,335	4,2	0,239
0,7	1,589	1,9	0,532	3,1	0,324	4,3	0,233
0,8	1,348	2,0	0,505	3,2	0,314	4,4	0,228
0,9	1,176	2,1	0,481	3,3	0,304	4,5	0,223
1,0	1,045	2,2	0,458	3,4	0,295	4,6	0,218
1,1	0,942	2,3	0,438	3,5	0,287	4,7	0,213
1,2	0,859	2,4	0,420	3,6	0,279	4,8	0,209
1,3	0,789	2,5	0,403	3,7	0,271	4,9	0,204
1,4	0,730	2,6	0,387	3,8	0,264	5,0	0,200
1,5	0,679	2,7	0,372	3,9	0,257	Далее $F=\frac{c}{x}$	

Примечания. 1. В таблице приняты обозначения:
x — расстояние от той точки, где определяется осадка, до точки, где приложена нагрузка (вернее, до центра круга, по площади которого распределена нагрузка);
c — стороны квадратов (на которые разбивается плита для расчета) равновеликих кругам. Если плита разбивается на прямоугольники, то c— сторона квадратов, равновеликих прямоугольникам и кругам).

2. При составлении таблицы нагрузка принята равной единице и равномерно распределенной по площади круга.

3. Истинная величина осадки

$$y_{ki} = \frac{1-\mu_0^2}{\pi E_0 c} F_{ki},$$

где E_0 — модуль деформации для основания;
μ_0 — коэффициент Пуассона для основания.

Уравнение, выражающее условие, что суммарное перемещение по направлению силы X_2 (т. е. по направлению усилия в стержне, помещенного в точке *2* и соединенного с продольной балкой *1—3*) равно нулю, имеет вид:

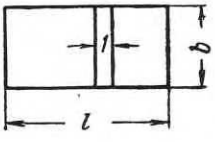
$$X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + X_3\delta_{23} + X_4\delta_{24} + X_5\delta_{25} + X_6\delta_{26} + X_{\text{I}}\delta_{2\,\text{I}} + X_{\text{II}}\delta_{2\,\text{II}} + X_{\text{III}}\delta_{2\,\text{III}} + X_{\text{IV}}\delta_{2\,\text{IV}} + X_{\text{V}}\delta_{2\,\text{V}} + X_{\text{VI}}\delta_{2\,\text{VI}} - y_1 = 0.$$

Если внешняя нагрузка приложена к балке *1—3*, то в уравнение войдет еще член Δ_{2p}. Нагрузку можно с одинаковым правом приложить как к той, так и к другой системе балок.

Перемещения δ_{22}, δ_{23} зависят от деформации основания и от прогиба продольной балки *1—3*. Все же остальные перемещения зависят только от деформации основания, так как прочие силы X к балке *1—3* непосредственно не приложены. Конечно, при определении деформаций основания нужно учитывать единичные силы, действующие на основание во всех четвертях плиты.

Если не преследуется особенно большой точности расчета, можно пойти дальше в смысле упрощения.

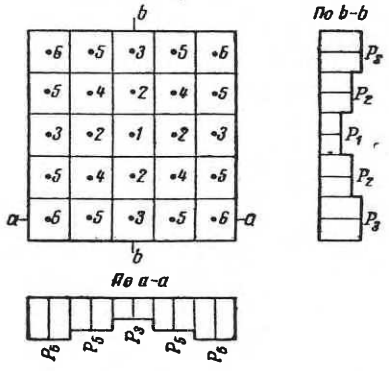
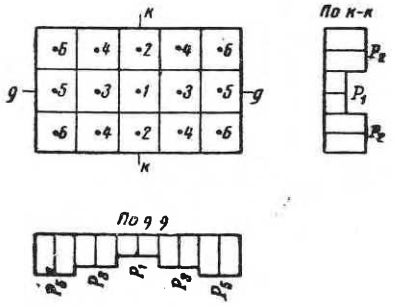
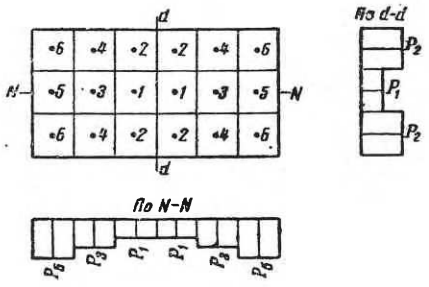
Плиту прямоугольного очертания размерами l и b (фиг. 4—165) можно рассчитывать дважды. Сначала плиту рассчитывают в продольном направлении, как



Фиг. 4—165

Таблица 4—11

Реакции основания для абсолютно жестких плит, нагруженных симметричной нагрузкой

Схема плит и эпюры реакции грунта	Интенсивность реакций основания					
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
Квадратная плита  *Фиг. 4—166*	0,472	0,678	1,062	0,538	1,100	1,696
Прямоугольная плита (3 : 5)  *Фиг. 4—167*	0,495	0,937	0,510	0,967	1,020	1,421
Прямоугольная плита (1 : 2)  *Фиг. 4—168*	0,531	0,941	0,549	0,972	1,143	1,485

Примечание. Табл. 4—11 служит для определения равнодействующей реакции упругого основания в пределах квадрата со стороной c; для этого необходимо приведенные в таблице значения p_i умножить на qc^2, где q — среднее давление на грунт.

широкую балку длиной l и шириной b, пренебрегая изгибом в поперечном направлении. После этого делают расчет плиты в поперечном направлении, вырезая плиту в 1 *м* (здесь будет случай плоской деформации). Затем вносят поправку в первоначальные данные, принимая во внимание неравномерность нагрузки на основание не только в продольном, но теперь и в поперечном направлении. Эпюра нагрузки на основание представится некоторой поверхностью.

б) Расчет абсолютно жестких плит

При расчете абсолютно жестких плит, нагруженных центральной нагрузкой, можно пользоваться табл. 4—11.

3. Рамы на упругом основании

Расчет рамы на упругом основании методом теории упругости приводится ниже, на примере, в общем виде.

Дана двухъячейковая железобетонная галерея. Здесь имеет место случай плоской деформации. Жесткость ригелей и стоек предполагаем постоянной. Между нижним ригелем рамы и основанием — девять опорных стержней с расстояниями между ними c. Основная система принимается по фиг. 4—169. Заделка — в середине нижнего ригеля.

Любую нагрузку можно разбить на симметричную и обратно симметричную.

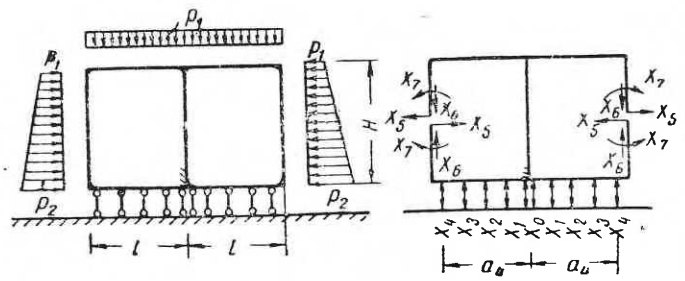
При симметричной нагрузке дополнительным неизвестным в фиктивной заделке будет осадка y_0. При обратно симметричной — угол поворота φ_0. Число неизвестных опорных реакций в первом случае — пять: X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, а во втором случае—четыре: X_1, X_2, X_3, X_4. Рама сама по себе имеет шесть неизвестных, но имея в виду разбивку нагрузки на симметричную и обратно симметричную, можно ограничиться тремя групповыми неизвестными: X_5, X_6, X_7. Таким образом, общее число неизвестных будет равно девяти. При симметричном загружении система уравнений будет иметь вид:

$$X_0\delta_{00}+X_1\delta_{01}+X_2\delta_{02}+X_3\delta_{03}+X_4\delta_{04}-y_0=0;$$

$$X_0\delta_{10}+X_1\delta_{11}+X_2\delta_{12}+X_3\delta_{13}+X_4\delta_{14}+X_5\delta_{15}+X_6\delta_{16}+$$
$$+X_7\delta_{17}-y_0+\Delta_{1p}=0;$$

$$X_0\delta_{20}+X_1\delta_{21}+X_2\delta_{22}+X_3\delta_{23}+X_4\delta_{24}+X_5\delta_{25}+X_6\delta_{26}+$$
$$+X_7\delta_{27}-y_0+\Delta_{2p}=0;$$

$$X_0\delta_{30}+X_1\delta_{31}+X_2\delta_{32}+X_3\delta_{33}+X_4\delta_{34}+X_5\delta_{35}+X_6\delta_{36}+$$
$$+X_7\delta_{37}-y_0+\Delta_{3p}=0;$$



Фиг. 4—169

$$X_0\delta_{40}+X_1\delta_{41}+X_2\delta_{42}+X_3\delta_{43}+X_4\delta_{44}+X_5\delta_{45}+X_6\delta_{46}+$$
$$+X_7\delta_{47}-y_0+\Delta_{4p}=0;$$

$$0+X_1\delta_{51}+X_2\delta_{52}+X_3\delta_{53}+X_4\delta_{54}+X_5\delta_{55}+X_6\delta_{56}+$$
$$+X_7\delta_{57}+\Delta_{5p}=0;$$

$$0+X_1\delta_{61}+X_2\delta_{62}+X_3\delta_{63}+X_4\delta_{64}+X_5\delta_{65}+X_6\delta_{66}+$$
$$+X_7\delta_{67}+\Delta_{6p}=0;$$

$$0+X_1\delta_{71}+X_2\delta_{72}+X_3\delta_{73}+X_4\delta_{74}+X_5\delta_{75}+X_6\delta_{76}+$$
$$+X_7\delta_{77}+\Delta_{7p}=0;$$

$$-X_0-X_1-X_2-X_3-X_4+\frac{\Sigma P}{2}=0.$$

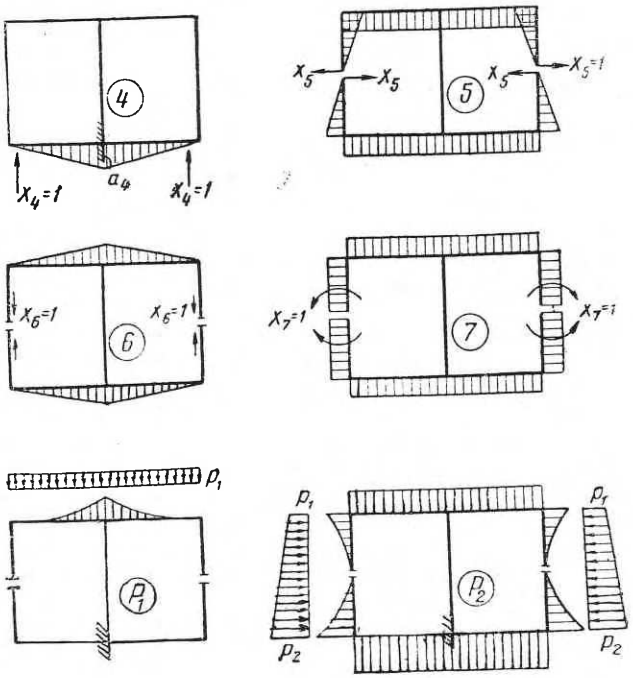
Перемещения по направлениям сил $X_0,\ldots,X_4$ от действия единичных сил, приложенных в точках $0,\ldots,4$, находят, как обычно, по формуле:

$$\delta_{ki}=F_{ki}+\alpha w_{ki},$$

используя для F_{ki} и w_{ki} табл. 4—7 и 4—8. Перемещения по направлениям $X_0,\ldots,X_4$ от X_5, X_6 и X_7 (причем эти перемещения не зависят от осадки основания) вычисляют по формуле Максвелла — Мора или, так как элементы рамы прямолинейного и постоянного сечения, перемножением эпюр.

Эти перемещения, найденные перемножением эпюр, следует умножить на величину $\frac{\pi E_0}{1-\mu_0^2}$. Коэффициент α здесь вводить уже не надо, ввиду того что он относится лишь к перемещениям, определяемым по таблицам.

Подобным же порядком вычисляют и перемещения от нагрузки. Некоторые эпюры показаны на фиг. 4—170.



Фиг. 4—170

ЛИТЕРАТУРА

1. Галеркин. Б. Г., Упругие тонкие плиты, ОНТИ, 1933.

2. Горбунов-Посадов М. И., Балки и плиты на упругом основании, Машстройиздат, 1949.

3. Горбунов-Посадов М. И., Таблицы для расчета балок на упругом основании, Госстройиздат, 1939.

4. Жемочкин Б. Н. и Пащевский Д. П., Курс строительной механики, ч. III, Статика сооружений, Гос. издательство архитектуры и градостроительства, 1950.

5. Жемочкин Б. Н., Синицын А. П., Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании, Стройиздат, 1947.

6. Киселев В. А., Балки и рамы на упругом основании, ОНТИ, 1936.

7. Прокофьев И. П., Теория сооружений, Трансжелдориздат, 1947—1948.

8. Рабинович И. М., Курс строительной механики стержневых систем, Госстройиздат, 1950.

9. Смотров А., Решение плит, нагруженных сплошной нагрузкой по закону трапеции, ОНТИ, 1936.

10. Флорин В. А., Расчеты оснований гидротехнических сооружений, Госстройиздат, 1948.

Зак. 125

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ ОСАДОК ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ГЛИНИСТЫХ (СВЯЗНЫХ) ГРУНТАХ

5—1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Осадками называют вертикальные деформации оснований сооружений, не сопровождающиеся коренным изменением сложения грунта.

Вертикальные деформации, вызываемые коренным изменением сложения грунта, например уплотнением рыхлых песчаных грунтов вследствие сотрясения, выпиранием грунта из-под сооружения и т. п., называются просадками. Ниже рассматривается вопрос лишь об определении осадок. Определение осадок производится с целью правильного выбора конструкции и уточнения вопросов, связанных с устойчивостью сооружений.

Различают полную осадку, соответствующую полной стабилизации процесса уплотнения грунта, и промежуточную осадку, соответствующую определенному моменту времени до наступления стабилизации.

Процесс уплотнения связных грунтов протекает очень медленно и может сказаться на нормальной работе сооружения различным образом, поэтому расчет осадок ответственных сооружений и протекания осадки во времени для связных грунтов обязателен. Особое значение имеет характер изменения осадок при определении устойчивости сооружения на сдвиг, так как на глинистых грунтах устойчивость сооружения на сдвиг увеличивается по мере затухания осадки.

5—2. ИСХОДНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

1. Необходимые данные для расчета осадок

К расчету осадок можно приступить, если задано изменение во времени эпюры нагрузок, действующих на поверхность основания, и определены строительные свойства и мощность уплотняемых пластов грунта.

Для определения изменения во времени эпюры нагрузок, действующих на поверхность основания, необходимо принять во внимание следующие факторы: а) размеры и форму сооружения; б) расположение соседних сооружений; в) глубину строительного котлована; г) уровни и режим грунтовых вод; д) календарный план строительных работ; е) силы, действующие на основание после окончания строительства (до заполнения водохранилища) и в период нормальной эксплуатации.

Строительные свойства уплотняемого грунта должны быть представлены: а) общим описанием геологического строения основания и структурных особенностей породы; б) компрессионными кривыми с ветвями вторичного сжатия после разгрузки для образцов, взятых с ненарушенной структурой; места взятия проб и их количество назначаются в зависимости от предполагаемых размеров обжимаемой толщи; в) таблицей физических и механических свойств грунта (объемный вес, коэффициент фильтрации, влажность, число пластичности, пористость, модуль сжимаемости и др.).

2. Учет снятого бытового давления

Расчетная нагрузка на основание при учете бытового давления, по предложению некоторых авторов [8], определяется по формуле:

$$p = p_{\text{п}} - \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) p_{\text{б}}, \qquad (5-1)$$

где p — расчетная нагрузка в *кг/см²*;

$p_{\text{п}}$ — полное давление, передаваемое подошвой фундамента грунту, в *кг/см²*;

E_1 — модуль сжимаемости, полученный по ветви первичного сжатия при испытании грунта, в *кг/см²*;

E_2 — модуль сжимаемости, полученный по ветви вторичного сжатия после разгрузки, в *кг/см²*;

$p_{\text{б}}$ — бытовое давление от веса снятого грунта в *кг/см²*, определяемое по формуле:

$$p_{\text{б}} = \gamma h; \qquad (5-2)$$

γ — объемный вес грунта в *кг/см³* (в случае, когда уровень грунтовых вод находится выше отметки дна котлована, следует учесть взвешивание грунта в воде);

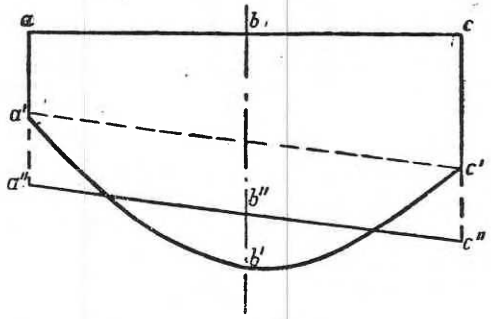
h — глубина заложения основания сооружения в *см*.

В том случае, когда не происходит подъема дна котлована после снятия бытового давления, т. е. $E_2 = \infty$, формула (5—1) принимает вид:

$$p = p_{\text{п}} - p_{\text{б}}. \qquad (5-3)$$

3. Учет жесткости фундамента

Расчет осадки обычно производится для определенных точек характерных сечений фундамента. В случае нежесткого фундамента эпюра осадок принимается в соответствии с результатами расчета.



Фиг. 5—1. Эпюры осадок сооружений

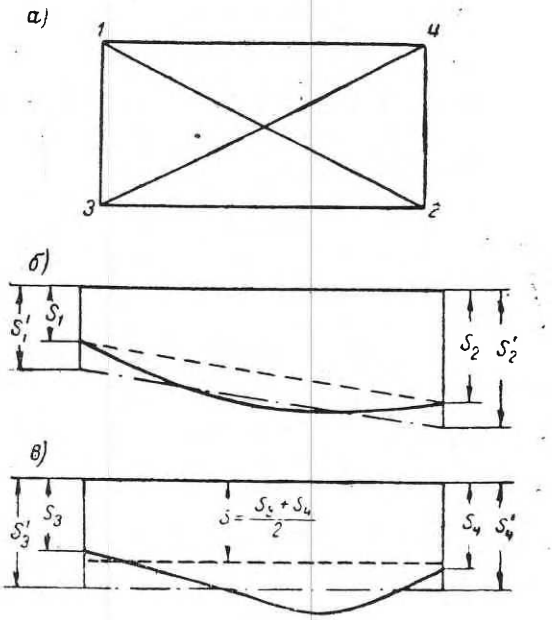
a' b' c' — осадка нежесткого сооружения;
a'' b'' c'' — осадка жесткого сооружения

Построение эпюры осадок для жесткого сооружения производят приближенно, графически, руководствуясь при этом следующими соображениями:

а) объем эпюры осадок жесткого сооружения должен быть равен объему эпюры осадок нежесткого сооружения;

б) наклон жесткого фундамента при плоской задаче должен быть равным наклону хорды, соединяющей крайние ординаты эпюры осадок, вычисленной для нежесткого сооружения (фиг. 5—1);

в) подошва жесткого фундамента, прямоугольного в плане при пространственной задаче должна быть принята параллельной плоскости, проведенной через концы ординат угловых точек эпюры осадок (максимальной, минимальной и средней из остальных двух), вычисленной для нежесткого сооружения (фиг. 5—2).



Фиг. 5—2. Эпюры осадок по характерным сечениям сооружения

а—план сооружения; *б*—разрез по линии *1—2*; *в* — разрез по линии *3—4*; ——— осадка нежесткого сооружения; —·—·— осадка жесткого сооружения

4. Классификация расчетных случаев

В общем случае задача уплотнения грунта является задачей пространственной, однако на практике нередко встречаются условия, влияющие на характер распределения напряжений в грунте таким образом, что задачу можно приближенно рассматривать в некоторых случаях, как плоскую двухмерную, а в других, как одноразмерную. Эти условия определяются как соотношением размеров сооружения и мощности сжимаемых пластов грунта, так и характером внешней нагрузки.

а) Одноразмерная задача

Одноразмерный процесс уплотнения характеризуется тем, что частицы скелета грунта и воды в его порах перемещаются во всех точках грунтовой массы вертикально, причем в точках любой плоскости, перпендикулярной к вертикали в один и тот же момент времени, величины, характеризующие процесс уплотнения, одинаковы (см. [2]).

Очевидно, что теоретическая схема одноразмерной задачи имела бы место в случае сооружения с бесконечно большими размерами и сплошной, в любой момент времени равномерно распределенной нагрузкой на основание. Грунт предполагается при этом однородным в плоскостях, перпендикулярных направлению движения частиц.

Сравнение полученных теоретических выводов с данными наблюдений показало, что если размеры сооружения достаточно велики, то при незначительной мощности сжимаемого грунта можно трактовать задачу, как одноразмерную. Отношение ширины площади подошвы фундамента к толщине слоя сжимаемого грунта должно быть при этом больше двух, т. е.

$$\frac{b}{h} > 2,$$

где b — ширина подошвы фундамента;
h — мощность сжимаемого слоя грунта.

б) Плоская двухмерная задача

Двухмерный процесс уплотнения характеризуется тем, что частицы скелета грунта и воды в его порах перемещаются во всех точках грунтовой массы параллельно некоторой плоскости, причем в точках любой прямой линии, перпендикулярной к этой плоскости в один и тот же момент времени, величины, характеризующие процесс уплотнения, одинаковы.

На практике расчет по схеме плоской задачи ведется при длине сооружения, в 3 раза или более превышающей ширину. При определении длины сооружения можно учитывать и длину непосредственно примыкающих сооружений, если напряжения в основании примыкающих сооружений близки к соответствующим напряжениям основного сооружения.

5—3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТАХ

Определение напряжений в грунтовой толще производится методами теории упругости. Ниже рассматриваются основные задачи (подробнее см. [10]).

1. Распределение напряжений в случае пространственной задачи

а) Действие сосредоточенной силы (фиг. 5—3)

Если начало координат расположено в точке приложения сосредоточенной силы P, ось z направлена вертикально вниз, а оси x и y расположены в горизонтальной плоскости, ограничивающей полупространство, то составляющие напряжения в любой точке среды M ниже точки приложения сосредоточенной силы равны:

нормальные составляющие напряжения, параллельные осям x, y, z

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5}; \qquad (5—4)$$

$$\sigma_y = \frac{3P}{2\pi}\left[\frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3}\left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)\,y^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3}\right)\right]; \qquad (5—5)$$

$$\sigma_x = \frac{3P}{2\pi}\left[\frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3}\left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)\,x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3}\right)\right], \qquad (5—6)$$

где x, y, z — координаты рассматриваемой точки;

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

μ — коэффициент бокового расширения.

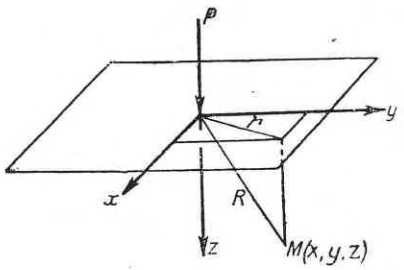
Формулу (5—4), выражающую величину сжимающих напряжений в массиве грунта для площадок, параллельных плоскости, ограничивающей массив, можно представить в виде:

$$\sigma_z = K\frac{P}{z^2}, \qquad (5—4')$$

где

$$K = \frac{3}{2\pi}\frac{1}{\left[1+\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}; \quad r = \sqrt{x^2+y^2}$$

и для расчетов пользоваться табл. 5—1, где даны значения коэффициентов K в зависимости от величины $\frac{r}{z}$.



Фиг. 5—3

б) Действие вертикальной, произвольно распределенной нагрузки

Для приближенного определения напряжений можно разделить нагруженную поверхность на элементы и нагрузку на каждый элемент принять сосредоточенной в центре тяжести элемента. Напряжение определится элементарным суммированием. Так, например, сжимающее напряжение в заданной точке определится по формуле:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^{n} K_i \frac{p_i}{z^2}, \qquad (5—4'')$$

где K_i — коэффициент, значение которого дано в зависимости от отношения $\frac{r_i}{z}$ в табл. 5—1;

r_i — расстояние от заданной точки до вертикальной оси, проходящей через центр тяжести элемента.

Точность такого определения зависит от отношения $\frac{l_i}{r_i}$, где l_i — бóльшая сторона прямоугольного элемента, r_i уже определено выше.

Найдено, что при:

$\frac{l_i}{r_i} < \frac{1}{2}$ — погрешность по сравнению с точным решением около 6%;

$\frac{l_i}{r_i} < \frac{1}{3}$ — погрешность около 3%;

$\frac{l_i}{r_i} < \frac{1}{4}$ — погрешность около 2%.

В некоторых случаях удалось получить точные решения, выделив бесконечно малые элементы и проинтегрировав полученные выражения для напряжений от одного элемента в пределах всей площади.

Для прямоугольного участка со сторонами l и b, к которому приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивностью p *кг/см*^{2}, можно пользоваться при определении сжимающих напряжений σ_z под его центром и углами формулой:

$$\sigma_z = kp. \qquad (5—4''')$$

Значения коэффициента k даны в табл. 5—2 и 5—3.

При пользовании таблицами следует учесть, что если известно напряжение для угловых точек, то по нему методом суммирования легко определить напряжение для любой точки полупространства.

При этом могут встретиться следующие три случая.

1. Точка M находится на контуре прямоугольника давления (фиг. 5—4,*а*). В этом случае

$$\sigma_z = \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2},$$

где σ_{z_1} — угловое напряжение от прямоугольника *Mabe;*

σ_{z_2} — угловое напряжение от прямоугольника *Mecd.*

2. Точка M находится внутри прямоугольника давлений (фиг. 5—4,*б*). В этом случае

$$\sigma_z = \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2} + \sigma_{z_3} + \sigma_{z_4},$$

где σ_{z_1}, σ_{z_2}, σ_{z_3}, σ_{z_4} — угловые напряжения от четырех прямоугольников.

Таблица 5—1

Коэффициенты K, соответствующие отношению $\frac{r}{z}$

Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K	Отношение $\frac{r}{z}$	Коэффициент K
0,00	0,4775	0,25	0,4103	0,50	0,2733	0,75	0,1565	1,00	0,0844	1,25	0,0454	1,50	0,0251	1,80	0,0129
0,01	0,4773	0,26	0,4054	0,51	0,2679	0,76	0,1527	1,01	0,0823	1,26	0,0443	1,51	0,0245	1,82	0,0124
0,02	0,4770	0,27	0,4004	0,52	0,2625	0,77	0,1491	1,02	0,0803	1,27	0,0433	1,52	0,0240	1,84	0,0119
0,03	0,4764	0,28	0,3954	0,53	0,2571	0,78	0,1455	1,03	0,0783	1,28	0,0422	1,53	0,0234	1,86	0,0114
0,04	0,4756	0,29	0,3902	0,54	0,2518	0,79	0,1420	1,04	0,0764	1,29	0,0412	1,54	0,0229	1,88	0,0109
0,05	0,4745	0,30	0,3849	0,55	0,2466	0,80	0,1386	1,05	0,0744	1,30	0,0402	1,55	0,0224	1,90	0,0105
0,06	0,4732	0,31	0,3796	0,56	0,2414	0,81	0,1353	1,06	0,0727	1,31	0,0393	1,56	0,0219	1,92	0,0101
0,07	0,4717	0,32	0,3742	0,57	0,2363	0,82	0,1320	1,07	0,0709	1,32	0,0384	1,57	0,0214	1,94	0,0097
0,08	0,4699	0,33	0,3687	0,58	0,2313	0,83	0,1288	1,08	0,0691	1,33	0,0374	1,58	0,0209	1,96	0,0093
0,09	0,4679	0,34	0,3632	0,59	0,2263	0,84	0,1257	1,09	0,0674	1,34	0,0365	1,59	0,0204	1,98	0,0089
0,10	0,4657	0,35	0,3577	0,60	0,2214	0,85	0,1226	1,10	0,0658	1,35	0,0357	1,60	0,0200	2,00	0,0085
0,11	0,4633	0,36	0,3521	0,61	0,2165	0,86	0,1196	1,11	0,0641	1,36	0,0348	1,61	0,0195	2,10	0,0070
0,12	0,4607	0,37	0,3465	0,62	0,2117	0,87	0,1166	1,12	0,0626	1,37	0,0340	1,62	0,0191	2,20	0,0058
0,13	0,4579	0,38	0,3408	0,63	0,2070	0,88	0,1138	1,13	0,0610	1,38	0,0332	1,63	0,0187	2,30	0,0048
0,14	0,4548	0,39	0,3351	0,64	0,2024	0,89	0,1110	1,14	0,0595	1,39	0,0324	1,64	0,0183	2,40	0,0040
0,15	0,4516	0,40	0,3294	0,65	0,1978	0,90	0,1083	1,15	0,0581	1,40	0,0317	1,65	0,0179	2,50	0,0034
0,16	0,4482	0,41	0,3238	0,66	0,1934	0,91	0,1057	1,16	0,0567	1,41	0,0309	1,66	0,0175	2,60	0,0029
0,17	0,4446	0,42	0,3181	0,67	0,1889	0,92	0,1031	1,17	0,0553	1,42	0,0302	1,67	0,0171	2,70	0,0024
0,18	0,4409	0,43	0,3124	0,68	0,1846	0,93	0,1005	1,18	0,0539	1,43	0,0295	1,68	0,0167	2,80	0,0021
0,19	0,4370	0,44	0,3068	0,69	0,1804	0,94	0,0981	1,19	0,0526	1,44	0,0288	1,69	0,0163	2,90	0,0017
0,20	0,4329	0,45	0,3011	0,70	0,1762	0,95	0,0956	1,20	0,0513	1,45	0,0282	1,70	0,0160	3,00	0,0015
0,21	0,4286	0,46	0,2955	0,71	0,1721	0,96	0,0933	1,21	0,0501	1,46	0,0275	1,72	0,0153	3,50	0,0007
0,22	0,4242	0,47	0,2899	0,72	0,1681	0,97	0,0910	1,22	0,0489	1,47	0,0269	1,74	0,0147	4,00	0,0004
0,23	0,4197	0,48	0,2843	0,73	0,1641	0,98	0,0887	1,23	0,0477	1,48	0,0263	1,76	0,0141	4,50	0,0002
0,24	0,4151	0,49	0,2788	0,74	0,1603	0,99	0,0865	1,24	0,0466	1,49	0,0257	1,78	0,0135	5,00	0,0001

Таблица 5—2

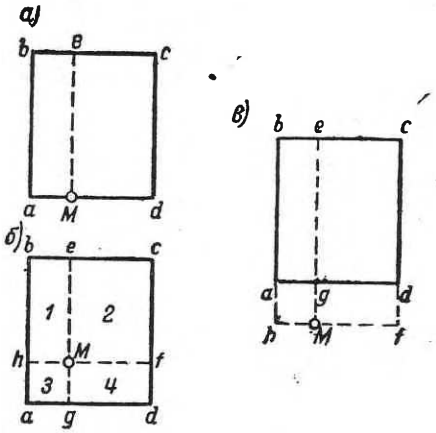
Значения коэффициента k_0 в формуле $\sigma_z = k_0 p$ для точек под центром загруженного прямоугольника

$\beta = \frac{z}{b}$	Отношение сторон прямоугольника $\alpha = \frac{l}{b}$								$\beta = \frac{z}{b}$	Отношение сторон прямоугольника $\alpha = \frac{l}{b}$							
	1	1,5	2	3	6	10	20	∞ (плоская задача)		1	1,5	2	3	6	10	20	∞ (плоская задача)
0,25	0,898	0,904	0,908	0,912	0,934	0,940	0,960	0,960	2,0	0,114	0,157	0,188	0,240	0,268	0,279	0,308	0,310
0,50	0,696	0,716	0,734	0,762	0,789	0,792	0,820	0,820	3,0	0,058	0,076	0,108	0,147	0,180	0,188	0,209	0,210
1,0	0,336	0,428	0,470	0,500	0,518	0,522	0,549	0,550	5,0	0,008	0,025	0,040	0,076	0,096	0,106	0,129	0,130
1,5	0,194	0,257	0,288	0,348	0,360	0,373	0,397	0,400									

Таблица 5—3

Значения коэффициента k_1 в формуле $\sigma_z = k_1 p$ для угловых точек

$\beta = \frac{z}{b}$	Отношение сторон прямоугольника $\alpha = \frac{l}{b}$																					
	1.0	1.2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	5.0	6,0	7,0	8,0	9.0	10,0
0,0	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
0,2	0,2486	0,2489	0,2490	0,2491	0,2491	0,2491	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492	0,2492
0,4	0,2401	0,2420	0,2429	0,2434	0,2437	0,2439	0,2440	0,2441	0,2442	0,2442	0,2442	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443
0,6	0,2229	0,2275	0,2300	0,2315	0,2324	0,2329	0,2333	0.2335	0,2337	0,2338	0,2339	0,2340	0,2340	0,2341	0,2341	0,2341	0,2342	0,2342	0,2342	0,2342	0,2342	0,2342
0,8	0,1999	0,2075	0,2120	0,2147	0,2165	0,2176	0,2183	0,2188	0,2192	0,2194	0,2196	0,2198	0,2199	0,2199	0,2200	0,2200	0,2202	0,2202	0,2202	0,2202	0,2202	0,2202
1,0	0,1752	0,1851	0,1911	0,1955	0,1981	0,1999	0,2012	0,2020	0,2026	0,2031	0,2034	0,2037	0,2039	0,2040	0,2041	0,2042	0,2044	0,2045	0,2045	0,2046	0,2046	0,2046
1,2	0,1516	0,1626	0,1705	0,1758	0,1793	0,1818	0,1836	0,1849	0,1858	0,1865	0,1870	0,1873	0,1876	0,1878	0,1880	0,1882	0,1885	0,1887	0,1888	0,1888	0,1888	0,1888
1,4	0,1308	0,1423	0,1508	0,1569	0,1613	0,1644	0,1667	0,1685	0,1696	0,1705	0,1712	0,1718	0,1722	0,1725	0,1728	0,1730	0,1735	0,1738	0,1739	0,1739	0,1739	0,1740
1,6	0,1123	0,1241	0,1329	0,1396	0,1445	0,1482	0,1509	0,1530	0,1545	0,1557	0,1567	0,1574	0,1580	0,1584	0,1587	0,1590	0,1598	0,1601	0,1602	0,1603	0,1604	0,1604
1,8	0,0969	0,1083	0,1172	0,1241	0,1294	0,1334	0,1365	0,1389	0,1408	0,1423	0,1434	0,1443	0,1450	0,1455	0,1460	0,1463	0,1474	0,1478	0,1480	0,1481	0,1482	0,1482
2,0	0,0840	0,0947	0,1034	0,1103	0,1158	0,1202	0,1236	0,1263	0,1284	0,1300	0,1314	0,1324	0,1332	0,1339	0,1345	0,1350	0,1363	0,1368	0,1371	0,1372	0,1373	0,1374
2,2	0,0732	0,0832	0,0917	0,0984	0,1039	0,1084	0,1120	0,1149	0,1172	0,1191	0,1205	0,1218	0,1227	0,1235	0,1242	0,1248	0,1264	0,1271	0,1274	0,1276	0,1277	0,1277
2,4	0,0642	0,0734	0,0813	0,0879	0,0934	0,0979	0,1016	0,1047	0,1071	0,1092	0,1108	0,1122	0,1133	0,1142	0,1150	0,1156	0,1175	0,1184	0,1188	0,1190	0,1191	0,1192
2,6	0,0566	0,0651	0,0725	0,0788	0,0842	0,0887	0,0924	0,0955	0,0981	0,1003	0,1020	0,1035	0,1047	0,1058	0,1066	0,1073	0,1095	0,1106	0,1111	0,1113	0,1115	0,1116
2,8	0,0502	0,0580	0,0649	0,0709	0,0761	0,0805	0,0842	0,0875	0,0900	0,0923	0,0942	0,0957	0,0970	0,0982	0,0991	0,0999	0,1024	0,1036	0,1041	0,1045	0,1047	0,1048
3,0	0,0447	0,0519	0,0583	0,0640	0,0690	0,0732	0,0769	0,0801	0,0828	0,0851	0,0870	0,0887	0,0901	0,0913	0,0923	0,0931	0,0959	0,0973	0,0980	0,0983	0,0986	0,0987
3,2	0,0401	0,0467	0,0526	0,0580	0,0627	0,0668	0,0704	0,0735	0,0762	0,0786	0,0806	0,0823	0,0838	0,0850	0,0861	0,0870	0,0900	0,0916	0,0923	0,0928	0,0930	0,0933
3,4	0,0361	0,0421	0,0477	0,0527	0,0571	0,0611	0,0646	0,0677	0,0704	0,0727	0,0747	0,0765	0,0780	0,0793	0,0804	0,0814	0,0847	0,0864	0,0873	0,0877	0,0880	0,0882
3,6	0,0326	0,0382	0,0433	0,0480	0,0523	0,0561	0,0594	0,0624	0,0651	0,0674	0,0694	0,0712	0,0728	0,0741	0,0753	0,0763	0,0799	0,0816	0,0826	0,0832	0,0835	0,0837
3,8	0,0296	0,0348	0,0395	0,0439	0,0479	0,0516	0,0548	0,0577	0,0603	0,0626	0,0646	0,0664	0,0680	0,0694	0,0706	0,0717	0,0753	0,0773	0,0784	0,0790	0,0794	0,0796
4,0	0,0270	0,0318	0,0362	0,0403	0,0441	0,0474	0,0507	0,0535	0,0560	0,0588	0,0603	0,0620	0,0636	0,0650	0,0663	0,0674	0,0712	0,0733	0,0745	0,0752	0,0756	0,0758
4,2	0,0247	0,0291	0,0333	0,0371	0,0407	0,0439	0,0469	0,0496	0,0521	0,0543	0,0563	0,0581	0,0596	0,0610	0,0623	0,0634	0,0674	0,0696	0,0709	0,0716	0,0721	0,0724
4,4	0,0227	0,0268	0,0306	0,0343	0,0376	0,0407	0,0436	0,0462	0,0485	0,0507	0,0527	0,0544	0,0560	0,0574	0,0586	0,0597	0,0639	0,0662	0,0676	0,0684	0,0689	0,0692
4,6	0,0209	0,0247	0,0283	0,0317	0,0348	0,0378	0,0405	0,0430	0,0453	0,0474	0,0493	0,0510	0,0526	0,0540	0,0553	0,0564	0,0606	0,0630	0,0644	0,0654	0,0659	0,0663
4,8	0,0193	0,0229	0,0262	0,0294	0,0324	0,0352	0,0378	0,0402	0,0424	0,0444	0,0463	0,0480	0,0495	0,0509	0,0522	0,0533	0,0576	0,0601	0,0616	0,0626	0,0631	0,0635
5,0	0,0179	0,0212	0,0243	0,0274	0,0302	0,0328	0,0358	0,0376	0,0397	0,0417	0,0435	0,0451	0,0466	0,0480	0,0493	0,0504	0,0547	0,0573	0,0589	0,0599	0,0606	0,0610
6,0	0,0127	0,0151	0,0174	0,0196	0,0218	0,0238	0,0257	0,0276	0,0293	0,0310	0,0325	0,0340	0,0353	0,0366	0,0377	0,0388	0,0431	0,0460	0,0479	0,0491	0,0500	0,0506
7,0	0,0094	0,0112	0,0130	0,0147	0,0164	0,0180	0,0195	0,0210	0,0224	0,0238	0,0251	0,0263	0,0275	0,0286	0,0296	0,0306	0,0346	0,0376	0,0396	0,0411	0,0421	0,0428
8,0	0,0073	0,0087	0,0101	0,0114	0,0127	0,0140	0,0153	0,0165	0,0176	0,0187	0,0198	0,0209	0,0219	0,0228	0,0237	0,0246	0,0283	0,0311	0,0332	0,0348	0,0359	0,0367
9,0	0,0058	0,0069	0,0080	0,0091	0,0102	0,0112	0,0122	0,0132	0,0142	0,0152	0,0161	0,0169	0,0178	0,0186	0,0194	0,0202	0,0235	0,0262	0,0282	0,0298	0,0310	0,0319
10,0	0,0047	0,0056	0,0065	0,0074	0,0083	0,0092	0,0100	0,0109	0,0117	0,0125	0,0132	0,0140	0,0147	0,0154	0,0162	0,0167	0,0198	0,0222	0,0242	0,0258	0,0270	0,0280



Фиг. 5—4

3. Точка M находится вне прямоугольника давлений (фиг. 5—4,*в*). В этом случае

$$\sigma_z = \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2} - \sigma_{z_3} - \sigma_{z_4},$$

где σ_{z_1} — угловое напряжение от прямоугольника *Mhbe;*

σ_{z_2} — угловое напряжение от прямоугольника *Mecf;*

σ_{z_3} — угловое напряжение от прямоугольника *Mhag;*

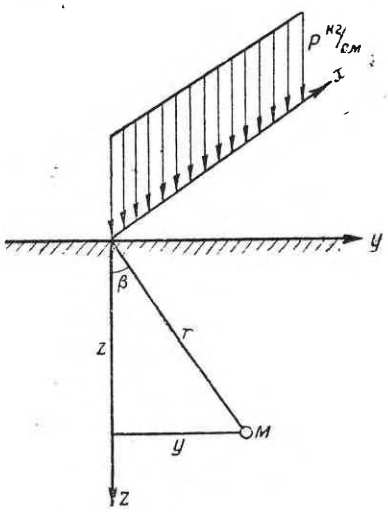
σ_{z_4} — угловое напряжение от прямоугольника *Mgdf.*

Этот прием позволяет учесть напряжения, возникающие в толще грунта, не только от основного сооружения, но и от соседних сооружений.

2. Распределение напряжений в случае плоской задачи

а) Действие сосредоточенной силы (сосредоточенная погонная нагрузка) (фиг. 5—5)

Аналогично пространственной задаче эта задача является простейшей, но в то же время основной среди плоских задач.



Фиг. 5—5

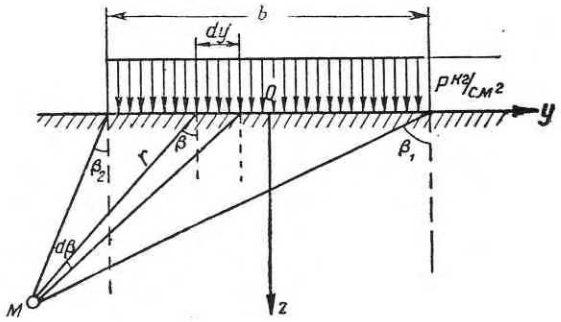
Нормальные составляющие напряжения в любой точке M будут:

$$\sigma_z = -\frac{2p}{\pi} \cdot \frac{z^3}{r^4}; \qquad (5—7)$$

$$\sigma_y = -\frac{2p}{\pi} \cdot \frac{y^2 z}{r^4}. \qquad (5-8)$$

б) Действие равномерно распределенной нагрузки (фиг. 5—6)

Поверхность грунта нагружена полосообразной нагрузкой шириной b, интенсивностью p *кг/см²*. Суммируя напряжения от отдельных элементов, получим нормальные составляющие напряжения в любой точке:



Фиг. 5—6

$$\sigma_z = -\frac{p}{\pi}\left[\beta_1 + \frac{1}{2}\sin 2\beta_1 - (\pm\beta_2) - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{2}\sin(\pm 2\beta_2)\right]; \qquad (5—9)$$

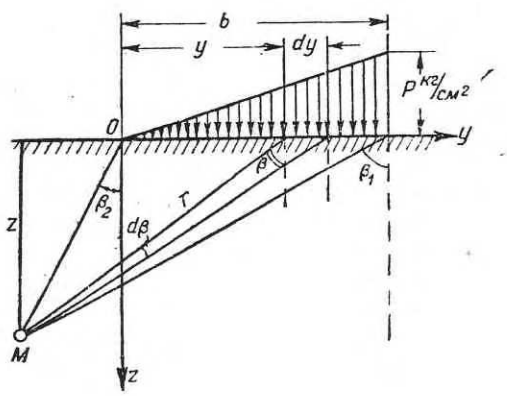
$$\sigma_y = -\frac{p}{\pi}\left[\beta_1 - \frac{1}{2}\sin 2\beta_1 - (\pm\beta_2) + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{2}\sin(\pm 2\beta_2)\right]. \qquad (5—10)$$

Знак (+) перед β_2 принимается для точек M, лежащих вне вертикальных плоскостей, ограничивающих равномерно распределенную нагрузку, а знак (—) — для точек M, лежащих внутри указанных плоскостей. Результаты расчетов по этим формулам приведены в табл. 5—4, где σ_z и σ_y выражены в долях от интенсивности нагрузки p.

в) Действие неравномерной нагрузки, меняющейся по закону треугольника (фиг. 5—7)

Поверхность грунта на участке шириной b нагружена с переменной по ширине интенсивностью от 0 до p *кг/см²*. Суммируя напряжения от отдельных элементов, получим составляющие напряжения в любой точке M:

$$\sigma_z = -\frac{pz}{\pi b}\left[\sin^2\beta_1 - \sin^2\beta_2 - \operatorname{tg}\beta_2\left(\beta_1 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{1}{2}\sin 2\beta_1 - \beta_2 - \frac{1}{2}\sin 2\beta_2\right)\right]; \qquad (5—11)$$



Фиг. 5—7

$$\sigma_y = -\frac{pz}{\pi b}\left[(\cos^2\beta_1 - 2\ln\cos\beta_1 - \cos^2\beta_2 + 2\ln\cos\beta_2) - \right.$$

$$\left. - \operatorname{tg}\beta_2\left(\beta_1 - \frac{1}{2}\sin 2\beta_1 - \beta_2 + \frac{1}{2}\sin 2\beta_2\right)\right]. \qquad (5-12)$$

Причем углы β_1 и β_2, составляемые с вертикалью радиусами, проведенными к данной точке из концов участка, следует считать положительными при отсчете их от вертикали по часовой стрелке и отрицательными при отсчете против часовой стрелки.

Сжимающие напряжения σ_z можно определять и по табл. *5—5*.

Таблица 5—4

Величины напряжений σ_z, σ_y, выраженные в долях от интенсивности равномерно распределенной нагрузки p.

$z' = \frac{z}{b}$ \ $y' = \frac{y}{b}$	0		0,25		0,50		1,0		1,5		2,0	
	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y
0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0	0	0	0	0	0
0,25	0,96	0,45	0,90	0,39	0,50	0,35	0,02	0,17	0	0,07	0,0	0,04
0,50	0,82	0,18	0,74	0,19	0,48	0,23	0,08	0,21	0,02	0,12	0,0	0,07
0,75	0,67	0,08	0,61	0,10	0,45	0,14	0,15	0,22	0,04	0,14	0,02	0,10
1,00	0,55	0,04	0,51	0,05	0,41	0,09	0,19	0,15	0,07	0,14	0,03	0,13
1,25	0,46	0,02	0,44	0,03	0,37	0,06	0,20	0,11	0,10	0,12	0,04	0,11
1,50	0,40	0,01	0,38	0,02	0,33	0,04	0,21	0,08	0,11	0,10	0,06	0,10
1,75	0,35	—	0,34	0,01	0,30	0,03	0,21	0,06	0,13	0,09	0,07	0,09
2,00	0,31	—	0,31	—	0,28	0,02	0,20	0,05	0,13	0,07	0,08	0,08
3,00	0,21	—	0,21	—	0,20	0,01	0,17	0,02	0,13	0,03	0,10	0,04
4,00	0,16	—	0,16	—	0,15	—	0,14	0,01	0,12	0,02	0,10	0,03
5,00	0,13	—	0,13	—	0,12	—	0,12	—	0,11	—	0,09	—
6,00	0,11	—	0,10	—	0,10	—	0,10	—	0,10	—	—	—

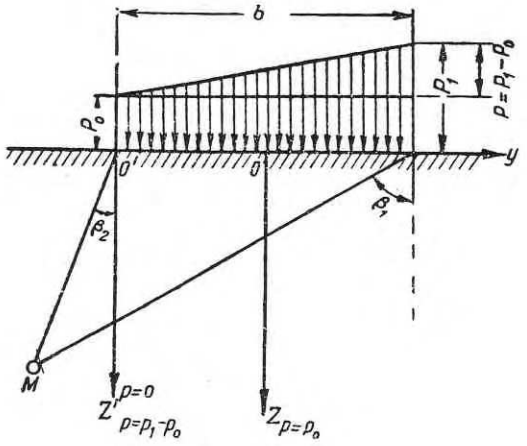
Таблица 5—5

Величины напряжений σ_z в линейно деформируемом массиве при действии полосообразной нагрузки, меняющейся по закону треугольника, выраженные в долях от максимальной интенсивности нагрузки

$z' = \frac{z}{b}$ \ $y' = \frac{y}{b}$	−1,5	−1,0	−0,5	0,0	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5
0,00	0	0	0	0	0,25	0,50	0,75	0,50	0	0	0
0,25	—	—	0,001	0,075	0,256	0,480	0,643	0,424	0,015	0,003	—
0,50	0,002	0,003	0,023	0,127	0,263	0,410	0,477	0,353	0,056	0,017	0,003
0,75	0,006	0,016	0,042	0,153	0,248	0,335	0,361	0,293	0,108	0,024	0,009
1,0	0,014	0,025	0,061	0,159	0,223	0,275	0,279	0,241	0,129	0,045	0,013
1,5	0,020	0,048	0,096	0,145	0,178	0,200	0,202	0,185	0,124	0,062	0,041
2,0	0,033	0,061	0,092	0,127	0,146	0,155	0,163	0,153	0,108	0,069	0,050
3,0	0,050	0,064	0,080	0,096	0,103	0,104	0,108	0,104	0,090	0,071	0,050
4,0	0,051	0,060	0,067	0,075	0,078	0,085	0,082	0,075	0,073	0,060	0,049
5,0	0,047	0,052	0,057	0,059	0,062	0,063	0,063	0,065	0,061	0,051	0,047
6,0	0,041	0,041	0,050	0,051	0,052	0,053	0,053	0,053	0,050	0,050	0,045

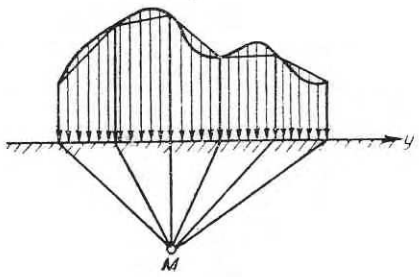
г) Действие нагрузки произвольного вида

Данными табл. *5—4* и *5—5* можно пользоваться в случае плоской задачи для произвольного вида нагрузки. Так, например, если эпюра внешней нагрузки



Фиг. 5—8

имеет вид трапеции с крайними ординатами p_0 и p_1 (фиг. 5—8), то следует суммировать напряжения, определенные для равномерно распределенной нагрузки интенсивностью p_0 и для изменяющейся по закону треугольника с интенсивностью от 0 до $p=p_1-p_0$.



Фиг. 5—9

Если нагрузка на поверхность грунта задана некоторой кривой (фиг. 5—9), то с приближением находят суммированием значения напряжений, разбивая заданную эпюру на ряд участков и в пределах каждого участка заданный закон изменения нагрузки заменяя трапецоидальной эпюрой.

3. Определение активной зоны

Сжимающие напряжения от нагрузки, приложенной на поверхности, с глубиной быстро уменьшаются. Это дает возможность при расчете осадок в случае, когда скальная порода залегает на большой глубине, пренебречь малыми напряжениями и учитывать напряжения только в верхних слоях грунта, называемых активной зоной. Чаще всего глубину активной зоны для каждой расчетной вертикали определяют по формуле:

$$\sigma_z < 0{,}2\,\gamma H, \qquad (5—13)$$

где σ_z — сжимающее напряжение;
γ — объемный вес грунта;
H — глубина активной зоны.

5—4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОЙ ОСАДКИ

1. Непосредственное применение линейной задачи

Если слой грунта равномерно сжимается в условиях невозможности бокового расширения, то осадку можно определить как разность начальной и конечной высоты слоя грунта: $S=h-h'$ (фиг. 5—10,*а*). Величина h известна, а величину h' можно определить из того условия, что объем скелета столбика грунта остается при осадке постоянным, а осадка происходит за счет уменьшения пор. В результате получаем:

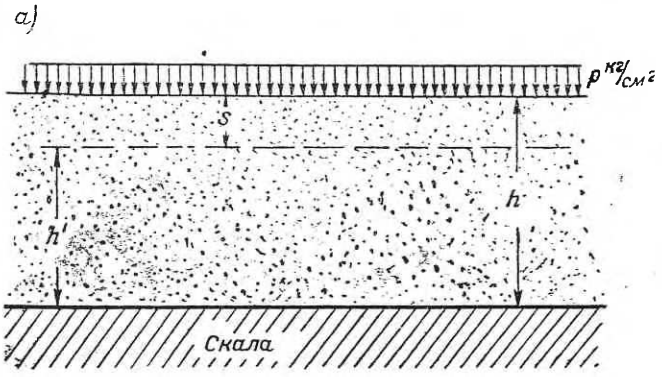
$$S = h\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1+\varepsilon_1}, \qquad (5—14)$$

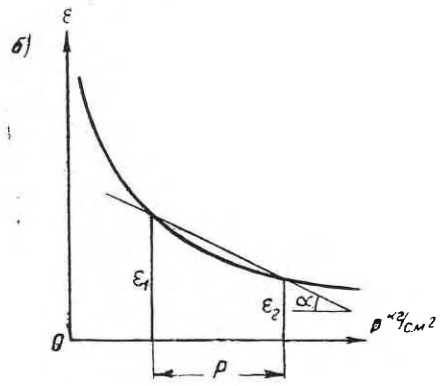
где h — начальная высота слоя грунта;
ε_1 — коэффициент пористости грунта, соответствующий условиям его естественного залегания;
ε_2 — коэффициент пористости грунта, определенный при увеличении нагрузки, соответствующей ε_1, на величину расчетной нагрузки p.

Формуле для S можно придать и другую форму:

$$S = h\frac{ap}{1+\varepsilon_1}, \qquad (5—15)$$

где $a = \operatorname{tg}\alpha = \dfrac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{p}$ (см. фиг. 5—10,*б*).





Фиг. 5—10

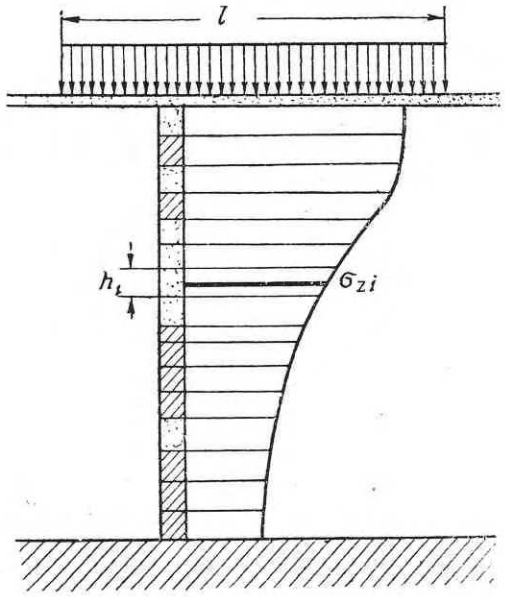
На практике эти формулы применимы для расчета осадок тех сооружений, для которых выполняется неравенство:

$$\frac{b}{h} > 2,$$

где b — ширина подошвы сооружения;
h — толщина сжимаемого слоя грунта.

2. Метод суммирования деформаций

Если скальный грунт залегает более глубоко, чем в предыдущем случае, то непосредственное применение формул линейной задачи дает большие расхождения с



Фиг. 5—11

фактическими осадками. В этом случае полная осадка какой-либо точки нагруженной поверхности определяется суммированием деформаций отдельных элементов h_i вертикальной призмы грунта под рассматриваемой точкой (фиг. 5—11) по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \Delta h_i, \qquad (5—16)$$

где Δh_i — абсолютное сжатие в *см* отдельного элемента вертикальной призмы грунта;
h_i — высота в *см* рассматриваемого элемента.

а) Определение деформации элемента по формуле линейной задачи

Предполагая, что отдельный элемент находится в условиях однородного напряженного состояния, без возможности бокового расширения, можно определить:

$$\Delta h_i = h_i \frac{a_i \sigma_{zi}}{1 + \varepsilon_{1i}}, \qquad (5—17)$$

где

$$a_i = \frac{\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{2i}}{\sigma_{zi}}; \qquad (5—18)$$

ε_{1i} — коэффициент пористости рассматриваемого слоя грунта, соответствующий условиям его естественного залегания;
ε_{2i} — коэффициент пористости грунта, определенный при увеличении нагрузки, соответствующей ε_{1i}, на величину сжимающего напряжения σ_{zi};
σ_{zi} — величина сжимающего напряжения в центре тяжести элемента.

Величина полной осадки в этом случае определится по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^{n} h_i \frac{a_i \sigma_{zi}}{1 + \varepsilon_{1i}}. \qquad (5—19)$$

б) Определение деформации элемента с учетом всех трех компонентов нормальных напряжений (σ_z, σ_y, σ_x)

Для сооружений, рассматриваемых в разрезе пространственной задачи, вертикальную деформацию каждого элемента можно определять с учетом всех трех нормальных напряжений, действующих в центре тяжести элемента (см. [1]):

$$\Delta h_i = \frac{h_i}{1 - 2\mu} \cdot \frac{\sigma_{zi} - \mu(\sigma_{xi} + \sigma_{yi})}{\sigma_{xi} + \sigma_{yi} + \sigma_{zi}} \cdot \frac{\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{2i}}{1 + \varepsilon_{1i}}, \qquad (5—20)$$

где μ — коэффициент бокового расширения для данного грунта. Остальные величины уже определены выше.

В случае плоской деформации формула упрощается, так как σ_x может быть выражено через σ_y и σ_z из условия равенства нулю составляющей деформации по оси x:

$$\Delta h_i = \frac{h_i}{1 - 2\mu} \cdot \frac{[(1-\mu)\sigma_{zi} - \mu\sigma_{yi}]}{\sigma_{yi} + \sigma_{zi}} \cdot \frac{\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{2i}}{1 + \varepsilon_{1i}}. \qquad (5—21)$$

в) Способ ВИОС

Предполагается, что рассматриваемый элемент грунта находится в условиях свободного бокового расширения, т. е. что σ_{yi} и σ_{xi} равны нулю.

Зависимость между напряжениями и деформациями принимается линейной, откуда для величины абсолютного сжатия элемента грунта получена формула:

$$\Delta h_i = h_i \frac{\sigma_{zi}}{E_{0i}}, \qquad (5—22)$$

где h_i — высота рассматриваемого элемента грунта;
σ_{zi} — среднее сжимающее напряжение для элемента;
E_{0i} — модуль сжимаемости, определяемый по данным пробных нагрузок.

Полная осадка определится формулой:

$$S = \sum_{i=1}^{n} h_i \frac{\sigma_{zi}}{E_{0i}}. \qquad (5-23)$$

Модуль сжимаемости E_0, аналогичный модулю нормальной упругости для твердых тел, но характеризующий общую деформацию грунта, а не ее упругую часть, можно определить и при помощи компрессионной кривой по формуле:

$$E_0 = \frac{\beta(1+\varepsilon_1)}{a}, \qquad (5-24)$$

причем a и ε_1 определены выше, а

$$\beta = \frac{(1-\xi_0)(1+2\xi_0)}{1+\xi_0},$$

где ξ_0 — коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя.

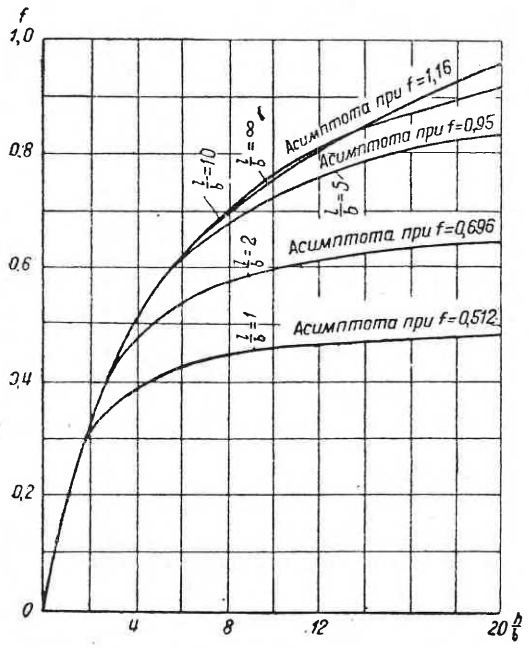
3. Метод угловых точек

Этим методом можно пользоваться для определения полной осадки в случае пространственной и плоской задач (см. [1]).

Осадка угловой точки прямоугольного гибкого фундамента, нагруженного равномерной нагрузкой, может быть вычислена по формуле:

$$S = \frac{bpf}{E}, \qquad (5-25)$$

где b — ширина расчетного прямоугольника в *см*;
p — расчетная равномерная нагрузка в *кг/см²*;
E — модуль сжимаемости грунта основания в *кг/см²*;



Фиг. 5—12. График для вычисления осадок под гибкой равномерной нагрузкой, распределенной по прямоугольнику

f — коэффициент, зависящий от относительной длины $\frac{l}{b}$ расчетного прямоугольника и от относительной глубины $\frac{h}{b}$ сжимаемой толщи основания, задан графиком (фиг. 5—12);
l — абсолютная длина расчетного прямоугольника в *см*;
h — абсолютная глубина сжимаемого слоя грунта в *см*.

Если точка, осадка которой определяется, расположена на периметре или внутри нагруженного фундамента, то ее следует рассматривать как угловую точку нескольких расчетных прямоугольников и общую осадку определить суммированием.

4. Метод эквивалентного слоя грунта[1]

Метод эквивалентного слоя состоит в том, что вместо осадки фундамента, имеющего заданные размеры, определяется равновеликая осадка слоя грунта, находящегося в условиях равномерного сжатия без возможности бокового расширения.

Этим самым пространственная задача сводится к одноразмерной, что особенно важно при определении протекания осадки во времени, так как в этом случае решение может быть представлено в замкнутой форме.

Таблица 5—6

Значения коэффициента ω_0

Форма загруженной площади	Значения коэффициента ω_0 для определения осадки		
	под центром загруженной площади (S_{max})	средней по площади ($S_{средн}$)	абсолютно жесткого фундамента (S_{const})
Круг	1,00	0,85	0,79
Квадрат $\alpha = \frac{l}{b} = 1$	1,12	0,95	0,88
Прямоугольники:			
$\alpha = 1{,}5$	1,36	1,15	1,08
$\alpha = 2$	1,53	1,30	1,22
$\alpha = 3$	1,78	1,53	1,44
$\alpha = 4$	1,96	1,70	1,61
$\alpha = 5$	2,10	1,83	1,72
$\alpha = 6$	2,23	1,96	—
$\alpha = 7$	2,33	2,04	—
$\alpha = 8$	2,42	2,12	—
$\alpha = 9$	2,49	2,19	—
$\alpha = 10$	2,53	2,25	2,12
$\alpha = 20$	2,95	2,64	—
$\alpha = 30$	3,23	2,88	—
$\alpha = 40$	3,42	3,07	—
$\alpha = 50$	3,54	3,22	—
$\alpha = 100$	4,00	3,69	—

[1] Пункт 4 и 5 подробнее см. [10].

Используя решения математической теории упругости, можно показать, что осадка упругого слоя грунта при равномерном сжатии без возможности его бокового расширения, толщина которого определена по формуле:

$$h_S = \frac{(1-\mu)^2}{1-2\mu}\,\omega_0\, b, \qquad (5\text{—}26)$$

[где μ — коэффициент бокового расширения; b — ширина фундамента (для круга — диаметр); ω_0 — коэффициент, зависящий от формы, размеров и жесткости фундамента (см. табл. 5—6)], равновелика осадке равномерно нагруженного фундамента заданных размеров и формы на упругом массиве.

Отсюда следует, что осадку фундамента на однородном слое можно определить по формуле:

$$S = h_S \frac{ap}{1+\varepsilon_1} \qquad (5\text{—}27)$$

5. Расчет осадок в случае неоднородных грунтов

Указанные выше методы можно применить и в случае неоднородного (слоистого) основания, если использовать способ «приведения грунта к однородному».

При этом грунт на всю глубину активной зоны заменяется однородным, сжимаемость, водопроницаемость и пористость которого равны суммарной средней сжимаемости, водопроницаемости и пористости неоднородного грунта.

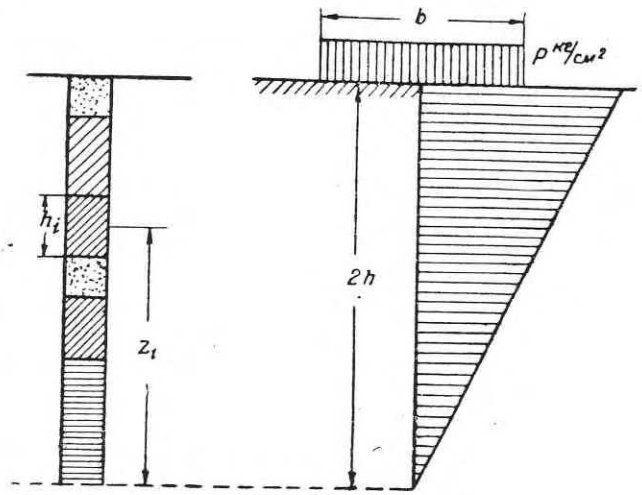
а) Среднее значение коэффициента уплотнения

Формулу для осадки фундамента в условиях одноразмерной задачи $S=h\frac{ap}{1+\varepsilon_1}$ можно записать в виде: $S=ha_0p$, где $a_0=\frac{a}{1+\varepsilon_1}$ называют «приведенным» коэффициентом уплотнения. Среднее значение приведенного коэффициента уплотнения можно определить по формуле:

$$a_{0m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i\, a_{0i}\, z_i}{2h^2}, \qquad (5\text{—}28)$$

где $2h$ — глубина активной зоны;
h_i — толщина отдельного слоя;
a_{0i} — приведенный коэффициент уплотнения отдельного слоя;
z_i — расстояние от точки, соответствующей глубине $2h$, до середины рассматриваемого слоя (фиг. 5—13).

Формула эта получена из условия, что полная осадка всей сжатой толщи грунтов равна сумме осадок отдельных слоев грунта. Эпюра уплотняющих давлений с приближением представлена в виде треугольника с высотой, равной глубине активной зоны $2h$.



Фиг. 5—13

б) Среднее значение коэффициента пористости

Среднее значение коэффициента пористости определяется по формуле:

$$\varepsilon_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{1+\varepsilon_i}} - 1, \qquad (5\text{—}29)$$

где h_i — толщина отдельного слоя;
ε_i — коэффициент пористости отдельного слоя.

Так как $\sum_{i=1}^{n} h_i = H$ — полная высота рассматриваемой толщи грунта, а $\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{1+\varepsilon_i} = H_0$ — приведенная толщина, то формула для ε_m принимает вид:

$$\varepsilon_m = \frac{H-H_0}{H_0}. \qquad (5\text{—}29')$$

Формула для ε_m получена из условия, что объем скелета всей толщи грунтов равен сумме объемов скелета отдельных слоев.

в) Среднее значение коэффициента фильтрации

Среднее значение коэффициента фильтрации определяется по формуле:

$$K_m = \frac{H}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{k_i}}, \qquad (5\text{—}30)$$

где H — мощность всей толщи;
k_i — коэффициент фильтрации отдельного слоя;
h_i — толщина отдельного слоя.

Формула для K_m получена из условия, что потеря напора во всей толще грунтов равна сумме потерь напора в отдельных пластах.

6. Общие замечания

Вопрос о величине возможных отклонений, получаемых при расчете осадок от наблюдаемых в натуре, ввиду его сложности еще не выяснен и является объектом исследовательских работ.

Из приведенных выше четырех методов определения полной осадки наибольшее применение имеет метод суммирования деформаций, причем формула (5—20) дает возможность определить вертикальную деформацию элемента грунта в условиях ограниченного бокового расширения, т. е. в условиях, наиболее близких к действительным условиям, в которых находится элемент грунта. Формула (5—21) является частным случаем формулы (5—20), когда расчетный случай можно классифицировать как плоскую задачу (см. п. 5—2, 4).

Формула (5—17) является упрощением формулы (5—20) и может быть получена из нее при предположении, что элемент грунта находится в условиях невозможности бокового расширения. Что касается способа ВИОС, при котором предполагается, что элемент грунта находится в условиях свободного бокового расширения, то его рекомендуется применять лишь для ориентировочных подсчетов для установления максимальной осадки, так как практика показала, что он дает заведомо завышенные в 2—3 раза результаты.

5—5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДОК ВО ВРЕМЕНИ

1. Общие замечания

Процесс уплотнения грунта, сопровождаемый изменением его влажности, называется процессом консолидации.

Существующие методы определения протекания осадки во времени основаны на представлении, что уплотнение грунта происходит в связи с выжиманием из пор грунта воды.

В настоящее время основные положения этой теории консолидации подвергаются дискуссионному обсуждению в поисках более правильной трактовки физической стороны явления.

В теории консолидации земляная среда рассматривается в общем случае как трехфазная система (скелет грунта, вода и воздух), но предполагается, что газ содержится в незначительном количестве (не более 2—5% от объема пор), в виде отдельных защемленных пузырьков, перемещающихся совместно со скелетом грунта, и не имеет непосредственной связи с внешней атмосферой.

В отношении жидкой фазы приняты те же обычные допущения (применимость закона Дарси), что и в теории фильтрации. Влияние связанной воды не учитывается, но в неявном виде отражается на получаемых в результате исследований грунта характеристиках и, таким образом, входит в расчеты.

Принимается также, что напряженное состояние скелета грунта, соответствующее незаконченному процессу уплотнения, по мере протекания этого процесса постепенно приближается и в пределе совпадает с конечным напряженным состоянием.

В общем случае задача приводится к численному интегрированию дифференциальных уравнений консолидации, и лишь после введения ряда упрощающих предположений дифференциальные уравнения консолидации можно свести к общеизвестному уравнению теплопроводности и использовать имеющиеся решения этого уравнения. Для гидротехнических сооружений наибольшее применение в современной практике имеют приводимые ниже формулы.

2. Одноразмерная задача

а) Уплотнение слоя грунта с двумя водопроницаемыми поверхностями (подробнее см. [9])

Если уплотнение слоя грунта вызвано некоторой переменной во времени нагрузкой $p=p(t)$, то при $p(t)=\alpha t$, когда нагрузка меняется по линейному закону:

$$S_t=\frac{2a\alpha h^3}{c\,(1+\varepsilon_{ср})}\left(\frac{ct}{2h^2}-\frac{1}{24}+\right.$$

$$\left.+\frac{4}{\pi^4}\sum_{i=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{1}{i^4}e^{-\frac{i^2\pi^2 c}{h^2}t}\right), \qquad (5-31)$$

а при $p(t)=p=\text{const}$

$$S_t=\frac{pah}{1+\varepsilon_{ср}}\left(1-\frac{8}{\pi^2}\sum_{i=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{1}{i^2}e^{-\frac{i^2\pi^2 c}{h^2}t}\right). \qquad (5-32)$$

В этих формулах:

S_t — определяемая осадка в *см*;

t — время, протекшее от начала уплотнения до момента, для которого определяется осадка, в сек.;

p — расчетная нагрузка в *кг/см²*;

$$c=\frac{K\,(1+\varepsilon_{ср})}{\gamma a},$$

где $\varepsilon_{ср}=\frac{\varepsilon_{нач}+\varepsilon_{кон}}{2}$ — средний коэффициент пористости грунта;

γ — вес 1 *см³* воды в *кг* (*кг/см³*);

K — коэффициент фильтрации грунта в *см/сек*;

a — коэффициент уплотнения в *см²/кг*;

h — толщина сжимаемого слоя грунта в *см*;

e — основание натуральных логарифмов.

Чтобы время t можно было отсчитывать в годах, следует коэффициент фильтрации K, заданный в *см/сек*, умножить на $3\cdot 10^7$ и тем самым определить его в *см/год*.

б) Уплотнение слоя грунта с одной водопроницаемой поверхностью

Если происходит уплотнение слоя грунта с одной водопроницаемой поверхностью, которая подвергается воздействию мгновенно приложенной или линейно возра-

стающей нагрузки, тогда как другая поверхность водонепроницаема, то можно пользоваться предыдущими формулами, считая, что толщина расчетного слоя в 2 раза больше толщины уплотняемого слоя, уменьшая затем полученный для величины осадки результат в 2 раза.

в) Упрощенный метод расчета протекания осадки во времени при различных интенсивностях нарастания нагрузки

Изменение нагрузки на грунт упрощенно может быть представлено как комбинация случаев p=const и $p=\alpha t$ (см. [11]).

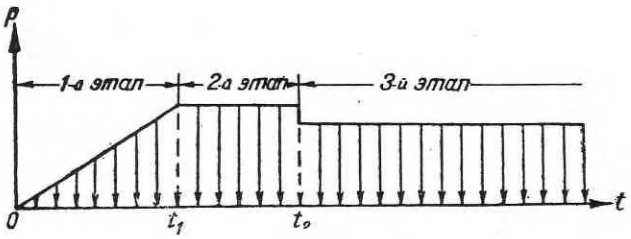
Предыдущие формулы (5—31) и (5—32) для определения величины осадки, соответствующей моменту времени t, можно видоизменить и свести к одной:

$$S_t = \bar{\sigma}_z \frac{ah}{1+\varepsilon_{ср}}, \qquad (5—33)$$

где $\bar{\sigma}_z$ — осредненное по высоте слоя значение напряжения в момент t.

Для случая мгновенно приложенной нагрузки p=const

$$\bar{\sigma}_z = p\left[1 - \frac{8}{\pi^2}\left(e^{-Mt} + \frac{1}{9}e^{-9Mt} + \frac{1}{25}e^{-25Mt} + \ldots\right)\right]. \qquad (5—34)$$



Фиг. 5—14

Для случая линейно возрастающей нагрузки $p = \alpha t$

$$\bar{\sigma}_z \approx \alpha\left[t - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-Mt}\right] \qquad (5—35)$$

(для практических расчетов достаточно пользоваться этим трехчленом),

где $M = \frac{\pi^2 c}{h^2}$;

$$c = \frac{K(1+\varepsilon_{ср})}{\gamma a};$$

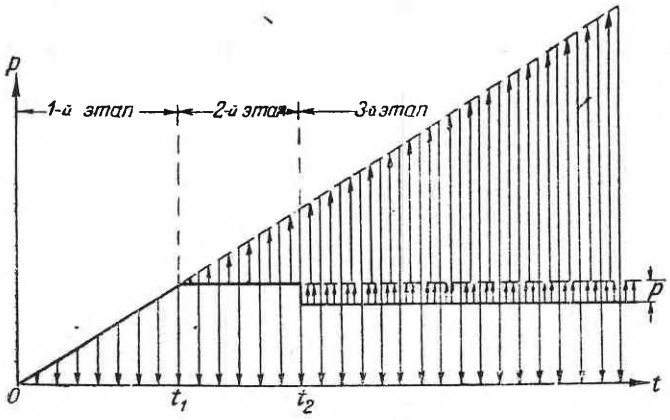
h — толщина слоя водопроницаемого сверху и снизу.

Обычно график изменения расчетной нагрузки для гидротехнических сооружений имеет вид, представленный на фиг. 5—14, где первый этап представляет собой строительный период (нагрузка увеличивается),

Таблица 5—7

Пример вычисления осадки для случая, совпадающего с приводимым на фиг. 5—14 и 5—15

t	Напряжение σ_z				Осадка
	первый этап	второй этап	третий этап	результирующие	
$t<t_1$	$\bar{\sigma}_z^{(1)} = \alpha\left(t - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-Mt}\right)$	—	—	$\bar{\sigma}_z = \bar{\sigma}_z^{(1)}$	$S_t = \bar{\sigma}_z \frac{ah}{1+\varepsilon_{ср}}$
$t_1<t<t_2$	$\bar{\sigma}_z^{(1)} = \alpha\left(t - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-Mt}\right)$	$\bar{\sigma}_z^{(2)} = -\alpha\left[(t-t_1) - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-M(t-t_1)}\right]$	—	$\bar{\sigma}_z = \bar{\sigma}_z^{(1)} + \bar{\sigma}_z^{(2)}$	$S_t = \bar{\sigma}_z \frac{ah}{1+\varepsilon_{ср}}$
$t>t_2$	$\bar{\sigma}_z^{(1)} = \alpha\left(t - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-Mt}\right)$	$\bar{\sigma}_z^{(2)} = -\alpha\left[(t-t_1) - \frac{h^2}{12c} + \frac{h^2}{12c}e^{-M(t-t_1)}\right]$	$\bar{\sigma}_z^{(3)} = -p\left[1 - \frac{8}{\pi^2}\left(e^{-M(t-t_2)} + \frac{1}{9}e^{-9M(t-t_2)} + \ldots\right)\right]$	$\bar{\sigma}_z = \bar{\sigma}_z^{(1)} + \bar{\sigma}_z^{(2)} + \bar{\sigma}_z^{(3)}$	$S_t = \bar{\sigma}_z \frac{ah}{1+\varepsilon_{ср}}$



Фиг. 5—15

второй этап — период монтажных и отделочных работ (нагрузка остается постоянной), а третий этап — период эксплуатации сооружения при заполненном водохранилище (нагрузка уменьшается за счет возникновения взвешивающего и фильтрационного давления). Можно, однако, рассматривать заданный график изменения нагрузки как результат одновременного действия реальных и фиктивных нагрузок (фиг. 5—15). Тогда, начиная со второго этапа, следует определять σ_z как результирующую положительных и отрицательных напряжений определенных соответственно по вышеуказанным формулам.

Удобно вычисления проводить, пользуясь образцом табл. 5—7.

3. Приближенный способ определения осадок во времени для случая плоской задачи[1]

Для упрощения расчетов при решении различных частных случаев одноразмерной задачи пользуются табл. 5—8.

В зависимости от эпюры возникающих в грунте напряжений приведены три случая:

случай 0 — равномерное по глубине давление (фиг. 5—16,*а*);

случай 1 — давление по закону треугольника с вершиной у поверхности основания (см. фиг. 5—16,*б*);

случай 2 — давление по закону треугольника с вершиной у подошвы слоя (см. фиг. 5—16,*в*).

Предварительно необходимо определить величину полной осадки S, тогда S_t для соответствующего табличного значения $N(t)$ определится по формуле:

$$S_t = QS, \qquad (5—36)$$

так как $Q = \frac{S_t}{S}$ (см. табл. 5—8).

Время, необходимое для достижения осадки S_t, определится по формуле:

$$t = \frac{4h^2}{\pi^2 c} N, \qquad (5—37)$$

где попрежнему

$$c = \frac{K(1+\varepsilon_{ср})}{\gamma a},$$

но h — высота слоя, водопроницаемого только сверху.

Комбинируя случаи 0—1 и 0—2 (фиг. 5—16,*г*, *д*), можно получить решение и при трапецоидальной эпюре. При имеющихся значениях Q значения N для трапецоидального распределения уплотняющих давлений определятся выражениями

для случая 0—1 (фиг. 5—16,*г*)

$$N_{0-1} = N_0 + (N_1 - N_0) J; \qquad (5—38)$$

для случая 0—2 (фиг. 5—16,*д*)

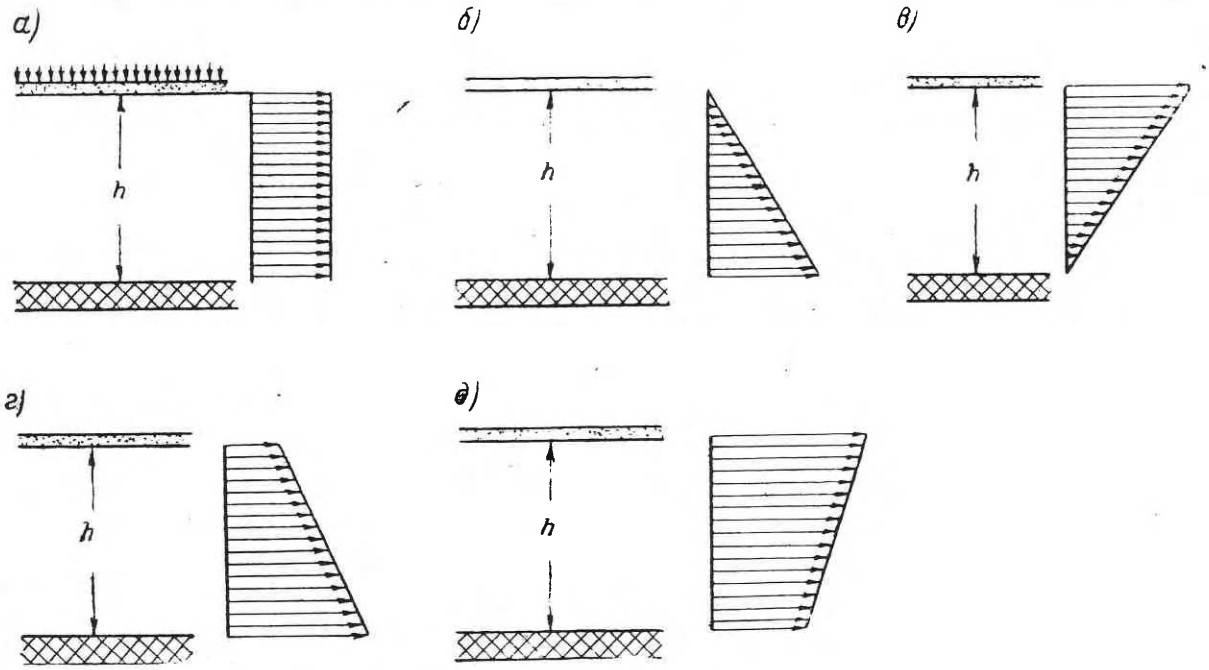
$$N_{0-2} = N_2 + (N_0 - N_2) J'. \qquad (5—39)$$

Таблица 5—8

Значения Q и N для вычисления осадок грунта как функции времени

$Q = \frac{S_t}{S}$	Величины N			$Q = \frac{S_t}{S}$	Величины N		
	случай 0	случай 1	случай 2		случай 0	случай 1	случай 2
0,05	0,005	0,06	0,002	0,55	0,59	0,84	0,32
0,10	0,02	0,12	0,005	0,60	0,71	0,95	0,42
0,15	0,04	0,18	0,01	0,65	0,84	1,10	0,54
0,20	0,08	0,25	0,02	0,70	1,00	1,24	0,69
0,25	0,12	0,31	0,04	0,75	1,18	1,42	0,88
0,30	0,17	0,39	0,06	0,80	1,40	1,64	1,08
0,35	0,24	0,47	0,09	0,85	1,69	1,93	1,36
0,40	0,31	0,55	0,13	0,90	2,09	2,35	1,77
0,45	0,39	0,63	0,18	0,95	2,80	3,17	2,54
0,50	0,49	0,73	0,24	1,00	∞	∞	∞

[1] Подробнее см. [10].



Фиг. 5--16. Возможные случаи напряжений, возникающих в грунте

а — случай 0—равномерное по глубине давление; *б* — случай 1—давление по закону треугольника с вершиной у поверхности основания; *в* — случай 2—давление по закону треугольника с вершиной у подошвы слоя; *г* — случай 0 — 1— давление по закону трапеции; *д* — случай 0—2 — давление по закону трапеции

где J и J' — интерполяционные коэффициенты, зависящие от отношения уплотняющих давлений при $z=0$ и $z=h$, т. е. от величины $V = \frac{\sigma_{z=0}}{\sigma_{z=h}}$; значения J и J' даны в табл. 5—9.

Случай 0—2 можно использовать для приближенного определения протекания осадки во времени при решении плоской задачи.

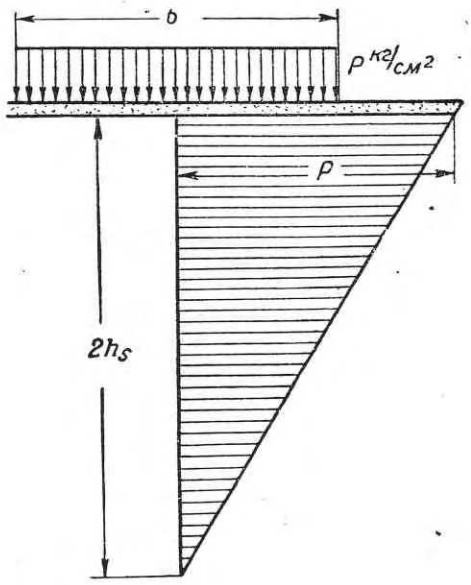
Таблица 5—9

Значения J и J'

Случай 0—1	V = 0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	J = 1,00	0,84	0,69	0,56	0,46	0,36	0,27	0,19	0,12	0,06	0,0
Случай 0—2	V = 1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0
	J' = 1,00	0,83	0,71	0,62	0,55	0,50	0,45	0,42	0,39	0,34	0,30
	V = 8,0	9,00	10,0	12,0	15,0	20,0	—	—	—	—	—
	J' = 0,27	0,25	0,23	0,20	0,17	0,13	—	—	—	—	—

4. Метод эквивалентного слоя для пространственной задачи

Выше был дан способ определения полной осадки в случае пространственной задачи методом эквивалентного слоя. Так как вместо осадки фундамента, имеющего заданные размеры, определяется равновеликая осадка слоя грунта, находящегося в условиях равномерного сжатия без возможности бокового расширения, то можно воспользоваться таблицей или формулами, определяющими S_t в случае одноразмерной задачи. Целесообразно эквивалентную эпюру уплотняющих давлений представить в виде треугольника с основанием у дренирующей поверхности, равным интенсивности нагрузки p, и высотой, равной $2h_S$, где h_S — толщина «эквивалентного» слоя (фиг. 5—17). В этом случае



Фиг. 5—17

формула для величины полной осадки останется прежней:

$$S = 2h_S \frac{a}{1+\varepsilon_{ср}} \cdot \frac{0+p}{2} = h_s \frac{ap}{1+\varepsilon_{ср}},$$

а затухание осадки во времени определится по табл. 5—8.

При двусторонней фильтрации S_t следует определять по случаю 0 при расчетной мощности слоя, равной h_S. При односторонней фильтрации S_t следует определять по случаю 2 при расчетной мощности слоя, равной $2h_S$.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВНИИГ, Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Геотехнические расчеты оснований, Стройиздат, 1941.
2. Герсеванов Н. М. и Польшин Д. Е., Теоретические основы механики грунтов и их практические применения, Стройиздат, 1948.
3. Горбунов-Посадов М. И., Осадки фундаментов на слое грунта, подстилаемом скальным основанием, Стройиздат, 1946.
4. Егоров К. Е., Методы расчета конечных осадок фундаментов, сборник трудов НИИ оснований и фундаментов № 13, Машстройиздат, 1949.
5. Маслов В. Н., К уплотнению глинистых грунтов во времени, журнал „Гидротехническое строительство" № 10, 1951.
6. Маслов Н. Н., Прикладная механика грунтов, Машстройиздат, 1949.
7. Роза С. А., Осадки гидротехнических сооружений на глинах, с малой влажностью, журнал „Гидротехническое строительство" № 9 1950.
8. Токарь Р. А., Учет бытового давления при расчете оснований глубокого заложения, журнал „Гидротехническое строительство" № 7, 1949.
9. Флорин В. А., Теория уплотнения земляных масс, Стройиздат 1948.
10. Цытович Н. А., Механика грунтов, Госстройиздат, 1951.
11. Черноградский В., Расчет осадок гидротехнических сооружений с учетом плана работ, журнал „Гидротехническое строительство" № 2, 1937.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

6—А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

6—1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

1) **Удельный вес** (γ_y) — вес (G) единицы объема (V_a) абсолютно плотного материала (без пор):

$$\gamma_y = \frac{G}{V_a} \; [г/см^3,\ кг/м^3,\ т/м^3]. \qquad (6—1)$$

Для определения так называемого абсолютного объема V_a пористого материала высушенный материал размалывают до частиц, проходящих через сито с отверстиями 0,2 *мм*, погружают в жидкость, не входящую во взаимодействие с материалом, и устанавливают суммарный объем зерен, который и принимают за объем материала в плотном состоянии. Считают удельный вес безразмерной величиной, сравнивая его с удельным весом воды.

2) **Объемный вес** (γ_0) — вес единицы объема (V) материала, взятого в естественном состоянии (с порами):

$$\gamma_0 = \frac{G}{V} \; [г/см^3,\ кг/м^3,\ т/м^3]. \qquad (6—2)$$

3) **Плотность материала** (ρ) — степень заполнения его объема твердым веществом:

$$\rho = \frac{\gamma_0}{\gamma_y} 100 \; [\text{в процентах по весу}]. \qquad (6—3)$$

4) **Пористость материала** (n) — степень заполнения объема материала порами. По величине пористость является дополнением плотности до 1 или до 100%:

$$n = 1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_y} \text{ или } n = \frac{\gamma_y - \gamma_0}{\gamma_y} 100 \; [\text{в \%}]. \qquad (6—4)$$

5) **Влажность (водопоглощение)** (W) — степень заполнения объема материала водой; определяется по разности весов образца материала, насыщенного водой (G_1) и сухого (G), в процентах от веса сухого материала (G) или объема (V).

Влажность (водопоглощение) по весу

$$W_{вес} = \frac{G_1 - G}{G} 100 \; [\text{в \%}]. \qquad (6—5)$$

Влажность (водопоглощение) по объему:

$$W_{об} = \frac{G_1 - G}{V} 100 \; [\text{в \%}], \qquad (6—6)$$

$$W_{об} = W_{вес}\,\gamma_0. \qquad (6—7)$$

6) **Коэффициент размягчения материала**—отношение предела прочности материала, насыщенного водой, к пределу прочности сухого материала; изменяется в пределах от нуля (полностью размокающие материалы) до единицы (абсолютно плотные материалы).

7) **Водопроницаемость** — способность материалов пропускать воду под давлением; измеряется количеством воды, прошедшим через 1 *см*² образца материала в течение 1 часа при постоянном давлении. При испытании толщина образца устанавливается условно в зависимости от материала (см. испытание бетона, ГОСТ 4800-49).

8) **Теплопроводность** — способность материала передавать тепло через толщу от одной своей поверхности к другой.

Единица измерения тепла — калория — количество тепла, потребного для нагревания 1 *г* воды на 1°С.

Большая калория=1 000 *кал*=1 килокалории (*ккал*).

Механический эквивалент тепла — 1 *ккал* — соответствует 427 *кгм* работы.

Коэффициент теплопроводности (λ) равен количеству тепла в килокалориях (Q), проходящего через образец данного материала толщиной δ *м*, площадью F за время T при разности температур (t_1—t_2) на противоположных плоско-параллельных поверхностях образца. При δ=1 *м*, F=1 *м*², t_1—t_2=1°С, T=1 час, λ=Q;

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F\,(t_1 - t_2)\,T} \; [ккал/м\ час\ град]. \qquad (6—8)$$

Коэффициент теплопроводности плотных материалов увеличивается по мере повышения удельного веса, а пористых — при повышении объемного веса, и имеет следующие значения:

органические материалы	0,25—0,35
минеральные материалы аморфные	0,5—1
минеральные материалы кристаллические	2,8—6
сталь	50
медь	300

9) **Теплоемкость** — свойство материалов поглощать при нагревании определенное количество тепла; коэффициент теплоемкости (c) — количество тепла (Q),

необходимого для нагревания материала весом G в 1 *кг* на 1°С. При $G=1$ *кг*, $t_1-t_2=1$°С,

$$c = Q;$$

$$Q = cG(t_1 - t_2); \qquad (6-9)$$

$$c = \frac{Q}{G(t_1 - t_2)} \ [ккал/кг\ град]. \qquad (6-10)$$

10). **Коэффициент линейного расширения** α — отношение приращения длины при нагревании на 1°С (Δl_0) к первоначальной длине (l_0).

Длина тела при его нагревании с температуры t_1 до t_2 определяется по формуле:

$$l = l_0(1 + \alpha t), \qquad (6-11)$$

где $t=(t_2-t_1)$.

11) **Коэффициент объемного расширения** (β) определяет увеличение объема тела при его нагревании на 1°С:

$$V = V_0(1 + \beta t), \qquad (6-12)$$

где V — конечный объем;
V_0 — начальный объем;
t — приращение температуры в град.

Зависимость между объемным и линейным коэффициентами расширения:

$$\beta = 3\alpha. \qquad (6-13)$$

12) **Морозостойкость — способность** насыщенного водой материала выдерживать многократное и попеременное замораживание и оттаивание.

Прочность морозостойкого материала после испытания не должна понижаться более чем на 25% при отсутствии видимых признаков разрушения. Потеря в весе может быть не более 5%.

6—2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА (ПЛОТНОСТИ) ЖИДКОСТЕЙ

Удельный вес (плотность) жидкостей определяется ареометром. Перевод показаний плотности в градусах Ве° при $t=12{,}5$° в значение удельного веса (плотности) по ареометру производится:

а) для жидкостей тяжелее воды

$$\gamma_y = \frac{145{,}88}{(145{,}88 - n)}; \qquad (6-14)$$

б) для жидкостей легче воды

$$\gamma_y = \frac{145{,}88}{(145{,}88 + n)}, \qquad (6-15)$$

где γ_y — соответствующая плотность жидкости по ареометру в $г/см^3$;
n — число градусов Ве°.

6—3. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ ОБЪЕМНЫЙ ВЕС ГЛАВНЕЙШИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 6—1

Объемные веса главнейших строительных материалов и полуфабрикатов с указанием допустимой нагрузки на транспортные средства

Наименование материалов	Единица измерения	Объемный вес в $кг/м^3$	Ориентировочная нагрузка: автомобиля (3 *т*)	Ориентировочная нагрузка: вагона широкой колеи (20-*т*)	Наименование материалов	Единица измерения	Объемный вес в $кг/м^3$	Ориентировочная нагрузка: автомобиля (3-*т*)	Ориентировочная нагрузка: вагона широкой колеи (20-*т*)
Асфальт в плитках . .	$м^3$	1 100	2,66	18	Деготь (смола жидкая)	$м^3$	940	—	—
Баллоны для кислорода (50 *л*)	шт.	90	30	—	Дернины	»	1 400	2,2	—
Бетон с гравием или каменным щебнем . . .	$м^3$	2 200—2 500	—	—	Железобетонные изделия	»	2 400	1,3	8
Бетон с кирпичным щебнем	»	1 800—2 000	—	—	Земля растительная сухая	»	1 200—1 400	2	14
Бетон шлаковый . . .	»	1 400—1 600	—	—	Известь негашеная . .	»	900—1 100	2,5	18
Битум в кусках	»	1 000	3,0	20	Известь-пушонка . . .	»	500—600	—	—
Гипс строительный (алебастр)	»	900—1 100	2,7	18	Известковое тесто . .	»	1 400	—	—
Глина кирпичная в рыхлом состоянии	»	1 500	2	14	Известняки	»	2 300—3 100	—	—
Гравий	»	1 500—1700	1,8	12	Камень бутовый . . .	»	1 600	—	—
Гранит в массивах и в обработанных плитках	»	2 700—3 000	—	—	Камень мостовой брусчатка	»	2 700	1,0	7,5

Продолжение табл. 6—1

Наименование материалов	Единица измерения	Объемный вес в *кг/м³*	Ориентировочная нагрузка: автомобиль (3-*т*)	Ориентировочная нагрузка: вагона широкой колеи (20-*т*)
Камни шлакобетонные сплошные в штабелях	*м³*	1 200—1 500	2,0	16—13
Кирпич красный . . .	1 000 шт.	3 350—3 750	0,9	5
Кирпич силикатный (известково-песчаный) . .	То же	3 700	0,8	5
Кирпичный щебень . .	*м³*	1 200—1 350	2,2	15
Лес круглый хвойный сырой	„	750	4	26
Лес хвойный полусухой	„	700	4,5	28
„ непосредственно из воды	„	800—850	3,5	23
Лес дубовый полусухой	„	900—1 000	3,5	23
Лес пиленый хвойный полусухой	„	600	5,0	33
Лес пиленый дубовый полусухой	„	850	3,5	23
Мел молотый в кулях и мешках	„	1 200	2,5	16
Опилки древесные навалом	„	150—200	4,5	—
Пек в кусках (каменноугольный)	„	900—1 200	3	20
Пергамин (рулон 20 *м²*)	1 рулон	7—19	—	—
Песок горный и речной	*м³*	1 500—1 700	1,8	12
„ шлаковый . . .	„	800	3,5	20
Песчаник в массиве . .	*м³*	2 200—2 700	—	—
Ракушечник	„	1 000—1 500	2	14
Растворы на песке . .	„	2 000—2 200	—	—
„ на шлаке . . .	„	1 500—1 800	—	—
Рубероид (рулон 20 *м²*)	1 рулон	17—30	—	—
Толь подкладочный (рулон 20 *м²*)	То же	11—19	—	—
Толь кровельный (рулон 20 *м²*)	„	11—16	—	—
Торф в кусках полусухой	*м³*	500—600	4,5	24
Хворост (ветки) лиственный	„	250	6	—
Цемент россыпью . . .	„	1 200—1 400	2,3	15
Шифер искусственный (этернит)	*м²*	8—10	—	—
Щебень естественного камня твердой породы	*м³*	1 700—1 860	—	—
Щебень средней прочности	„	1 600	—	—
Щебень мягкой породы	„	1 450	—	—
Шлак доменный гранулированный	„	600	3	15
Шлак котельный . . .	„	800	3	15

6—Б. СТАЛЬ И ЧУГУН ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ

6—4. СТАЛЬ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ

Для стальных конструкций применяют мартеновские, бессемеровские и томасовские стали, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 380-50 и 536-41; для сварных конструкций стали должны удовлетворять дополнительно требованиям по содержанию углерода, серы и фосфора.

Конструкции, подверженные непосредственному воздействию динамических нагрузок, должны изготовляться из мартеновской стали.

Стальные напорные трубопроводы гидростанций должны изготовляться: оболочка и все расчетные элементы — из мартеновской прокатной стали спокойной плавки марки Ст. 3, механические и крепежные детали — из стали марок Ст. 3, Ст. 4 и Ст. 5 (ГОСТ 380-50), литые детали — из стального литья марок 15-4022, 15-4028 и 35-5015 с обжигом отливки (ГОСТ 977-41).

Для металлических экранов плотин рекомендуется медистая и хромомедемарганцевая листовая сталь, характеризуемая высокими пределами текучести и большой зоной пластичности.

Расчетные характеристики стали:

а) удельный (объемный) вес
для листовой стали — 8 000 *кг/м³*;
для других видов проката — 7 850 *кг/м³*;

б) коэффициент линейного расширения — 0,000012.

Таблица 6—2

Механические свойства сортовой и фасонной стали (по ГОСТ 380-50)

Марка стали	Предел прочности при растяжении в *кг/мм²*	Предел текучести в *кг/мм²* не менее	Относительное удлинение в % не менее		Марка стали	Предел прочности при растяжении в *кг/мм²*	Предел текучести в *кг/мм²* не менее	Относительное удлинение в % не менее	
			δ_{10}	δ_5				δ_{10}	δ_5
Ст. 0	32—47	19	18	22	Ст. 5	50—53	28	17	21
Ст. 1	32—40	—	28	33	Ст. 5	54—57	28	16	20
Ст. 2	34—42	22	26	31	Ст. 5	58—62	28	15	19
Ст. 3	38—40	24	23	27	Ст. 6	60—63	31	13	15
Ст. 3	41—43	24	22	26	Ст. 6	64—67	31	12	14
Ст. 3	44—47	24	21	25	Ст. 6	68—72	31	11	13
Ст. 4	42—44	26	21	25	Ст. 7	70—74	—	9	11
Ст. 4	45—48	26	20	24	Ст. 7	75—79	—	8	10
Ст. 4	49—52	26	18	23	Ст. 7	80 и более	—	7	9

Примечания. 1. Определение предела текучести производится для марок Ст. 0, Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5 и Ст. 6 по требованию потребителя.

2. При заказе стали марок Ст. 0, Ст. 1, Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4 и Ст. 5 по требованию заказчика производится испытание на изгиб в холодном состоянии. При этом сталь должна выдержать без признаков разрушения загиб на 180° на оправке толщиной 2δ (δ — толщина образца) для Ст. 0 и Ст. 4 и толщиной 3δ для Ст. 5; Ст. 1, Ст. 2 и Ст. 3 испытываются без оправки; Ст. 6 и Ст. 7 на изгиб не испытываются. Условия испытания на изгиб относятся к стали диаметром или толщиной не более 25 *мм*. В случае испытания стали диаметром или толщиной более 25 *мм* условия оговариваются особо.

3. Указанные в табл. 6—2 нормы распространяются на сортовой и фасонный прокат толщиной от 8 до 40 *мм*, листовой и широкополосный толщиной от 8 до 20 *мм*. Для других толщин нормы устанавливаются особым соглашением.

4. δ_{10} и δ_5 — символ кратности образца, т. е. отношение длины образца к его диаметру $\left(\frac{l_0}{d_0}\right)$ в процентах.

Таблица 6—3

Механические свойства углеродистой круглой заклепочной стали диаметром от 8 до 40 *мм* включительно (по ГОСТ 499-41)

Марка стали	Предел прочности при растяжении в *кг/мм²*	Относительное удлинение в % не менее		Проба на осадку в частях первоначальной высоты образца		Проба на образование головки и расплющивание в холодном состоянии
		δ_{10}	δ_5	в холодном состоянии	в горячем состоянии	
Ст. 2	35—42	26	31	0,4	$^1/_2$	До диаметра, равного 2,5 диаметра прутка
Ст. 3	38—47	22	26	0,5	$^1/_3$	

Примечания. 1. При соответствии заданной марке стали норм по относительному удлинению и положительных результатах при производстве технических проб предел прочности может быть повышен на 2 *кг/мм²*.

2. Для заклепок диаметром менее 8 *мм* величина относительного удлинения может быть понижена на 1% (абсолютный) на каждый миллиметр уменьшения диаметра.

3. По требованию заказчика Ст. 3 должна поставляться с относительным удлинением не менее 24% при осадке в холодном состоянии—до 0,4 первоначальной высоты.

4. По требованию заказчика сталь испытывается на незакаляемость изгибом на 180° вплотную без оправки.

5. Обозначение δ_{10} и δ_5 (см. примечание 4 к табл. 6—2).

Таблица 6—4

Механические свойства литой углеродистой стали (по ГОСТ 977-41)

Группа	Марка	Механические свойства	
		предел прочности при растяжении в *кг/мм²*	относительное удлинение при δ_5 в % не менее
Нормального качества	15-4022	40	22
	25-4518	45	18
	35-5015	50	15
	45-5512	55	12
	55-6010	60	10

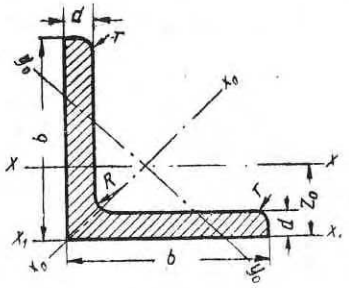
Примечание. В обозначении марок первые две цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента; вторые две цифры—предел прочности; последние две цифры—относительное удлинение.

6—5. СОРТАМЕНТЫ ФАСОННОЙ СТАЛИ

1. Уголки равнобокие (ОСТ 10014-39)

Таблица 6—5

Стандартные размеры и справочные величины



Фиг. 6—1

Условные обозначения:

b — ширина полки
d — толщина полки
R — радиус внутреннего закругления
r — радиусы закругления полки
J — момент инерции
r_x, r_{x_0} r_{y_0} — радиусы инерции
z_0 — расстояние до центра тяжести

№ профиля	Размеры в *мм*				Площадь профиля в $см^2$	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Расстояние до центра тяжести z_0 в *см*	Справочные величины для осей							
								$x-x$		x_0-x_0		y_0-y_0		x_1-x_1
	b	d	R	r				J_x в $см^4$	r_x в *см*	J_{x_0} макс. в $см^4$	r_{x_0} макс. в *см*	J_{y_0}мин. в $см^4$	r_{y_0} мин. в *см*	J_{x_1} в $см^4$
2	20	3 4	3,5	1,2	1,13 1,46	0,89 1,15	0,60 0,64	0,40 0,49	0,60 0,58	0,63 0,78	0,75 0,73	0,17 0,21	0,39 0,33	0,81 1,09
2,5	25	3 4	3,5	1,2	1,43 1,86	1,12 1,46	0,73 0,77	0,80 1,02	0,75 0,74	1,28 1,63	0,95 0,94	0,32 0,41	0,47 0,47	1,56 2,12
3	30	4 5	4,5	1,5	2,27 2,78	1,78 2,18	0,89 0,93	1,82 2,20	0,90 0,89	2,90 3,47	1,13 1,12	0,75 0,93	0,58 0,58	3,62 4,58
3,5	35	4 5	4,5	1,5	2,67 3,28	2,10 2,57	1,01 1,05	3,02 3,61	1,06 1,05	4,77 5,71	1,34 1,32	1,27 1,51	0,69 0,68	5,74 7,23
4	40	4 5 6	5,0	1,7	3,08 3,79 4,48	2,42 2,97 3,52	1,13 1,17 1,21	4,60 5,54 6,41	1,22 1,21 1,20	7,26 8,75 10,10	1,53 1,52 1,50	1,93 2,34 2,70	0,79 0,78 0,78	8,53 10,70 13,0
4,5	45	4 5 6	5,0	1,7	3,48 4,29 5,08	2,73 3,37 3,99	1,26 1,30 1,34	6,60 8,00 9,29	1,38 1,37 1,35	10,50 12,70 14,70	1,74 1,72 1,71	2,68 3,26 3,78	0,88 0,87 0,86	12,10 15,30 18,40
5	50	5 6	5,5	1,8	4,80 5,69	3,77 4,47	1,42 1,46	11,2 13,1	1,53 1,52	17,80 20,70	1,92 1,91	4,61 5,39	0,98 0,97	20,9 25,2

Продолжение табл. 6—5

№ профиля	Размеры в *мм*				Площадь профиля в $см^2$	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Расстояние до центра тяжести z_0 в *см*	Справочные величины для осей							
								$x-x$		x_0-x_0		y_0-y_0		x_1-x_1
	b	d	R	r				J_x в $см^4$	r_x в *см*	J_{x_0} макс. в $см^4$	r_{x_0} макс. в *см*	J_{y_0} мин. в $см^4$	r_{y_0} мин. в *см*	J_{x_1} в $см^4$
6	60	5 6 8	6,5	2,2	5,82 6,91 9,03	4,57 5,42 7,09	1,66 1,70 1,78	19,9 23,3 29,6	1,85 1,84 1,81	31,4 36,8 46,8	2,32 2,31 2,28	8,29 9,76 12,4	1,19 1,19 1,17	35,9 43,3 58,2
6,5	65	6 8 10	8,0	2,7	7,55 9,87 12,1	5,93 7,75 9,51	1,82 1,90 1,98	29,8 38,1 45,4	1,98 1,96 1,94	47,2 60,3 72,0	2,50 2,48 2,44	12,3 15,8 18,8	1,28 1,27 1,25	54,8 73,7 92,9
7,5	75	6 8 10 12	9,0	3,0	8,78 11,5 14,1 16,7	6,89 9,03 11,1 13,1	2,06 2,14 2,22 2,30	46,7 60,1 72,2 83,3	2,31 2,28 2,26 2,24	73,3 94,9 114 132	2,89 2,87 2,84 2,81	20,1 25,3 30,3 34,9	1,51 1,48 1,47 1,45	83,9 113 142 172
8	80	6 8 10	9,0	3,0	9,38 12,3 15,1	7,36 9,66 11,9	2,19 2,27 2,35	57,0 73,3 88,4	2,47 2,44 2,42	90 116 140	3,11 3,07 3,05	23,5 30,3 36,5	1,58 1,57 1,56	102 137 172
9	90	8 10 12 14	11	3,7	14,0 17,2 20,4 23,4	11,0 13,5 16,0 18,4	2,51 2,59 2,67 2,74	106 128 149 169	2,76 2,74 2,71 2,69	168 204 237 267	3,46 3,44 3,41 3,38	43,6 53,1 61,7 71,9	1,77 1,76 1,75 1,75	194 244 294 345
10	100	8 10 12 14 16	12	4,0	15,6 19,2 22,8 26,3 29,7	12,3 15,1 17,9 20,6 23,3	2,75 2,83 2,91 2,99 3,06	147 179 209 237 265	3,07 3,05 3,03 3,01 2,99	233 284 331 375 416	3,87 3,85 3,81 3,78 3,75	61,0 74,9 87,6 99,1 113	1,98 1,97 1,96 1,95 1,95	265 333 402 472 542

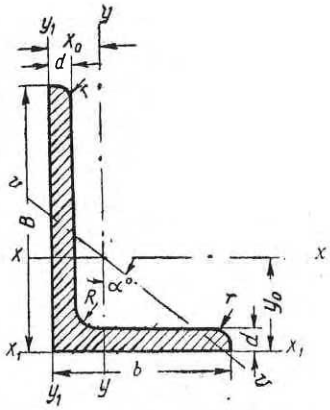
Продолжение табл. 6—5

№ профиля	Размеры в *мм*				Площадь профиля в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Расстояние до центра тяжести z_0 в *см*	Справочные величины для осей							
								$x-x$		x_0-x_0		y_0-y_0		x_1-x_1
	b	d	R	r				J_x в *см*⁴	r_x в *см*	J_{x_0} макс. в *см*⁴	r_{x_0} макс. в *см*	J_{y_0} мин. в *см*⁴	r_{y_0} мин. в *см*	J_{x_1} в *см*⁴
12	120	10	13	4,3	23,3	18,3	3,33	316	3,68	503	4,64	136	2,36	575
		12			27,6	21,7	3,41	371	3,66	590	4,62	153	2,35	693
		14			31,9	25,1	3,49	423	3,64	671	4,59	174	2,34	811
		16			36,1	28,4	3,56	474	3,62	749	4,56	199	2,34	931
		18			40,3	31,6	3,64	520	3,60	822	4,54	219	2,33	1 052
13	130	10	13	4,3	25,3	19,8	3,58	406	4,01	646	5,05	166	2,56	730
		12			30,0	23,6	3,66	477	3,99	759	5,03	196	2,55	880
		14			34,7	27,3	3,74	545	3,96	866	5,00	223	2,54	1 030
		16			39,3	30,9	3,82	608	3,93	967	4,96	249	2,52	1 182
15	150	12	15	5,0	34,9	27,4	4,15	745	4,62	1 186	5,83	305	2,98	1 347
		14			40,4	31,7	4,22	857	4,60	1 358	5,80	356	2,97	1 577
		16			45,8	36,0	4,30	961	4,58	1 522	5,77	399	2,95	1 808
		18			51,1	40,1	4,38	1 060	4,56	1 679	5,73	440	2,94	2 041
		20			56,4	44,3	4,46	1 154	4,52	1 830	5,70	478	2,91	2 275
18	180	14	15	5,0	48,8	38,3	4,97	1 515	5,57	2 405	7,03	625	3,58	2 721
		16			55,4	43,5	5,05	1 704	5,55	2 705	7,00	703	3,56	3 117
		18			61,9	48,6	5,15	1 885	5,52	2 994	6,94	775	3,54	3 515
20	200	16	18	6,0	62,0	48,7	5,55	2 355	6,17	3 755	7,79	954	3,93	4 264
		18			69,3	54,4	5,62	2 619	6,15	4 165	7,77	1 074	3,93	4 808
		20			76,5	60,1	5,70	2 868	6,13	4 560	7,74	1 175	3,92	5 355
		24			90,8	71,3	5,85	3 349	6,07	5 313	7,66	1 384	3,90	6 456
		30			111,5	88,3	6,03	3 999	5,96	6 373	7,49	1 685	3,87	8 093
22	220	16	21	7,0	68,4	53,7	6,04	3 168	6,80	5 046	8,59	1 307	4,37	5 661
		20			84,5	66,4	6,20	3 859	6,75	6 120	8,51	1 592	4,34	7 003
		24			100,4	78,8	6,35	4 514	6,71	7 148	8,44	1 870	4,32	8 560
		28			115,9	91,0	6,50	5 135	6,66	8 130	8,37	2 141	4,30	10 029
23	230	24	20	7,0	105,3	82,6	6,59	5 207	7,03	8 266	8,86	2 114	4,51	9 780

2. Уголки неравнобокие (ОСТ 10015-39)

Таблица 6—6

Стандартные размеры и справочные величины



Фиг. 6—2

Условные обозначения

B—ширина большой полки
b—ширина меньшей полки
R—радиус внутреннего закругления
r—радиус закругления полок
J—момент инерции
r_{min}, r_x, r_y—радиусы инерции
x_0, y_0—расстояния до центров тяжести

№ профиля	Размеры в *мм*					Площадь профиля в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Справочные величины для осей										Угол наклона оси tg α
								$x-x$		$y-y$		x_1-x_1		y_1-y_1		$v-v$		
	B	b	d	R	r			J_x в *см*⁴	r_x в *см*	J_y в *см*⁴	r_y в *см*	J_{x_1} мин. в *см*⁴	Расстояние до центра тяжести y_0 в *см*	J_{y_1} мин. в *см*⁴	Расстояние до центра тяжести x_0 в *см*	J_v мин. в *см*⁴	r_v мин. в *см*	
3/2	30	20	3	3,5	1,2	1,43	1,12	1,27	0,94	0,45	0,56	2,69	1,00	0,82	0,51	0,26	0,43	0,430
			4			1,86	1,46	1,61	0,93	0,56	0,55	3,61	1,04	1,12	0,55	0,34	0,43	0,422
3,5/2	35	20	4	3,5	1,2	2,06	1,62	2,48	1,10	0,53	0,53	5,62	1,25	1,11	0,51	0,37	0,42	0,320
			5			2,52	1,98	2,98	1,09	0,70	0,53	7,15	1,29	1,45	0,55	0,45	0,42	0,310
4,5/3	45	30	4	5,0	1,7	2,88	2,26	5,81	1,42	2,06	0,84	12,1	1,48	3,65	0,72	1,21	0,65	0,432
			6			4,18	3,28	8,15	1,40	2,85	0,83	18,3	1,56	5,65	0,82	1,69	0,64	0,423
6/4	60	40	5	7,0	2,3	4,83	3,79	17,4	1,90	6,19	1,13	35,8	1,95	10,8	0,97	3,62	0,87	0,432
			6			5,72	4,49	20,3	1,88	7,20	1,12	43,1	2,0	13,1	1,01	4,20	0,86	0,430
			8			7,44	5,84	25,8	1,86	9,04	1,10	57,9	2,08	17,9	1,09	5,39	0,85	0,420
7,5/5	75	50	5	8,0	2,7	6,11	4,80	34,9	2,39	12,5	1,43	69,9	2,39	20,9	1,11	7,24	1,09	0,435
			6			7,25	5,69	41,0	2,37	14,6	1,42	84,0	2,44	25,3	1,21	8,48	1,08	0,434
			8			9,47	7,43	52,4	2,35	18,6	1,40	113	2,52	34,3	1,29	10,9	1,07	0,428
			10			11,6	9,11	63,0	2,33	22,1	1,38	141	2,60	43,7	1,36	13,2	1,07	0,423

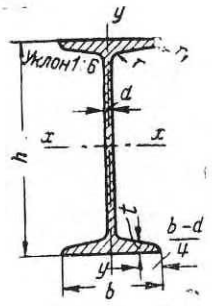
Продолжение табл. 6—6

№ профиля	Размеры в *мм*					Площадь профиля в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Справочные величины для осей										Угол наклона оси tg α
								x—x		*y—y*		*x*₁—*x*₁		*y*₁—*y*₁		*v—v*		
	B	*b*	*d*	*R*	*r*			J_x в *см*⁴	r_x в *см*	J_y в *см*⁴	r_y в *см*	J_{x_1} мин. в *см*⁴	Расстояние до центра тяжести y_0 в *см*	J_{y_1} мин. в *см*⁴	Расстояние до центра тяжести x_0 в *см*	J_v мин. в *см*⁴	r_v мин. в *см*	
8,5/5	80	55	6 8 10	8,0	2,7	7,85 10,3 12,6	6,16 8,06 9,90	50,6 64,9 78,2	2,53 2,51 2,49	19,6 24,9 29,8	1,58 1,56 1,54	102 136 171	2,56 2,64 2,72	33,4 45,3 57,5	1,33 1,41 1,48	11,1 14,3 17,4	1,19 1,19 1,18	0,462 0,458 0,452
9/6	90	60	6 8 10	9	3	8,78 11,5 14,1	6,90 9,08 11,10	72,4 93,2 113,0	2,87 2,85 2,82	26,0 33,2 39,8	1,72 1,70 1,68	145 194 244	2,81 2,96 3,05	43,4 58,6 74,4	1,41 1,49 1,56	14,7 19,3 23,5	1,30 1,29 1,29	0,437 0,433 0,429
10/7,5	100	75	8 10 12	10	3,3	13,5 16,7 19,7	10,6 13,1 15,5	135 163 190	3,16 3,13 3,11	65,0 78,5 91,1	2,19 2,17 2,15	266 333 402	3,11 3,20 3,27	113 143 173	1,88 1,96 2,04	35,4 42,6 49,8	1,62 1,60 1,59	0,548 0,545 0,541
12/8	120	80	8 10 12	11	3,7	15,6 19,2 22,8	12,2 15,1 17,9	229 279 326	3,83 3,81 3,79	82,3 99,6 116	2,30 2,27 2,25	459 575 692	3,85 3,93 4,01	137 178 210	1,88 1,96 2,04	47,6 57,7 66,6	1,75 1,73 1,71	0,438 0,436 0,432
13/9	130	90	8 10 12 14	12	4,0	17,2 21,3 25,2 29,1	13,5 16,7 19,8 22,8	297 362 424 484	4,15 4,12 4,10 4,08	118 143 167 189	2,62 2,59 2,57 2,55	583 731 879 1 023	4,08 4,16 4,25 4,35	195 245 297 349	2,11 2,19 2,27 2,35	66,5 81,4 94,8 109	1,97 1,95 1,94 1,93	0,471 0,469 0,467 0,464
15/10	150	100	10 12 14 16	13	4,3	24,3 28,8 33,3 37,7	19,1 22,6 26,2 29,6	557 655 749 839	4,78 4,76 4,73 4,71	201 235 267 297	2,87 2,85 2,83 2,81	1 120 1 347 1 575 1 804	4,81 4,90 4,98 5,06	335 405 476 549	2,35 2,43 2,51 2,59	115 137 156 175	2,18 2,18 2,16 2,15	0,439 0,437 0,434 0,430
18/12	180	120	12 14 16	14	4,7	34,9 40,4 45,8	27,4 31,7 35,9	1 156 1 326 1 490	5,75 5,73 5,71	417 476 532	3,46 3,44 3,41	2 325 2 717 3 111	5,79 5,87 5,95	695 816 939	2,82 2,90 2,98	240 279 309	2,62 2,62 2,60	0,440 0,438 0,436
20/12	200	120	12 14 16	14	4,7	37,3 43,2 49,0	29,2 33,9 38,4	1 546 1 776 1 997	6,45 6,42 6,38	428 489 647	3,39 3,36 3,34	3 188 3 725 4 264	6,64 6,72 6,80	696 818 941	2,68 2,76 2,84	259 295 331	2,64 2,61 2,60	0,364 0,362 0,360
20/15	200	150	12 16 18 20	17	5,7	41,0 53,9 60,3 66,5	32,2 42,3 47,3 52,2	1 666 2 155 2 388 2 614	6,37 6,32 6,30 6,27	810 1 043 1 153 1 258	4,44 4,40 4,38 4,35	3 181 4 272 4 800 5 344	6,08 6,27 6,33 6,41	1 347 1 812 2 048 2 285	3,62 3,78 3,85 3,93	436 562 623 683	3,26 3,23 3,21 3,21	0,552 0,549 0,548 0,546

3. Балки двутавровые (ОСТ 100[illegible]-39)

Таблица 6—7

Стандартные размеры и справочные величины



Фиг. 6—3

Условные обозначения

h — высота балки
b — ширина полки
d — толщина стенки
t — средняя толщина полки
r — радиус внутреннего закругления
r_1 — радиус закругления полки
J — момент инерции
W — момент сопротивления
r_x, r_y — радиусы инерции
S — статический момент полусечения

№ профиля	Размеры в *мм*						Площадь сечения в *см²*	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Ось *x—x*				Ось *y—y*		
	h	b	d	t	r	r_1			J_x в *см⁴*	W_x в *см³*	r_x в *см*	$r_x S_x$	J_y в *см⁴*	W_y в *см³*	r_y в *см*
10	100	68	4,5	7,6	6,5	3,3	14,3	11,2	245	49	4,14	3,9	33,0	9,7	1,52
12	120	74	5,0	8,4	7,0	3,5	17,8	14,0	436	72,7	4,95	5,2	46,9	12,7	1,62
14	140	80	5,5	9,1	7,5	3,8	21,5	16,9	712	104	5,76	6,6	64,4	16,1	1,73
16	160	88	6,0	9,9	8,0	4,0	26,1	20,5	1 130	141	6,58	8,8	93,1	21,2	1,89
18	180	94	6,5	10,7	8,5	4,3	30,6	24,1	1 160	185	7,36	10,0	122	26,0	2,00
20a	200	100	7,0	11,4	9,0	4,5	35,5	27,9	2 370	237	8,15	12,1	158	31,5	2,12
b	200	102	9,0	11,4			39,5	31,1	2 500	250	7,96	15,2	169	33,1	2,06
22a	220	110	7,5	12,3	9,5	4,8	42,0	33,0	3 400	309	8,99	14,2	225	40,9	2,31
22b	220	112	9,5	12,3			46,4	36,4	3 570	325	8,78	17,8	239	42,7	2,27
24a	240	116	8,0	13,0	10	5,0	47,7	37,4	4 570	381	9,77	16,5	280	48,4	2,42
b	240	118	10,0	13,0			52,6	41,2	4 800	400	9,57	20,4	297	50,4	2,38
27a	270	122	8,5	13,7	10,5	5,3	54,6	42,8	6 550	485	10,9	19,9	345	56,6	2,51
b	270	124	10,5	13,7			60,0	47,1	6 870	509	10,7	24,0	366	58,9	2,47
30a	300	126	9,0	14,4	11	5,5	61,2	48,0	8 950	597	12,1	23,1	400	63,5	2,55
b	300	128	11,0	14,4			67,2	52,7	9 400	627	11,8	28,0	422	65,9	2,50
c	300	130	13,0	14,4			73,4	57,4	9 850	657	11,6	32,5	445	68,5	2,46

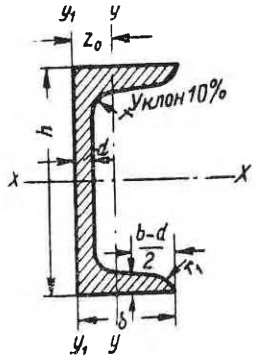
Продолжение табл. 6—7

№ профиля	Размеры в *мм*						Площадь сечения в $см^2$	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Ось $x-x$				Ось $y-y$		
	h	b	d	t	r	r_1			J_x в $см^4$	W_x в $см^3$	r_x в *см*	$r_x S_x$	J_y в $см^4$	W_y в $см^3$	r_y в *см*
33a	330	130	9,5	15,0	11,5	5,8	68,1	53,4	11 900	721	13,2	26,9	460	70,7	2,60
b	330	132	11,5	15,0			74,7	58,6	12 500	757	12,9	32,2	484	73,4	2,55
c	330	134	13,5	15,0			81,3	63,8	13 100	794	12,7	37,2	510	76,1	2,51
36a	360	136	10,0	15,8	12	6	76,3	59,9	15 760	875	14,4	30,7	552	81,2	2,69
b	360	138	12,0	15,8			83,5	65,6	16 530	919	14,1	36,4	582	84,3	2,64
c	360	140	14,0	15,8			90,7	71,2	17 310	962	13,8	41,9	612	87,4	2,60
40a	400	142	10,5	16,5	12,5	6,3	86,1	67,6	21 720	1 090	15,9	35,7	660	93,2	2,77
b	400	144	12,5	16,5			94,1	73,8	22 780	1 140	15,6	41,8	692	96,2	2,71
c	400	146	14,5	16,5			102	80,1	23 850	1 190	15,2	48,2	727	99,6	2,65
45a	450	150	11,5	18,0	13,5	6,8	102	80,4	32 240	1 430	17,7	44,3	885	114	2,89
45b	450	152	13,5	18,0			111	87,4	33 760	1 500	17,4	51,3	894	118	2,84
c	450	154	15,5	18,0			120	94,5	35 280	1 570	17,1	58,2	938	122	2,79
50a	500	158	12,0	20,0	14	7,0	119	93,6	46 470	1 860	19,7	51,4	1 120	142	3,07
b	500	160	14,0	20,0			129	101	48 560	1 940	19,4	59,4	1 170	146	3,01
c	500	162	16,0	20,0			139	109	50 640	2 080	19,0	66,9	1 220	151	2,96
55a	550	166	12,5	21,0	14,5	7,3	134	105	62 870	2 290	21,6	58,5	1 370	164	3,19
b	550	168	14,5	21,0			145	114	65 640	2 390	21,2	67,3	1 420	170	3,14
c	550	170	16,5	21,0			156	123	68 410	2 490	20,9	75,6	1 480	175	3,08
60a	600	176	13,0	22,0	15	7,5	151	118	83 860	2 800	23,5	67,3	1 700	193	3,37
b	600	178	15,0	22,0			163	128	87 460	2 920	23,2	76,0	1 770	199	3,30
c	600	180	17,0	22,0			175	137	91 060	3 040	22,8	85,3	1 840	205	3,24

4. Швеллер (ОСТ 10017-39)

Таблица 6—8

Стандартные размеры и справочные величины



Фиг. 6—4

Условные обозначения

h—высота швеллера
b—ширина полки
d—толщина стенки
t—средняя толщина стенки
r—радиус внутреннего закругления
r_1—радиус закругления полки
W—момент сопротивления
r_x, r_y—радиусы инерции
z_0—расстояние между осями y—y и y_1—y_1

№ профиля	Размеры в *мм*						Площадь сечения в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Справочные величины для осей							z_0 в *см*
									$x-x$			$y-y$			y_1-y_1	
	h	b	d	t	r	r_1			W_x в *см*³	J_x в *см*⁴	r_x в *см*	W_y в *см*³	J_y в *см*⁴	r_y в *см*	J_{y_1} в *см*⁴	
5	50	37	4,5	7,0	7,0	3,50	6,93	5,44	10,4	26,0	1,94	3,55	8,3	1,10	20,9	1,35
6,5	65	40	4,8	7,5	7,5	3,75	8,54	6,70	17,0	55,2	2,54	4,59	12,0	1,19	28,3	1,38
8	80	43	5,0	8,0	8,0	4,0	10,24	8,04	25,3	101,3	3,15	5,79	16,6	1,27	37,4	1,43
10	100	48	5,3	8,5	8,5	4,25	12,74	10,00	39,7	198,3	3,95	7,80	25,6	1,41	54,9	1,52
12	120	53	5,5	9,0	9,0	4,50	15,36	12,06	57,7	346,3	4,75	10,17	37,4	1,56	77,7	1,62
14 a	140	58	6,0	9,5	9,5	4,75	18,51	14,53	80,5	563,7	5,52	13,01	53,2	1,70	107,1	1,71
14 b	140	60	8,0	9,5	9,5	4,75	21,31	16,73	87,1	609,4	5,35	14,12	61,1	1,69	120,6	1,67
16 a	160	63	6,5	10,0	10,0	5,0	21,95	17,23	108,3	866,2	6,28	16,30	73,3	1,83	144,1	1,80
16 b	160	65	8,5	10,0	10,0	5,0	25,15	19,74	116,8	934,5	6,10	17,55	83,4	1,82	160,8	1,75
18 a	180	68	7,0	10,5	10,5	5,25	25,69	20,17	141,4	1 272,7	7,04	20,03	98,6	1,96	189,7	1,88
18 b	180	70	9,0	10,5	10,5	5,25	29,29	22,99	152,2	1 369,9	6,84	21,52	111,0	1,95	210,1	1,84

Продолжение табл. 6—8

№ профиля	Размеры в *мм*						Площадь сечения в $см^2$	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Справочные величины для осей							z_0 в *см*
									x—x			*y—y*			$y_1—y_1$	
	h	b	d	t	r	r_1			W_x в $см^3$	J_x в $см^4$	r_x в *см*	W_y в $см^3$	J_y в $см^4$	r_y в *см*	J_{y_1} в $см^4$	
20 a	200	73	7,0	11,0	11,0	5,5	28,83	22,63	178,0	1 780,4	7,86	24,20	128,0	2,11	244,0	2,01
20 b	200	75	9,0	11,0	11,0	5,5	32,83	25,77	191,4	1 913,7	7,64	25,88	143,6	2,09	268,4	1,95
22 a	220	77	7,0	11,5	11,5	5,75	31,84	24,99	217,6	2 393,9	8,67	28,17	157,8	2,23	298,2	2,10
22 b	220	79	9,0	11,5	11,5	5,75	36,24	28,45	233,8	2 571,4	8,42	30,05	176,4	2,21	326,3	2,03
24 a	240	78	7,0	12,0	12,0	6,0	34,21	26,55	254,3	3 052,2	9,45	30,47	173,8	2,25	324,6	2,10
24 b	240	80	9,0	12,0	12,0	6,0	39,00	30,62	273,5	3 282,6	9,17	32,51	194,1	2,23	354,8	2,03
24 c	240	82	11,0	12,0	12,0	6,0	43,81	34,39	292,7	3 513,0	8,96	34,42	213,4	2,21	388,1	2,00
27 a	270	82	7,5	12,5	12,5	6,25	39,27	30,83	323,1	4 362,0	10,54	35,52	215,6	2,34	393,1	2,13
27 b	270	84	9,5	12,5	12,5	6,25	44,67	35,07	347,4	4 690,1	10,25	37,72	239,2	2,31	428,2	2,06
27 c	270	86	11,5	12,5	12,5	6,25	50,07	39,30	371,7	5 018,1	10,10	39,79	261,4	2,28	466,8	2,03
30 a	300	85	7,5	13,5	13,5	6,75	43,89	34,45	403,2	6 047,9	11,72	41,10	259,5	2,43	466,5	2,17
30 b	300	87	9,5	13,5	13,5	6,75	49,59	39,16	433,2	6 497,9	11,41	44,03	289,2	2,41	515,2	2,13
30 c	300	89	11,5	13,5	13,5	6,75	55,89	43,81	463,2	6 947,9	11,15	46,38	315,8	2,38	559,7	2,09
33 a	330	88	8,0	14,0	14,0	7,0	49,50	38,70	489,5	8 076,8	12,80	46,65	307,5	2,50	547,6	2,21
33 b	330	90	10,0	14,0	14,0	7,0	55,90	43,88	525,8	8 675,7	12,46	49,32	338,4	2,46	593,2	2,14
33 c	330	92	12,0	14,0	14,0	7,0	62,50	49,06	562,1	9 274,7	12,18	51,81	367,9	2,43	643,2	2,10
36 a	360	96	9,0	16,0	16,0	8,0	60,89	47,80	659,7	11 874,2	13,97	63,54	455,0	2,73	818,4	2,44
36 b	360	98	11,0	16,0	16,0	8,0	68,09	53,45	702,9	12 651,8	13,63	66,85	496,7	2,70	880,4	2,37
36 c	360	100	13,0	16,0	16,0	8,0	75,29	59,10	746,1	13 429,4	13,36	70,02	536,4	2,67	947,9	2,34
40 a	400	100	10,5	18,0	18,0	9,0	75,05	58,91	878,9	17 577,9	15,30	78,83	592,0	2,81	1067,7	2,49
40 b	400	102	12,5	18,0	18,0	9,0	83,05	65,19	932,2	18 644,5	14,98	82,52	640,0	2,78	1135,6	2,44
40 c	400	104	14,5	18,0	18,0	9,0	91,05	71,47	985,6	19 711,2	14,71	86,19	687,8	2,75	1220,7	2,42

5. Сортамент горячекатанной полосовой стали (по ГОСТ 103-51)

Таблица 6—9

Ширина в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг* при толщине стали в *мм*					
	4	5	6	7	8	10
12	0,38	0,47	0,57	0,66	0,75	—
14	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	—
16	0,50	0,63	0,75	0,88	1,00	1,26
18	0,57	0,71	0,85	0,99	1,13	1,41
20	0,63	0,79	0,94	1,10	1,26	1,57
22	0,69	0,86	1,04	1,21	1,38	1,73
25	0,79	0,98	1,18	1,37	1,57	1,96
30	0,94	1,18	1,41	1,65	1,88	2,36
35	1,10	1,37	1,65	1,92	2,20	2,75
40	1,26	1,57	1,88	2,20	2,21	3,14
45	1,41	1,77	2,12	2,47	2,83	3,53
50	1,57	1,96	2,36	2,75	3,14	3,93
55	1,73	2,16	2,59	3,02	3,45	4,32
60	1,88	2,36	2,83	3,30	3,77	4,71
65	2,04	2,55	3,06	3,57	4,08	5,10
70	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	5,50
75	2,36	2,94	3,53	4,12	4,71	5,89
80	2,51	3,14	3,77	4,40	5,02	6,28
90	2,83	3,53	4,24	4,95	5,65	7,07
100	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,85
110	3,45	4,32	5,18	6,05	6,91	8,64
120	3,77	4,71	5,65	6,59	7,54	9,42
130	4,08	5,10	6,12	7,14	8,16	10,21
140	4,40	5,50	6,59	7,69	8,79	10,99
150	4,71	5,89	7,07	8,24	9,42	11,78
160	5,02	6,28	7,54	8,79	10,05	12,56
180	5,65	7,07	8,48	9,89	11,30	14,13
200	6,28	7,85	9,42	10,99	12,56	15,70

6. Сортамент стали прокатной широкополосной универсальной (ГОСТ 82-51)

Таблица 6—10

Толщина в *мм*	Ширина в *мм* с градациями через 10 *мм*	Вес 1 *м*² в *кг*	Толщина в *мм*	Ширина в *мм* с градациями через 10 *мм*	Вес 1 *м*² в *кг*
4	200 – 300	31,4	18	200—1 050	141,3
6	200—1 050	47,1	20	200—1 050	157,0
7	200—1 050	54,9			
8	200—1 050	62,8	22	200—1 050	172,5
9	200—1 050	70,6			
10	200—1 050	78,5	25	200—1 050	196,3
12	200—1 050	94,2	26	200 – 1 050	204,17
14	200—1 050	109,8	28	200—1 050	219,8
16	200—1 050	125,6	30	200—1 050	235,3

Примечание. Сталь толщиной 32, 36, 40, 45 и 50 *мм* прокатывается шириной от 200 до 1 050 *мм*.

7. Сталь прокатная листовая

а) Сталь тонколистовая и толстолистовая

Сталь тонколистовая имеет толщину от 0,9 до 3,75 *мм*, ширину от 600 до 1 400 *мм* и длину — от 1 200 до 2 800 *мм* (по заказу — от 3 100 до 12 100 *мм*) (по ГОСТ 3680-47).

Сталь толстолистовая имеет толщину от 4 до 60 *мм*, ширину — от 600 до 3 000 *мм* и длину — до 12 000 *мм* (по ГОСТ 10019-39).

Таблица 6—11

Вес 1 *м*² листовой стали

Толщина в *мм*	Вес в *кг*	Толщина в *мм*	Вес в *кг*	Толщина в *мм*	Вес в *кг*	Толщина в *мм*	Вес в *кг*
0,9	7,07	1,75	13,74	4,0	31,40	8	62,80
1,0	7,85	2,0	15,70	4,5	35,32	9	70,15
1,2	9,42	2,5	19,68	5,0	37,25	10	78,50
1,25	9,82	3,0	23,65	6,0	47,10	11	86,35
1,5	11,78	3,5	27,48	7,0	54,95	12	94,20

б) Сталь волнистая

Таблица 6—12

Сортамент волнистой стали (по ГОСТ 3685-47)

Ориентировочная ширина в *мм*	Длина волны в *мм*	Высота волны в *мм*	Толщина в *мм*	Длина листа в *см*
835; 690; 570; 835 и 640	130 100	35 30	От 1 до 1,5 через 0,1 и 1,75	142; 150; 160 и 200

в) Сталь рифленая листовая

Таблица 6—13

Сортамент рифленой листовой стали (по ГОСТ 10026-39)

Высота рифа в *мм*	Толщина листа с рифами в *мм*	Ширина в *мм*	Длина в *мм*
1,0	5	710—1 100	1 500—4 000
1,5	6	900—1 100	2 000—6 000
1,5	8	1 000—1 250	2 000—6 000
2,0	10	1 000—1 250	2 000—6 000

8. Сталь квадратная

Таблица 6—14

Размеры и вес квадратной стали с прямыми углами (по ГОСТ 2591-51)

Сторона квадрата в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Сторона квадрата в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Сторона квадрата в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Сторона квадрата в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг*
6	0,28	22	3,80	65	33,2	125	120,3
7	0,38	25	4,91	70	38,5	130	130,3
8	0,50	28	6,15	75	44,2	140	150,9
9	0,63	30	7,07	80	50,2	150	173,2
10	0,79	32	8,04	85	56,6	150	197,0
11	0,95	35	9,62	90	63,6	170	222,5
12	1,13	38	11,3	95	74,5	180	249,8
14	1,54	40	12,6	100	78,5	190	277,8
15	1,77	45	15,9	105	84,9	200	307,9
16	2,01	50	19,6	110	93,1	—	—
18	2,54	55	23,7	115	101,8	—	—
20	3,14	60	28,3	120	110,9	—	—

9. Сталь для железобетона

Таблица 6—15

Сталь горячекатанная круглая (по ГОСТ 2590-51)

Диаметр в *мм*	Площадь сечения в *мм²*	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Диаметр в *мм*	Площадь сечения в *мм²*	Вес 1 *пог. м* в *кг*
5,0	19,63	0,154	26	531	4,17
5,5	23,76	0,187	27	573	4,49
6,0	28,27	0,222	28	616	4,84
6,5	33,18	0,26	30	707	5,55
7,0	38,48	0,30	32	804	6,31
8,0	50,27	0,39	33	855	6,71
9,0	63,62	0,50	34	908	7,13
10,0	79,0	0,62	35	962	7,50
11,0	95	0,75	36	1 018	7,99
12,0	113	0,89	38	1 134	8,9
13,0	133	1,04	39	1 195	9,38
14,0	154	1,21	40	1 257	9,87
15,0	177	1,39	42	1 385	10,88
16,0	201	1,58	43	1 452	11,39
17,0	227	1,78	45	1 590	12,49
18,0	254	2,00	48	1 810	14,21
19,0	284	2,23	50	1 964	15,41
20,0	314	2,47	52	2 124	16,70
21,0	346	2,72	54	2 290	17,96
22,0	380	2,98	55	2 376	18,6
23,0	415	3,26	56	2 463	19,36
24,0	452	3,55	58	2 642	20,7
25,0	491	3,85	60	2 827	22,2

Примечания. 1. Сталь прокатывается также диаметром:
а) от 60 до 130 *мм* – с градацией через 5 *мм*;
б) от 130 до 200 *мм* – с градацией через 10 *мм*.

2. Длина по заказу:
а) до 12 *м* — для стали диаметром 10—30 *мм*;
б) до 9 *м* — для стали диаметром 32—50 *мм*.

10. Проволока стальная (по ГОСТ 3282-46)

Таблица 5—16

Диаметр в *мм*	Сечение в *мм²*	Вес 1 000 *пог. м* в *кг*	Диаметр в *мм*	Сечение в *мм²*	Вес 1 000 *пог. м* в *кг*
0,8	0,5	3,9	1,4	1,5	12,1
1,0	0,8	6,2	4,0	12,6	98,6

11. Сортамент арматуры периодического профиля (по ГОСТ 5781-51)

Таблица 6—17

№ профиля	Арматура горячекатанная из стали марки Ст. 5: площадь в *см²*	Арматура горячекатанная из стали марки Ст. 5: вес в *кг/пог. м*	Арматура холодносплющенная из стали марок Ст. 0 и Ст. 3: деформированная путем протяжки (сплющенная): площадь в *см²*	деформированная путем протяжки (сплющенная): вес в *кг/пог. м*	прокатка с поперечными деформациями, в двух взаимно перпендикулярных направлениях: площадь в *см²*	прокатка с поперечными деформациями, в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вес в *кг/пог. м*
6	—	—	0,24	0,20	0,25	0,20
8	—	—	0,42	0,35	0,45	0,35
10	—	—	0,66	0,55	0,71	0,55
12	1,16	0,91	0,94	0,80	1,02	0,80
14	1,54	1,21	1,28	1,08	1,38	1,09
15	—	—	1,48	1,25	1,58	1,19
16	2,00	1,57	1,67	1,41	1,78	1,46
18	2,37	2,02	2,11	1,78	2,26	1,81
19	—	—	2,36	2,00	2,54	1,92
20	3,16	2,48	2,61	2,20	2,80	2,23
21	—	—	2,88	2,43	3,08	2,45
22	3,80	2,98	3,15	2,66	3,37	2,70
23	—	—	3,44	2,90	—	—
24	4,51	3,54	3,75	3,16	3,98	3,20
25	—	—	4,07	3,44	4,32	3,31
26	5,35	4,20	4,41	3,72	—	—
27	—	—	4,75	4,61	—	—
28	6,26	4,92	5,10	4,80	5,42	4,12
30	7,25	5,70	—	—	—	—
32	8,25	6,48	—	—	—	—

Примечания. 1. Арматура периодического профиля изготовляется горячекатанной из стали марки Ст. 5 и холодносплющенной из стали марок Ст. 0 и Ст. 3

2. Расчетные пределы текучести—3 000—3 500 *кг/см²*.

3. Профили номеров более № 32 поставляются по особому соглашению.

12. Скобы строительные

Таблица 6—18

Рабочая длина×длина ножки×толщина в *мм*	Вес 1 шт. в *кг*		Рабочая длина×длина ножки×толщина в *мм*	Вес 1 шт. в *кг*	
	круглой	квадратной		круглой	квадратной
200×80×8	0,14	0,18	400×120×12	0,57	0,73
200×80×10	0,22	0,29	400×120×25	0,89	1,13

6—6. СТАЛЬ ДЛЯ ШПУНТОВЫХ СВАЙ

Шпунтовые сваи изготовляются из мартеновской стали Ст.3 и Ст.5 с добавлением меди от 0,25 до 0,35%, а также из стали марки НЛ2 (ГОСТ 5058-49).

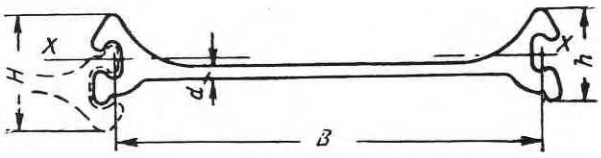
Для защиты шпунта от коррозии применяют покраски: битуминозные, дегтевые, асфальтовым лаком и кузбасслаком.

Расход лака на нанесение первого слоя составляет 100—120 *г* на 1 *м*² окрашиваемой поверхности, на второй слой — около 80 *г*.

Шпунтовые сваи имеют профили (по ГОСТ 4781-49): 1) сталь шпунтовая плоская (ШП-1); 2) корытная (ШК-1); 3) сталь шпунтовая зетовая (ШД-1), вырабатываемая по шести профилям.

Таблица 6—19

Сортамент шпунтовых свай плоского профиля

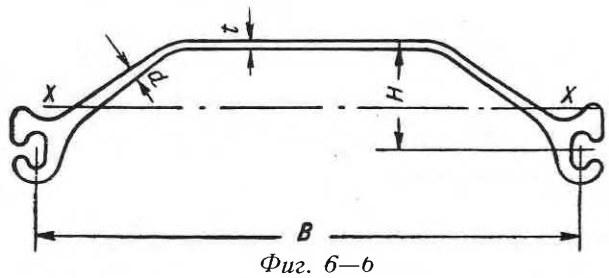


Фиг. 6—5

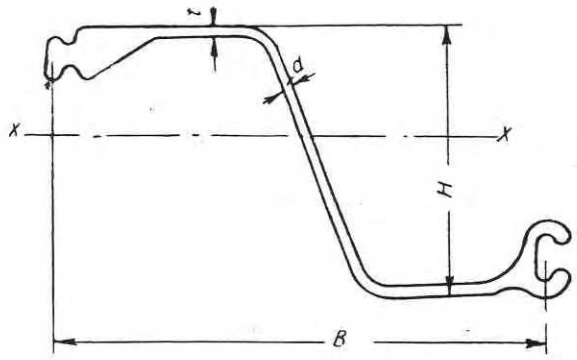
Условные обозначения профиля	Размеры в *мм*				Площадь поперечного сечения в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Момент инерции в *см*⁴	Момент сопротивления в *см*³	Длина в *м*
	B	*H*	*h*	*d*	*F*	*G*	*J*	*W*	
ШП-1	400	103	79	10	85	67	290	71	12—25

Таблица 6—20

Сортамент шпунтовых свай корытного и зетового профилей



Фиг. 6—6



Фиг. 6—7

Условные обозначения профиля	Размеры в *мм*				Площадь поперечного сечения в *см*²	Вес 1 *пог. м* в *кг*	Момент инерции в *см*⁴	Момент сопротивления в *см*³	Длина в *м*
	B	*H*	*t*	*d*	*F*	*G*	*J*	*W*	
ШК-1	500	90	8	8	64	50	1 065	150	12—15
ШД-1	400	150	8	8	56	44	1 843	246	8—12
ШД-2	400	210	9	8	62	49	4 220	400	8—14
ШД-3	500	270	12	10	90	71	10 360	767	10—16
ШД-4	500	320	14	11	103	81	17 010	1 060	16—22
ШД-5	500	360	16	12	131	103	28 110	1 560	18—25
ШД-6	500	380	22	16	165	130	38 500	2 025	18—25

Примечание. Профили изготовляются с двумя монтажными отверстиями диаметром 5 *мм*, расположенными на продольной оси стенки на расстоянии 500 *мм* от концов.

6—7. ЧУГУННОЕ ЛИТЬЕ

Отливки из чугуна, подвергающиеся внутреннему давлению, и прочие ответственные отливки изготовляются в соответствии с ГОСТ 2611-44 с обязательным для первых дополнительным испытанием. Все прочие чугунные отливки должны изготовляться в соответствии с ГОСТ 1412-48.

Механические свойства сварных соединений и наплавленного металла, а также марка электрода должны удовлетворять требованиям ГОСТ 2523-51.

Таблица 6—21

Характеристика отливок из серого чугуна для строительных конструкций (по ГОСТ 1412-48)

Обозначение марки	Предел прочности в *кг/см²* при			Стрелка прогиба в *мм* при расстоянии между опорами в *мм*		Твердость в местах, подлежащих обработке, $H_Б$
	разрыве	изгибе	сжатии	600	300	
	не менее					
Сч 12—28	1 200	2 800	5 000	6	2	143—229
Сч 15—32	1 500	3 200	6 500	8	2,5	163—229
Сч 18—36	1 800	3 600	7 000	8	2,5	170—229
Сч 21—40	2 100	4 000	7 500	9	3	170—241

Примечание. $H_Б$ — твердость по Бринеллю, определяемая вдавливанием стального шарика силой P · $H_Б = \frac{P}{F}$.

6—В. ЛЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6—8. БРЕВНА

Бревна строительные, применяемые для гидротехнического строительства без продольной распиловки, изготовляются из сосны, лиственницы, кедра, пихты и по качеству разделяются на три сорта (марки): первый, второй и третий.

В бревнах всех сортов (марок) не допускаются гнили всякие, заболонная краснина и кривизна разносторонняя. Допускаемые пороки древесины с ограничениями устанавливаются по ГОСТ 468-49 и 4372-48. Бревна должны быть очищены от сучьев вровень с поверхностью, опилены под прямым углом к продольной оси и окорены.

Влажность бревен для несущих конструкций, пролетных строений и опор мостов при приемке не должна превышать 25%.

Для подводных конструкций (по ГОСТ 3061-46) применяются сырые лесоматериалы влажностью не менее 23% и далее без ограничений; для надводных конструкций рекомендуется применять полусухие лесоматериалы (влажностью 18—23%). Применение полусухих материалов для подводных конструкций допускается лишь при наличии технического обоснования.

Таблица 6—22

Классификация круглого леса хвойных пород (по ГОСТ 468-49)

Основные виды	Подразделения	Размеры	
		толщина в верхнем отрубе в *см*	длина в *м*
Бревна	а) Пиловочные	14 и более	От 2 до 15 с градацией через 0,25
	б) Строительные	12 „ „	От 4 до 16 с градацией через 0,25
Кругляк тонкий	а) Подтоварник	8—11	От 3 до 9 с градацией через 0,25
	б) Жерди	3— 7	

Правила маркировки, сортировка, укладка, обмазка и приемка — см. ГОСТ 2292-49.

Назначение сорта материала в зависимости от класса гидротехнического сооружения (по ГОСТ 3061-46) — см. гл. 8.

Таблица 6—23

Основной сортамент бревен для гидротехнического строительства, применяемых без продольной распиловки

Вид бревен	Размеры бревен	
	диаметры в верхнем торце в *см*	длина в *м*
Бревна строительные для конструкций гидротехнических сооружений (по ГОСТ 468-49)	От 12 до 30 с градацией через 2	От 4,0 до 9,0 с градацией через 0,25
Бревна для пролетных строений мостов (по ГОСТ 468-49)	От 22 до 34 с градацией через 2	6,5; 8,5 и от 10,0 до 16,0 с градацией через 1
Бревна для опор мостов (по ГОСТ 4372-48)	От 12 до 30 с градацией через 2	От 4,0 до 16,0 с градацией через 0,25
Бревна для свай (по ГОСТ 468-49 и 4372-48)	От 18 до 34 с градацией через 2	От 6,5 до 8,5 с градацией через 0,25 и от 10,0 до 16,0 с градацией через 1
Подтоварник (по ГОСТ 468-49)	8, 9, 10 и 11	От 3,0 до 9,0 с градацией через 0,25

Таблица 6—24

Ориентировочный объем бревен (по ГОСТ 2708-44)

Длина бревна в *м*	Толщина бревна в верхнем отрубе (без коры) в *см*						
	14	16	18	20	22	24	26
	Объем в $м^3$						
4,5	0,084	0,110	0,134	0,170	0,203	0,242	0,284
6,0	0,123	0,156	0,194	0,237	0,281	0,332	0,392
6,5	0,135	0,172	0,212	0,260	0,308	0,364	0,429
7,0	0,148	0,189	0,233	0,284	0,337	0,398	0,466
9,0	0,212	0,267	0,326	0,393	0,465	0,545	0,631

Таблица 6—25

Ориентировочный объем кругляка тонкого

Длина тонкого кругляка в *м*	Толщина в тонком конце (без коры) в *см*			
	6	9	10	12
	Объем в $м^3$			
2	0,005	0,010	0,020	0,030
3	0,009	0,020	0,030	0,040
4	0,013	0,030	0,040	0,050
5	0,017	0,040	—	—
7	0,029	0,060	0,080	0,110
8	0,036	0,070	0,100	0,140
9	0,043	0,080	0,120	0,170

6—9. ПИЛОМАТЕРИАЛЫ

Пиломатериалы должны изготовляться из сосны, ели, лиственницы, кедра и пихты [по качеству они делятся на четыре сорта (марки) по ГОСТ 3008-45, ГОСТ 3490-46 и ГОСТ 3021-45], а также из лиственных пород (по ГОСТ 5444-50).

Пиломатериалы в зависимости от толщины и отношения между шириной и толщиной делятся на: доски толщиной 100 *мм* и менее при отношении ширины к толщине более 2; бруски толщиной 100 *мм* и менее при отношении ширины к толщине 2 и менее и брусья (четырехкантные и двухкантные) толщиной более 100 *мм*.

Основной сортамент поперечных сечений пиломатериалов приведен в табл. 6—26.

Длина пиломатериалов устанавливается не более 6,5 *м* для несущих конструкций и 9,5 *м* для пролетных строений мостов.

Таблица 6—26

Основной сортамент поперечных сечений пиломатериалов (по ГОСТ 3008-45, ГОСТ 3490-46, ГОСТ 3021-45, ГОСТ 5444-50)

Толщина в *мм*	Ширина в *мм*											
16	—	—	80	100	120	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	100	120	150	180	—	—	—	—	—
25	—	—	—	100	120	150	180	—	—	—	—	—
30	—	—	—	100	120	150	180	—	—	—	—	—
40	50	—	—	100	120	150	180	—	—	—	—	—
50	50	60	80	100	120	150	180	200	220	—	—	—
60	—	60	80		120	150	180	200	220	—	—	—
70	—	—	—	—	120	150	180	200	220	—	—	—
80	—	—	—	—	—	150	180	200	220	(240)	—	—
100	—	—	—	—	—	150	180	—	220	(240)	—	—
120	—	—	—	—	120	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	150	180	(200)	—	—	—	—
180	—	—	—	—	—	—	180	200	220	—	—	—
200	—	—		—				200	—	(240)	(260)	—
220	—	—	—	—	—	—	—	—	220	(240)	(260)	(280)

Примечание. Размеры в скобках относятся к пиломатериалам, изготовленным по заказу.

Таблица 6—27

Объем 100 *пог. м* пиломатериалов в $м^3$

Толщина в *мм*	Ширина в *см*							
	12	14	16	18	20	22	24	26
10	0,120	0,140	0,160	0,180	—	—	—	—
13	0,156	0,182	0,208	0,234	0,260	—	—	—
16	0,192	0,224	0,256	0,288	0,320	0,352	—	—
19	0,228	0,266	0,304	0,342	0,380	0,418	0,456	—
22	0,264	0,308	0,352	0,396	0,440	0,484	0,528	0,572
25	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,650
30	0,360	0,420	0,480	0,540	0,600	0,660	0,720	0,780
40	0,480	0,560	0,640	0,720	0,800	0,880	0,960	1,040
50	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300
80	0,960	1,120	1,280	1,440	1,600	1,760	1,920	2,080
100	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600
150	1,800	2,100	2,400	2,700	3,000	3,300	3,600	3,900
200	2,400	2,800	3,200	3,600	4,000	4,400	4,800	5,200

Таблица 6—28

Физико-механические свойства древесины различных пород при 15% влажности (по ГОСТ 4631-49)

Порода	Объемный вес в $кг/м^3$		Предел прочности в $кг/см^2$						Модуль упругости при статическом изгибе в тыс. $кг/см^2$
			при сжатии вдоль волокон		при изгибе статическом		при скалывании в направлении		
	от—до	средний	от—до	средний	от—до	средний	радиальном	тангенциальном	
Сосна	510—540	530	384—466	420	717—877	800	75	70	126
Сосна сибирская	470—480	475	348—427	380	694—736	710	63	62	90
Ель	450—460	460	385—423	400	722—774	760	60	60	80
Ель сибирская	390—460	430	353—431	390	603—729	660	60	60	80
Пихта	350—440	400	311—391	350	570—722	650	60	63	85
Кедр сибирский	430—460	440	347—378	360	603—715	650	60	65	82
Лиственница	640—730	680	511—615	550	964—1 062	1 010	100	90	120
Дуб	720	720	—	520	—	935	85	104	73
Береза	640—730	690	437—533	490	917—1 084	1 000	120	120	130

Примечания. 1. Испытание древесины производится по ОСТ НКЛ-250

2. Показатели объемного веса древесины при различной влажности переводят на нормальную влажность 15% от сухой древесины — по формуле:

$$\gamma_{15} = \frac{G_W}{V_W}\,[1+0{,}01\ (1-K_0)\,(15-W)], \qquad (6-16)$$

где γ_{15} — объемный вес древесины при 15%-ной влажности;

W — влажность древесины в процентах (в пределах 8—23%);

G_W — вес образца при данной влажности;

V_W — объем образца при данной влажности;

K_0 — коэффициент объемной усушки в процентах, равный

$$\frac{V_W - V_0}{V_0\,W},$$

где V_0 — объем древесины при влажности 0%.

6—Г. КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6—10. ЕСТЕСТВЕННЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 6—29

Основные ориентировочные характеристики каменных материалов

Группа и ее наименование	Расчетный объемный вес в *кг/м³*	Расчетная марка в кладке	Ориентировочная полевая проба ударом кувалдой по куску объемом 100—200 *см³*
Не затронутые выветриванием мелкозернистые кристаллические изверженные породы (граниты, сиениты, порфириты, диабазы и т. п.)	От 2 70 (граниты) до 3 000 (диабазы)	1 000 и более	При очень сильных ударах разбиваются с трудом большей частью на 2—3 куска
Не затронутые выветриванием кристаллические, изверженные породы (базальты и т. п.), а также крупнозернистые граниты, порфириты, андезиты и т. п.	От 2 700 (гранит) до 3 200 (базальт)	800 1 000	При очень сильном ударе разбиваются на 2—3 куска
Затронутые выветриванием плотные изверженные породы с водопоглощением более 1,5%	От 2 500 до 3 100	600	При ударе разбиваются на несколько крупных и мелких кусков; звук при ударе приглушенный
Выветрившиеся плотные изверженные породы с водопоглощением более 4%	Применение нежелательно		При ударе дают глухой звук и разбиваются на мелочь
Окварцованные песчаники и плотные известняковые песчаники с водопоглощением до 1%	2 600	1 000	При ударе раскалываются на остроугольные куски твердые и хрупкие
Окремненные или мраморовидные мелкокристаллические известняки с водопоглощением до 2%	2 600	800	При ударе раскалываются на 2—4 крупных куска
Плотные известняки с водопоглощением 2—5%	2 500	600	При ударе распадаются на несколько кусков
Плотные известняки с водопоглощением до 10%	2 200	300	При ударе дают мелочь

Примечание. Величина модуля упругости:
а) гранитов и других плотных изверженных пород—от 500 тыс. *кг/см²* (при пределе прочности около 1 500 *кг/см²*) до 880 тыс. *кг/см²* (при пределе прочности около 2 500 *кг/см²*);
б) мраморов— 600 тыс. *кг/см²*; известняков от 180 тыс. *кг/см²* (при пределе прочности около 200 *кг/см²*) до 540 тыс. *кг/см²* (при пределе прочности около 1 200 *кг/см²*).

Таблица 6—30

Определение ориентировочной марки камня по показателям водопоглощения и объемного веса

Водопоглощение в %		Объемный вес в *кг/м³*		Ориентировочная марка камня
среднее для 6 образцов	максимальное для 1 образца	средний для 6 образцов	минимальный для 1 образца	
До 2	До 3,5	Более 2500	2 350	800
3,5	„ 6,0	2 400	2 250	600
5	„ 10	2 350	2 200	400
До 10	„ 20	2 150	2 000	200
Более 10	Более 20	1 900	1 800	100

Таблица 6—31

Зависимость между объемным весом и прочностью известняков

Объемный вес в *кг/м³* около	1 800	2 000	2 400	2 700
Предел прочности при сжатии в *кг/см²*	Около 100	150 250	400 1 000	1 000 1 500

Марки камней указывают предел прочности при сжатии образцов в виде кубов размерами 20×20×20 *см*. Практически марки камней определяют на

сухих образцах, выпиленных из породы в виде кубов указанных выше (нормативных) размеров или меньших, а также высверленных цилиндрических кернов ($d=h=5$ *см* при мелкозернистых строениях породы, при прочих 10 *см*). Ориентировочные соотношения прочности образцов, получаемые при испытаниях кубов разных размеров, приведены в табл. 6—32.

Легкие камни с объемным весом до 1 800 *кг/м*³ делятся по прочности на марки: 5, 10, 15, 50, 75, 100 и 150 *кг/см*². Тяжелые камни с объемным весом более 1 800 *кг/м*³ имеют расчетные марки: 100, 150, 200, 400, 600, 800 и 1 000 *кг/см*².

Степень морозостойкости камней, требуемая в различных условиях их применения: 5, 10, 15, 25, 50, 100 и 200 циклов замораживания и оттаивания.

Степень водостойкости камней, определяемая величиной коэффициента размягчения, принимается:

а) менее 0,60; б) от 0,60 до 0,75; в) от 0,75 до 0,90; г) более 0,90.

Таблица 6—32

Ориентировочные соотношения показателей прочности образцов

При размере куба в *см*	Переходный коэффициент	При размере куба в *см*	Переходный коэффициент
4×4×4	0,55	10×10×10	0,75
5×5×5	0,6	15×15×15	0,9
7×7×7	0,7	20×20×20	1

Примечание. При образцах-цилиндрах переходной коэффициент принимается для диаметра, равного стороне куба.

Подробные характеристики горных пород (классификация, категория, коэффициент крепости и др.) приведены в гл. 7 настоящего справочника.

Контрольные определения сопротивляемости сжатию и морозостойкости камня для набросных плотин производятся в процессе укладки при обнаружении признаков изменения качества камня, но не реже 3 раз при кубатуре наброски до 100 000 *м*³, и при укладке каждых 20 000—30 000 *м*³ камня при кубатуре наброски более 100 000 *м*³.

Специальные требования к камням для набросных плотин приведены в гл. 23.

6—11. КИРПИЧ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Для гидротехнического строительства применяется глиняный гидротехнический кирпич, изготовленный методом пластического формования в соответствии с ТУ МЭС 1947 г. (ВНИИГ, Кирпичные гидротехнические сооружения).

В зависимости от предела прочности при сжатии гидротехнический кирпич подразделяют на шесть марок, указанных в табл. 6—33. Марку кирпича устанавливают по результатам испытания образцов на сжатие и изгиб в насыщенном водой состоянии в соответствии с ГОСТ 530-41.

Таблица 6—33

Марки кирпича гидротехнического и пределы прочности при сжатии и изгибе (по ТУ МЭС 1947 г.)

Марка	Предел прочности в *кг/см*²			
	при сжатии		при изгибе	
	средний	минимальный	средний	минимальный
100	100	85	22	18
150	150	125	28	22
200	200	150	34	25
300	300	225	45	35
500	500	375	70	50
700	700	550	95	90

Кирпич марок 500 и 700 применяется только для облицовок гидротехнических сооружений.

Гидротехнический кирпич должен выдерживать следующее число циклов замораживания при температуре —15° без снижения прочности более 25% и потери веса более 1%:

1) 30 замораживаний — для районов с тяжелыми климатическими условиями (при среднемесячной температуре наиболее холодного месяца — 15°);

2) 20 замораживаний — для районов со средними климатическими условиями (соответственно от —5 до —10°);

3) 15 замораживаний — для районов с легкими климатическими условиями (соответственно менее —5°).

Испытание гидротехнического кирпича производится в соответствии с требованиями ТУ—МЭС 1947 г. (ВНИИГ, Кирпичные гидротехнические сооружения).

Объемный вес кирпичной кладки:

а) сухой кирпичной кладки — 1 800 *кг/м*³;

б) насыщенной водой кирпичной кладки—2 000 *кг/м*³.

6—Д. ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ И БЕТОНОВ

6—12. ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ

а) Цементы подразделяются на следующие основные виды:

1) портландцемент (ГОСТ 970-41);

2) цементы специальные: сульфатостойкие (ГОСТ 2543-51), тампонажные (ГОСТ 1581-42), гидрофобные, пластифицированные, белые и цветные;

3) шлако-портландцемент (ГОСТ 970-41);

4) цементы с активными (гидравлическими) добавками (ГОСТ 970-41);

5) цементы с активными добавками сульфатостойкие;

6) цементы с наполнителями (карбонатный цемент и т. п.);

7) цементы с активными добавками и наполнителями (гидротехнические).

Примечание. В зависимости от вида применяемых добавок цементы именуются: трепельный, пемзовый, туфовый и т. п.

б) Цементы по показателям предела прочности при сжатии образцов из раствора состава 1 : 3 делятся на марки в результате испытаний образцов из жестких грамбованных и пластичных растворов.

Марки цементов отдельных видов устанавливаются по указаниям табл. 6—34.

Таблица 6—34

Основное деление цементов на марки

Вид цемента	Деление на марки по результатам испытаний растворов 1:3	
	жестких трамбованных	пластичных
Портландцемент	250, 300, 400, 500 и 600	100, 150, 200, 300 и 400
Цементы: сульфатостойкие, гидрофобные, пластифицированные белые	250, 300, 400, 500 и 600	100, 150, 200, 300 и 400
Шлако-портландцемент (с добавками молотого гранулированного шлака)	150, 200, 250, 300, 400 и 500	50, 100, 150, 200, 300
Цементы с активными добавками (гидравлическими)	150, 200, 250, 300, 400 и 500	50, 100 150, 200, 300
Цементы с активными добавками сульфатостойкие	250, 300 и 400	100, 150, 200 и 300
Цементы с наполнителями	150, 200, 250, 300, 400 и 500	50, 100, 150, 200, 300
Цементы с активными добавками и наполнителями	150, 200, 250, 300, 400 и 500	50, 100, 150, 200, 300

Примечания. 1. Сульфатостойкий цемент должен содержать активных кремнеземистых добавок от 5 до 15% по весу.
2. Клинкер, применяемый для изготовления сульфатостойкого цемента с активными кремнеземистыми добавками, должен удовлетворять следующим требованиям:

а) иметь глиноземистый модуль (отношение $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$) не менее 0,7;

б) иметь расчетное содержание трехкальциевого алюмината ($3\,C_2OAl_2O_3$) не более 8%.

3. Испытание цементов производится по указаниям ГОСТ 310-51.

Таблица 6—35

Основные показатели портландцементов

Наименование цемента	Марка	Пределы прочности раствора 1:3 в *кг/см²* при сжатии через 3 суток	при сжатии через 7 суток	при разрыве через 3 суток	при разрыве через 7 суток	при разрыве через 28 суток	Объемный вес (рыхло насыпанного) в *кг/м³*
Портландцемент (по ГОСТ 970-41)	250	—	160	—	12	16	1 100—1 300
	300	—	200	—	15	20	
	400	190	280	16	19	23	
	500	260	380	20	23	27	
	600	300	450	22	27	32	
Цемент сульфатостойкий (по ГОСТ 2543-51)	250	—	130	—	—	—	1 100—1 300
	300	—	160	—	—	—	
	400	—	220	—	—	—	
	500	—	—	—	—	—	
	600	—	—	—	—	—	

Продолжение табл. 6—35

Наименование цемента	Марка	Пределы прочности раствора 1:3 в *кг/см²* при сжатии через 3 суток	при сжатии через 7 суток	при разрыве через 3 суток	при разрыве через 7 суток	при разрыве через 28 суток	Объемный вес (рыхло насыпанного) в *кг/м³*
Шлако-портландцемент (по ГОСТ 970-41)	150	—	80	—	—	—	1 100—1 250
	200	—	100	—	11	16	
	250	—	130	—	11	16	
	300	—	160	—	14	20	
	400	—	220	—	18	23	
	500	—	300	—	22	27	
Цемент с активными гидравлическими добавками (пуццолановый портландцемент) (по ГОСТ 970-41)	200	—	100	—	11	16	850—1 150
	250	—	130	—	11	16	
	300	—	160	—	14	20	
	400	—	220	—	18	23	
	500	—	300	—	22	27	

Таблица 6—36

Показатели прочности и марки гидротехнического цемента с активными добавками и наполнителями по ТУ МВД 1939 г.

Марка цемента	Предел прочности раствора 1:3 при сжатии в *кг/см²* через 7 суток	через 28 суток	через 90 суток	Предел прочности раствора 1:3 при растяжении в *кг/см²* через 7 суток	через 28 суток	через 90 суток
200	110	200	230	10	16	18
250	140	250	300	12	18	21
300	170	300	350	14	21	24

Таблица 6—37

Показатели прочности и марки сульфатированных и шлако-портландцементов (по ГОСТ 2543-51)

Марка цемента	Предел прочности раствора 1:3 в *кг/см²* через 7 суток не менее при сжатии	при растяжении	Объемный вес в рыхло насыпаньом состоянии в *кг/м³*
150	90	10	Гипсошлаковый 1 000—1 200 Бесклинкерный 1 000—1 250 Шлаковый 800—900
200	110	11	
250	140	13	
300	170	15	

Таблица 6—38

Указания по применению цементов

Вид цемента	Основное назначение	Допускается применять	Не допускается применять
Портландцемент	Для бетонных и железобетонных надземных, подземных и подводных конструкций, в том числе подвергающихся попеременному воздействию воды и мороза	Для строительных растворов с введением (для экономии) извести, глины, других молотых наполнителей, а также поверхностно активных добавок	Для конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных вод без специальных мер защиты
Цемент сульфатостойкий	Для бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию сульфатных вод при систематическом многократном увлажнении и высыхании или замораживании и оттаивании	Для бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию сульфатных вод	Для конструкций, не подвергающихся воздействию агрессивных вод (по экономическим соображениям)
Цементы с активными (гидравлическими) добавками	Для бетонных и железобетонных подземных и подводных конструкций, подвергающихся воздействию пресных вод	1. Для бетонных и железобетонных надземных конструкций, находящихся в условиях повышенной влажности 2. Для строительных растворов	Для конструкций: 1. подвергающихся быстрому высыханию 2. подвергающихся систематическому многократному замораживанию и оттаиванию или увлажнению и высыханию
Цементы с активными добавками сульфатостойкие	Для бетонных и железобетонных подземных и подводных конструкций, подвергающихся воздействию сульфатных вод	Для конструкций, подвергающихся воздействию пресных вод	В тех же случаях, что и сульфатостойкий цемент
Шлако-портландцемент	1. Для бетонных и железобетонных надземных, подземных и подводных конструкций, подвергающихся воздействию пресных вод 2. Для бетонных и железобетонных изделий, изготовляемых с пропариванием	Для строительных растворов	—
Шлако-портландцемент сульфатостойкий	Для бетонных и железобетонных подземных и подводных конструкций, подвергающихся воздействию сульфатных и пресных вод	1. Для бетонных и железобетонных надземных конструкций 2. Для строительных растворов	В тех же случаях, что и сульфатостойкий цемент

6—13. ЦЕМЕНТЫ ГЛИНОЗЕМИСТЫЕ (АЛЮМИНАТНЫЕ)

Цементы глиноземистые по показателям предела прочности при сжатии образцов из раствора 1 : 3 подразделяются на марки:

глиноземистый цемент (ГОСТ 969-41) — 300, 400, 500 и 600 для жестких трамбованных растворов и 200, 300, 400 и 500 — для пластичных растворов;

глиноземистый ангидритовый цемент — 300, 400, 500 и 600 для жестких трамбованных растворов и 150, 200 300 и 400 для пластичных растворов;

глиноземистый с наполнителями цемент — 300 и 400 для жестких трамбованных растворов, 150, 200 и 300 для пластичных растворов.

Начало схватывания глиноземистых цементов должно наступать не ранее 30 мин., а конец схватывания не позднее 12 час. от начала затворения.

Цементы глиноземистые следует применять для бетонных и железобетонных конструкций, требующих быстрого ввода в эксплуатацию, особенно в зимних условиях, для аварийных работ и в других случаях в соответствии с указаниями табл. 6—39.

Таблица 6—39

Указания по применению глиноземистых цементов

Вид цемента	Основное назначение	Допускается применять	Не допускается применять
Цемент глиноземистый	Для бетонных и железобетонных конструкций с высокой маркой бетона, подвергающихся воздействию сульфатных и углекислых вод, а также попеременному воздействию воды и мороза	Для бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию сернистых газов	Для конструкций, в которых температура бетона в результате внешнего температурного воздействия и тепловыделения может в процессе затвердения подняться выше 25° (в частности, в конструкциях большой толщины или большого объема)
Цемент глиноземистый ангидритовый	Для бетонных и железобетонных конструкций с высокой маркой бетона при температуре бетона в процессе твердения более 25°	В тех же случаях, что и глиноземистый цемент	—
Цементы глиноземистые с наполнителями	Для бетонных и железобетонных конструкций со средней и низкой марками бетона, в том числе подвергающихся воздействию сульфатных вод	То же	В тех же случаях, что и глиноземистый цемент

Таблица 6—40

Показатели прочности и марки глиноземистого цемента (по ГОСТ 969-41)

Марка цемента	Предел прочности раствора 1:3 в $кг/см^2$			
	при сжатии через		при растяжении через	
	24 часа	3 суток	24 часа	3 суток
300	250	300	16	18
400	350	400	20	22
500	450	500	24	26

6—14. ЦЕМЕНТЫ РАСШИРЯЮЩИЕСЯ (по ТУ 66-50 и ТУ 69-50)

Группа расширяющихся цементов включает в себя цементы специального состава, дающие увеличение объема при затвердении в воде, а на воздухе остающиеся безусадочными или также дающими расширение, но меньшей величины. Расширяющиеся цементы в зависимости от сроков схватывания делятся на: быстросхватывающиеся — с началом схватывания не ранее 5 мин. и концом схватывания не позднее 30 мин.; с замедленным сроком схватывания — началом схватывания не ранее 20 мин. и концом — не позднее 3 час.

Марка расширяющихся цементов определяется по величине предела прочности при сжатии образцов размерами 20×20×20 *мм* из теста нормальной густоты, испытанных через 3 суток после изготовления.

Таблица 6—41

Показатели прочности и марки расширяющихся цементов (по ТУ 66-50 и ТУ 69-50)

Марка цемента	Предел прочности при сжатии в *кг/см²* через			Предел прочности при растяжении в *кг/см²* через		
	6 час.	3 суток	28 суток	6 час.	3 суток	28 суток
300 (0,5) и (1,0)	60	200	300	6	20	25
400 (0,5) и (1,0)	80	260	400	8	25	30
500 (0,5) и (1,0)	100	350	500	10	30	35

Примечание. Цифры в скобках (0,5) и (1,0) указывают на процент расширения.

Дополнительные требования, предъявляемые к расширяющимся цементам, методы испытаний и особые условия их применения — см. ТУ 66-50 и ТУ 69-50 МС (см. табл. 6—42).

Таблица 6—42

Указания по применению расширяющихся цементов (по ТУ 66-50, ТУ 69-50)

Вид цементов	Основное назначение	Допускается применять	Не допускается применять
1 Быстросхватывающийся расширяющийся цемент	1. Для зачеканки и гидроизоляции швов тюбингов, раструбных труб и тому подобных элементов	1. Для получения плотных стыков в сборных бетонных и железобетонных конструкциях	1. При производстве работ при температуре ниже 0° без обогрева
	2. Для заделки фундаментных болтов в бетонных и железобетонных конструкциях, подливки под машины и т. п.	2. Для заделок трещин в бетонных и железобетонных конструкциях, для усиления конструкций и т. д.	2. При работе конструкции в эксплуатационных условиях при температуре выше 80°
2. Расширяющийся цемент с замедленным схватыванием	1. Для получения безусадочных и расширяющихся водонепроницаемых бетонов, гидроизоляционных штукатурок и заделки стыков сборных бетонных и железобетонных конструкций	Для зачеканки швов и раструбов при рабочем давлении до 10 *ат*, создаваемом не ранее 24 часов с момента окончания зачеканки	—
	2. Для омоноличивания и усиления конструкций, подливки фундаментов и заделки фундаментных болтов		

6—15. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАЖНЕЙШИХ ЦЕМЕНТОВ

Таблица 6—43

(по техническим правилам МВД 1948 г.)

Вид цемента	Нормальная густота в %	Удельный вес в $т/м^3$	Объемный вес в неуплотненном состоянии в $кг/л$	Цвет и запах пропаренных образцов	Проба магнитом	Проба в бомоформе	Примерный химический состав в %
Портландцемент	23—30	3,0—3,2	1,2—1,4	От светло-серого до светлозеленого, без запаха	Незначительное количество железных частиц	Незначительное разделение	CaO—61—68 SiO_2—20—29 Al_2O_3—4—8,5 Fe_2O_3—2—4
Пуццолановый портландцемент	30—40	2,8—2,95	0,9—1,1	Светлосерый без запаха	То же	Значительное разделение	CaO—42—62 SiO_2—24—32 Al_2O_3— 5—9 Fe_2O_3 —3—4
Шлако-портландцемент	23—32	2,9—3,0	1,1—1,3	Темносерый с синими полосами и пятнами, запах сероводорода	—	Незначительное разделение	CaO—51—60 SiO_2—24—32 Al_2O_3— 6—12 Fe_2O_3—1—3,5
Глиноземистый цемент	25—28	2,8—3,1	1,0—1,2	Серый, или коричневый, без запаха	Незначительное количество железных частиц	То же	CaO—35—45 SiO_2— 5—10 Al_2O_3—35—50 Fe_2O_3— 5—15

Примечания. 1. Определение цвета и запаха пропаренных образцов производится на образцах, изготовленных по ГОСТ 310-51, для определения равномерности изменения объема.

2. Проба в бомоформе (жидкость с удельным весом 2,9) производится путем всыпания в бомоформ сухого цементного порошка, который будет падать вниз, а частицы гидравлических добавок, имеющие меньший удельный вес, будут находиться во взвешенном состоянии.

6—16. ТОНКОМОЛОТЫЕ ДОБАВКИ

Гидравлические добавки к портландцементу для гидротехнического бетона и их активность характеризуются табл. 6—44.

Предварительный расчет тонкомолотых гидравлических и наполняющих добавок к цементу производится по формулам:

количество цемента в процентах

$$Ц = \frac{K \cdot 100\, R_б}{R_ц}; \qquad (6—17)$$

количество добавок в процентах

$$Д = 100 - Ц, \qquad (6—18)$$

K — соотношение $R_ц : R_б$ — не более 3,0;
$R_ц$ и $R_б$ — пределы прочности (марки) цемента и бетона.

При замене в бетонной смеси 50% (по весу) цемента наполняющей добавкой подвижность бетонной смеси, измеренная осадкой конуса, не должна снизиться более чем на 20%.

Снижение предела прочности при сжатии для бетона 28-дневного возраста от замены в нем 20% (по весу) цемента добавкой не должна превосходить 30%.

Выбор добавок к цементу. Для бетонов и растворов, твердеющих в нормальных условиях, применяют добавки, указанные в табл. 6—44, а также молотые известняки, песчаники, кварцевые пески и др.; для пропариваемых бетонов рекомендуются добавки, обладающие гидравлическими и вяжущими свойствами.

Для добавок, имеющих объемный вес, близкий к объемному весу цемента (1 200—1 300 $кг/м^3$), и водопотребность для образования теста нормальной густоты, близкую к водопотребности цементов (22—30%), количество вводимых добавок, необходимых для экономии цемента, должно быть примерно пропорциональным требуемому снижению активности цемента.

При водопотребности добавки более 30% и при различных объемных весах цемента и добавки количество последней, полученное на основе прямой пропорциональности, изменяют путем умножения на коэффициент:

$$K = \varphi_ц : \varphi_{доб}, \qquad (6—19)$$

где $\varphi_ц$ — выход теста нормальной густоты в $см^3$ из 1 $г$ цемента;
$\varphi_{доб}$ — то же, для добавки.

Выход теста (φ) с определенным опытным путем водовяжущим отношением ($В/Ц$) для теста нормальной

Таблица 6—44

Характеристика гидравлических добавок (по ГОСТ 4797-49)

Добавки	Высокоактивные добавки		Среднеактивные добавки		Низкоактивные добавки	
	активность по поглощению извести (*мг* CaO на 1 *г* добавки) должна быть не менее за					
	30 суток	4 суток	30 суток	4 суток	30 суток	4 суток
Диатомиты и трепелы	200	40	100	20	50	—
Глиежи и горелые породы	—	—	100	—	50	—
Пеплы вулканические (пуццолана)	—	—	100	20	50	8
Пемзы	—	—	100	20	50	8
Туфы вулканические	200	60	100	30	50	10
Трасы	—	—	100	20	50	11
Сиштоф	200	50	—	—	—	—
Глиниты и цемянки	200	—	100	—	50	—
Золы кислые	—	—	—	—	60	—

густоты как из цемента, так и из добавки, устанавливается приближенно из выражения:

$$\varphi = \frac{1}{\gamma_ц} + \frac{B}{Ц}, \qquad (6—20)$$

где $\gamma_ц$ — удельный вес цемента или добавки;

$\frac{B}{Ц}$ — водовяжущее отношение для теста нормальной густоты.

6—17. ИЗВЕСТИ

1. Воздушная известь

В зависимости от скорости гашения известь разделяется на быстро гасящуюся со скоростью гашения до 10 мин., среднегасящуюся со скоростью гашения 10—30 мин. и медленно гасящуюся со скоростью гашения более 30 мин. Воздушная известь подразделяется на три сорта в зависимости от показателей, приведенных в табл. 6—45.

Таблица 6—45

Важнейшие показатели воздушной извести (по ГОСТ 1174-51)

Показатели качества извести	Известь негашеная (кипелка)						Известь гидратная (пушонка)		Известковое тесто		
	комковая			молотая							
	Сорта										
	I	II	III	I	II	III	I	II	I	II	III
Содержание активных CaO+MgO (считая на высушенное вещество) в % не менее	85	70	60	85	70	60	67	60	67	60	50
Выход известкового теста в *л* из 1 *кг* извести не менее	2,4	2	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—
Крупность частиц (остатки в % на ситах № 200 900 *отв/см²*) не более	—	—	—	2	3	5	2	3	—	—	—
То же, № 90 (4 900 *отв/см²*) не более	—	—	—	20	25	25	10	15	—	—	—
Содержание непогасившихся зерен (крупнее 0,6 *мм*) в % не более	7	10	12	—	—	—	—	—	7	10	12

2. Гидравлическая известь

В зависимости от скорости твердения и прочности гидравлическую известь подразделяют на два вида: слабо гидравлическую и сильно гидравлическую.

Таблица 6—45а

Предел прочности гидравлической извести в *кг/см²* (по ОСТ 2644)

Род извести	При растяжении через		При сжатии через	
	28 суток	56 суток	28 суток	56 суток
Слабо гидравлическая	2	3	6	8
Сильно гидравлическая	4	6	15	25

Предел прочности лучшей гидравлической извести достигает: при сжатии 40—70 *кг/см²*, при растяжении— 10—15 *кг/см²*.

При кладке фундаментов в сырых местах необходимо предохранять гидравлическую известь от непосредственного воздействия воды в течение 7—14 дней.

6—Е. ЗАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА И РАСТВОРОВ

6—18. ПЕСОК И МЕЛКИЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ (по ГОСТ 4797-49)

1. Основные требования к песку для гидротехнических бетонов и растворов

Для гидротехнических бетонов и растворов применяются природные кварцевые и полевошпатовые пески или искусственно получаемые пески из твердых и плотных каменных пород с крупностью зерен до 5 *мм*.

Таблица 6—46

Гранулометрический состав песка для гидротехнических бетонов и растворов

Размеры отверстий сит в *мм*	5	2,5	1,2	0,3	0,15
Должно проходить через сито в % (по весу)	85—100	60—90	30—70	5—30	0—10

Таблица 6—47

Предельное допустимое содержание примесей в песке

Примеси	Для морозостойких гидротехнических бетонов	Для прочих гидротехнических бетонов
	в %	
Глины, ил и мелкие пылевидные фракции, определяемые отмучиванием	3	5
В том числе глина	1	2
Органические примеси	По ГОСТ 2781 - 50	
Сернокислые и сернистые соединения в пересчете на SO_3	1	1
Слюда по весу	0,5	0,5

Примечание. Наличие глины в виде отдельных комьев не допускается.

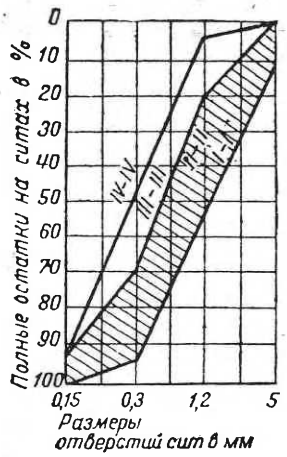
Степень крупности песков определяется расположением их кривых просеивания относительно пределов, указанных на фиг. 6—8.

Крупный песок — кривая просеивания находится в пределах заштрихованной площадки, ближе к ее нижней границе; средний песок — то же, но ближе к верхней границе; мелкий песок — кривая просеивания находится в пределах между заштрихованной площадью и верхней ломаной линией.

Таблица 6—48

Основные требования к песку природному для бетона и растворов в зависимости от назначения сооружения

Показатели	Основное назначение песка			
	для конструкций		для растворов	
	подвергающихся замерзанию в насыщенном водой состоянии или выполняемых из бетона марок 150 и выше	защищенных от насыщения водой при марке бетона ниже 150	кладочных марок 50 и выше	обычных штукатурных
Пустотность в % не более	37	40	Не нормируется	
Зерновой состав	Кривая просеивания должна находиться в пределах заштрихованной площади по фиг. 6—8 (песок крупный и средний)	Кривая просеивания должна находиться между верхней и нижней ломаными линиями (песок крупный, средний и мелкий)	Предельная крупность зерен: 1) для бутовой кладки — 5 *мм* 2) для кладки из камней правильной формы — 2,5 *мм*	1) для подготовительных слоев — 2,5 *мм* 2) для обычных отделочных слоев — 1,2 *мм*
Приращение объема при испытании на набухание в % от первоначального не более	5	5	Не нормируется	



Фиг. 6—8. График зернового состава для природного песка

I—I — крупный; *II—II* — средний; *III — III* — мелкий; *IV—IV* — очень мелкий

2. Требования к песку для подводного бетонирования методом восходящего раствора (по работам НИИ оснований и фундаментов Министерства строительства)

При приготовлении раствора для подводного бетонирования методом восходящего раствора применяются:

1) наполняющие добавки, получаемые тонким помолом до размеров частиц, близких к цементным: кварцевых и полевошпатовых песков и песчаников, изверженных пород (гранитов, гнейсов, сиенитов, диоритов и др.) и известковых пород;

2) заполнители из природных песков, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 4797-49, с кривой просеивания, находящейся в зоне мелких и очень мелких песков (выше верхней ломаной линии на фиг. 6—8).

6—19. КРУПНЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ БЕТОНА (ПО ГОСТ 4797-49)

1. Гравий природный и щебень

В качестве крупного заполнителя для бетона применяется гравий или щебень, получаемый дроблением горных пород, или их смесь. Крупность зерен крупного наполнителя — от 5 до 150 *мм* (фиг. 6—9).

Гравий и щебень, пригодные для бетона, подразделяются:

на рядовой	средний	от	5 до	40 *мм*
„ „	крупный	„	5 „	150 „
„ сортовой	мелкий	„	5 „	20 „
„ „	средний	„	20 „	40 „
„ „	крупный	„	40 „	150 „

Гравий по форме кусков подразделяется:

на щебневидный малоокатанный;
» яйцевидный окатанный;
» игловатый (с длиной в 3 раза и более превышающей ширину или толщину);
» пластинчатый или лещадный (с шириной в 3 раза и более превышающей толщину).

Наибольшая крупность кусков гравия и щебня должна составлять:

не более $^1/_5$ от наименьшего размера конструкции;
не более $^3/_4$ расстояния между стержнями арматуры.

Характеристика крупного заполнителя указана в табл. 6—49 и 6—50.

Таблица 6—49

Предельно допустимое содержание примесей в крупном заполнителе

Примеси	Для морозостойких гидротехнических бетонов	Для прочих гидротехнических бетонов
	в %	
Глина, ил и мелкие пылевидные фракции, определяемые отмучиванием	1	2
Органические примеси	По ГОСТ 2779-50	
Сернокислые и сернистые соединения в пересчете на SO_3	0,5	0,5
Опал и другие аморфные видоизменения кремнезема, кремнистые сланцы	2	2

Примечание. Наличие глины в виде отдельных комьев и обволакивающей зерна пленки не допускается.

Для обеспечения постоянства гранулометрического состава в процессе работ крупный заполнитель рекомендуется делить на следующие фракции (с последующим раздельным дозированием).

При $D_{наиб}$= 40 *мм*	на	2	фракции 5—20 и 20— 40 *мм*
„ $D_{наиб}$= 60 „	„	2	„ 5—20 и 20— 60 „
„ $D_{наиб}$= 80 „	„	2	„ 5—40 и 40— 80 „
	„	3	„ 5—20, 20— 40 и 40— 80 „
„ $D_{наиб}$=150 „	„	3	„ 5—40, 40— 80 и 80—150 „
	„	4	„ 5—20, 20—40, 40—80 и 80—150 „

Примечание. Заполнитель с крупностью зерен до 60 *мм* может применяться как рядовой, без разделения на фракции.

Таблица 6—50

Физические и механические свойства крупного заполнителя

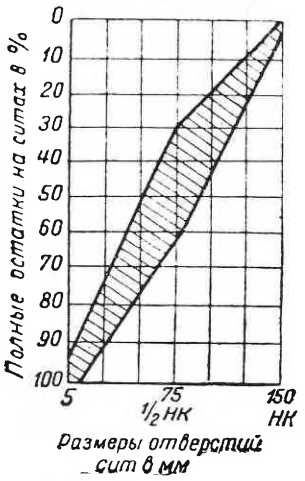
Свойства	Для морозостойких гидротехнических сооружений	Для прочих гидротехнических сооружений
Предел прочности при сжатии в насыщенном водой состоянии горной породы, подлежащей дроблению в щебень, в *кг/см²* не менее . . .	800	Двукратная проектная прочность бетона для марок 250 и ниже и полуторакратная проектная прочность бетона для марок 250 и выше
Предел прочности при сжатии бетона на испытуемом гравии при испытании по ГОСТ 9779-50 в % от требуемой марки бетона	150	120
Содержание зерен слабых пород в гравии в % не более	5	10
Содержание в гравии игловатых и лещадных зерен в % по весу не более	15	Не нормируется
Водопоглощение материала зерен в % не более	1,5	2,5
Объемный вес зерен в *г/см³* не менее . . .	2,3	2,3
Зерновой состав . . .	Не нормируется. Соглашением сторон может быть установлено, что кривая просеивания должна находиться в пределах заштрихованной площади по фиг. 6—9	
Пустотность в % не более	45	45

Гранулометрический состав рядового крупного заполнителя, а также фракций 5—40 *мм* сортового должен находиться в пределах, указанных в табл. 6—51.

Таблица 6—51

Гранулометрический состав крупного заполнителя

Размер отверстий сит в *мм*	$D_{наиб}$	$\frac{1}{2} D_{наиб}$	5 *мм*
Должно проходить в % по весу	95—100	40—65	0—10



Фиг. 6—9. График зернового состава для гравия и щебня (НК — наибольшая крупность)

Рекомендуемое соотношение фракций в смеси крупного заполнителя должно находиться в пределах, указанных в табл. 6—52.

Таблица 6—52

Соотношение фракций в смеси крупного заполнителя (ГОСТ 4801-49)

Наибольшая крупность зерен $D_{наиб}$ в *мм*	Фракции в *мм*						Сумма должна быть
	5—20	5—40	20—40	20—60	40—80	80—150	
	Рекомендуемые соотношения в %						
40	45—60	—	40—55	—	—	—	100
60	35—50	—	—	50—65	—	—	100
80	25—35	—	25—35	—	35—50	—	100
80	—	50—65	—	—	35—55	—	100
150	15—25	—	15—25	—	25—35	30—45	100
150	—	30—40	—	—	25—35	30—45	100

2. Определение морозостойкости ($M_{рз}$) крупного заполнителя

Крупный заполнитель, предназначенный для гидротехнических морозостойких бетонов, испытывается на морозостойкость по ГОСТ 4798-49. Степень морозостойкости определяется числом повторных циклов замораживания в насыщенном водой состоянии и оттаивания в воде. Требуемая степень морозостойкости заполнителей бетона устанавливается по табл. 6—53.

Таблица 6—53

Требуемая степень морозостойкости крупных заполнителей для бетона

Вид конструкций и эксплуатационные условия	Характеристика климатических условий	Количество циклов	
		замораживания и оттаивания	насыщения раствором сернокислого натрия и высушивания
		не менее	
Части гидротехнических и других сооружений в зоне переменного уровня или подсоса воды	Суровые	50	10
	Средние	35	10
	Мягкие	25	5
Открытые конструкции, подвергающиеся непосредственному увлажнению, защищенные от подсоса воды	Суровые	35	10
	Средние	25	5
	Мягкие	Не подвергаются	

Примечания. 1. При ускоренном испытании раствором сернокислого натрия крупный заполнитель не должен показать потерю в весе более 5 %.

2. При испытании в бетоне крупный заполнитель не должен показать потерю прочности против образцов, не подвергавшихся замораживанию, более 20 %.

3. Определение климатических условий по среднемесячным температурам помещено в примечаниях к табл. 6—75 настоящей главы.

6—20. ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫЕ ПРИРОДНЫЕ СМЕСИ ДЛЯ БЕТОНА

Природные гравийно-песчаные смеси, состоящие из гравия и песка, делятся:

на смеси с наибольшей крупностью до 20 *мм*
» » » » » » 40 »
» » » » » » 80 »
» » » » » » 150 »

Допускаются смеси с наибольшей крупностью, промежуточной между указанными выше.

Смесь, разделенная в средней пробе на песок и гравий, должна содержать песок в количествах, указанных в табл. 6—54. Песок и гравий, содержащиеся в смеси, по качеству должны удовлетворять требованиям, приведенным в табл. 6—48 и 6—50.

Таблица 6—54

Содержание песка в гравийно-песчаных смесях

Наибольшая крупность гравия в *мм*	Содержание песка в % от веса смеси
20	От 40 до 45
40	» 35 » 40
80	» 30 » 35
150	» 25 » 30

6—21. ВОДА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПОЛИВКИ БЕТОНА И УСТАНОВЛЕНИЕ АГРЕССИВНОСТИ ВОДЫ-СРЕДЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМУ БЕТОНУ

1. Вода, применяемая для приготовления и поливки бетона (по ГОСТ 4797-49)

Для приготовления и поливки гидротехнического бетона можно применять (без предварительного опробования) любую воду, пригодную для питья. Промышленные, сточные и болотные воды для приготовления и поливки бетона не допускаются.

Минерализованные воды могут применяться для приготовления и поливки бетона, если показатели их химического состава удовлетворяют требованиям табл. 6—55.

Таблица 6—55

Показатели химического состава воды, пригодной для приготовления и поливки бетона

Показатели химического состава воды	Единица измерения	Подводный бетон бетонных, малоармированных и железобетонных конструкций	Надводный бетон и бетон малоармированных и железобетонных конструкций, расположенных в зоне переменного горизонта воды
Общее содержание солей не более	*мг/л*	3 500	5 000
Содержание ионов SO_4'' не более	»	2 700	2 700
Водородный показатель (pH) не менее . . .	—	4	4

Примечания. 1. Указанные в табл. 6—55 показатели относятся к бетону на цементах: портландском, пуццолановом, шлакопортландцементе и гидротехническом (трехкомпонентном). При применении других цементов необходимо произвести испытание образцов, затворенных на испытуемой минерализованной воде, параллельно с образцами на питьевой воде. Прочность образцов на минерализованной воде должна составлять не менее 90% от прочности образцов, приготовленных с питьевой водой.

2. Для приготовления гидротехнического бетона на глиноземистом цементе применение воды с общим содержанием солей более 1 000 *мг/л* и водородным показателем pH менее 4 не допускается.

2. Установление агрессивности воды-среды по отношению к гидротехническому бетону (по Н 114-54)

Для выбора вида цемента, обеспечивающего водостойкость бетона в данной воде-среде, и для установления необходимости применения гидроизоляции бетона в тех случаях, когда агрессивность воды-среды превышает допустимые нормы, производится оценка агрессивности воды-среды по данным химического анализа.

Агрессивность природных вод оценивается по следующим признакам:

1) гидрокарбонатной щелочности (в *мг-экв*) — агрессивность выщелачивания;

2) содержанию водородных ионов, оцениваемой значениями pH — агрессивность общекислотная;

3) содержанию свободной углекислоты — агрессивность углекислая;

4) содержанию сульфатов (SO''_4) — агрессивность сульфатная;

5) содержанию ионов магния ($Mg^{\cdot\cdot}$) — агрессивность магнезиальная.

Наличие или отсутствие агрессивности воды-среды по отношению к гидротехническому бетону на цементах (по ГОСТ 970-41): портландцементе, шлако-портландцементе, пуццолановом портландцементе, (обычных и сульфатостойких их видов), имеющих марку по водонепроницаемости не менее В4, с активными добавками и наполнителями (песчано-пуццолановый портландцемент), устанавливается согласно указаниям табл. 6—56 ÷ 6—63.

При отсутствии фильтрации через грунт, окружающий бетон, нормы агрессивности воды-среды для грунта с коэффициентом фильтрации, большим 10 *м/сутки*, принимаются по данным табл. 6—56 ÷ 6—63 для грунта с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*, а для грунта с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки* — по данным табл. 6—56 ÷ 6—63 для грунта с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*.

Вывод о наличии агрессивности воды-среды, полученный по табл. 6—56 ÷ 6—63, является окончательным для выщелачивающей, общекислотной, углекислой и магнезиальной агрессивности. Для окончательного вывода о сульфатной агрессивности воды-среды следует дополнительно проверить бетон в данной воде-среде на водостойкость по ГОСТ 4798-49 «Бетон гидротехнический. Методы испытаний материалов для его приготовления». При этом воду-среду следует считать агрессивной в том случае, если величина коэффициента стойкости (K с. б) менее 0,80.

Для приготовления гидротехнического бетона должен быть выбран цемент, по отношению к которому данная вода-среда не является агрессивной по всем признакам агрессивности.

Если вода-среда будет признана агрессивной (по табл. 6—56 ÷ 6—63) по отношению к выбранному цементу, хотя бы по одному признаку, то водостойкость должна быть обеспечена специальными мероприятиями.

При анализе воды-среды подлежат выполнению следующие определения: сухой остаток, гидрокарбонатная щелочность (ионы HCO_3), содержание свободной углекислоты, водородных ионов (pH), ионов хлора, сульфатных ионов, ионов кальция, магния и натрия, сероводорода и окисляемость.

Таблица 6—56

Нормы выщелачивающей агрессивности воды-среды

Вода считается агрессивной, если гидрокарбонатная щелочность *мг-экв* имеет значение ниже приводимых величин.

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции в *м*	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы
1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	1,5	0,5	2,0	0,7
	От 0,5 до 2,5	0,75	Не нормируется	1,2	0,4
	Более 2,5	0,4	То же	0,7	Не нормируется
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	0,75	„	1,0	0,4
	От 0,5 до 2,5	0,4	„	0,6	Не нормируется
	Более 2,5	Не нормируется	„	Не нормируется	То же
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	То же	„	„	„
	От 0,5 до 2,5	„	„	„	„
	Более 2,5	„	„	„	„

Примечание. Гидрокарбонатная щелочность выражается числом *мг-экв* ионов HCO, содержащихся в 1 *л* воды.

Таблица 6—57

Нормы общекислотной агрессивности воды-среды

Вода считается агрессивной, если водородный показатель (pH) имеет значение, меньшее приводимых ниже величин.

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции в *м*	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы
1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	6,7	6,7	7,0	7,0
	От 0,5 до 2,5	6,2	6,4	6,5	6,7
	Более 2,5	5,7	6,0	6,0	6,2
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	6,2	6,4	6,4	6,6
	От 0,5 до 2,5	5,2	5,5	5,7	6,0
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется	5,2	5,5
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	То же	То же	5,2	5,5
	От 0,5 до 2,5	„	„	Не нормируется	Не нормируется
	Более 2,5	„	„	То же	То же

Таблица 6—58

Нормы углекислой агрессивности воды-среды

Вода считается агрессивной, если содержание в ней свободной углекислоты в *мг/л* превышает величину, определяемую по формуле $a(Ca^{\cdot\cdot})+b+K'$ где a и b—коэффициенты, принимаемые по табл. 6—59, а K—коэффициент, принимаемый по настоящей таблице.

1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	5	0	0	0
	От 0,5 до 2,5	20	15	10	5
	Более 2,5	30	25	20	15
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	40	30	25	20
	От 0,5 до 2,5	80	60	50	40
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется	80	70
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	То же	То же	80	70
	От 0,5 до 2,5	„	„	Не нормируется	Не нормируется
	Более 2,5	„	„	То же	То же

Таблица 6—59

Коэффициенты *a* и *b* для вычисления наибольшего допустимого содержания свободной углекислоты

Гидрокарбонатная щелочность		Содержание $Cl' + SO_4''$ в *мг/л*											
		0—200		201—400		401—600		601—800		801—1 000		более 1 000	
в град.	в *мг/экв*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
4	1,4	0,01	16	0,01	17	0,01	17	0	17	0	17	0	17
5	1,8	0,04	17	0,04	18	0,03	18	0,02	18	0,02	18	0,02	18
6	2,1	0,07	19	0,06	19	0,05	18	0,04	18	0,04	18	0,04	18
7	2,5	0,10	21	0,08	20	0,07	19	0,06	18	0,06	18	0,05	18
8	2,9	0,13	23	0,11	21	0,09	19	0,08	18	0,07	18	0,07	18
9	3,2	0,16	25	0,14	22	0,11	20	0,10	19	0,09	18	0,08	18
10	3,6	0,20	27	0,17	23	0,14	21	0,12	19	0,11	18	0,10	18
11	4,0	0,24	29	0,20	24	0,16	22	0,15	20	0,13	19	0,12	19
12	4,3	0,28	32	0,24	26	0,19	23	0,17	21	0,16	20	0,14	20
13	4,7	0,32	34	0,28	27	0,22	24	0,20	22	0,19	21	0,17	21
14	5,0	0,36	36	0,32	29	0,25	26	0,23	23	0,22	22	0,19	22
15	5,4	0,40	38	0,36	30	0,29	27	0,26	24	0,24	23	0,22	23
16	5,7	0,44	41	0,40	32	0,32	28	0,29	25	0,27	24	0,25	24
17	6,1	0,48	43	0,44	34	0,36	30	0,33	26	0,30	25	0,28	25
18	6,4	0,54	46	0,47	37	0,40	32	0,36	28	0,33	27	0,31	27
19	6,8	0,61	48	0,51	39	0,44	33	0,40	30	0,37	29	0,34	28
20	7,1	0,67	51	0,55	41	0,48	35	0,44	31	0,41	30	0,38	29
21	7,5	0,74	53	0,60	43	0,53	37	0,48	33	0,45	31	0,41	31
22	7,8	0,81	55	0,65	45	0,58	38	0,53	34	0,49	33	0,44	32
23	8,2	0,88	58	0,70	47	0,63	40	0,58	35	0,53	34	0,48	33
24	8,6	0,96	60	0,76	49	0,68	42	0,63	37	0,57	36	0,52	35
25	9,0	1,04	63	0,81	51	0,73	44	0,67	39	0,61	38	0,56	37

Таблица 6—60

Нормы сульфатной агрессивности воды-среды для обычного (несульфатостойкого) портландцемента и для обычных (несульфатостойких) пуццоланового, песчано-пуццоланового и шлако-портландцементов

Вода считается агрессивной, если содержание ионов SO''_4 превышает приведенные в таблице величины в *мг/л* с учетом содержания ионов хлора (Cl') — концентрация ионов Cl' в *мг/л*

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции в *м*	Безнапорные сооружения			Напорные сооружения		
		при содержании Cl' менее 1 000 *мг/л*	при содержании Cl' от 1 000 до 6 000 *мг/л*	при содержании Cl' более 6 000 *мг/л*	при содержании Cl' менее 1 000 *мг/л*	при содержании Cl' от 1 000 до 6 000 *мг/л*	при содержании Cl' более 6 000 *мг/л*
1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050
	От 0,5 до 2,5	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050
	Более 2,5	350	$200+0{,}15\,(Cl')$	1 150	300	$150+0{,}15\,(Cl')$	1 100
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050
	От 0,5 до 2,5	300	$150+0{,}15\,(Cl')$	1 100	250	$100+0{,}15\,(Cl')$	1 050
	Более 2,5	400	$250+0{,}15\,(Cl')$	1 200	350	$200+0{,}15\,(Cl')$	1 150
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	300	$150+0{,}15\,(Cl')$	1 100	300	$150+0{,}15\,(Cl')$	1 100
	От 0,5 до 2,5	400	$250+0{,}15\,(Cl')$	1 100	300	$200+0{,}15\,(Cl')$	1 100
	Более 2,5	450	$300+0{,}15\,(Cl')$	1 250	400	$250+0{,}15\,(Cl')$	1 200

Таблица 6—61

Нормы сульфатной агрессивности воды-среды для сульфатостойкого портландцемента и для сульфатостойких пуццолановых, песчано-пуццолановых и шлаковых портландцементов

Вода считается агрессивной, если содержание ионов SO''_4 превышает следующие величины в *мг/л* (независимо от содержания ионов Cl')

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции в *м*	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		сульфатостойкий портландцемент	сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы	сульфатостойкий портландцемент	сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлако-портландцементы
1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	3 000	4 000	2 500	3 500
	От 0,5 до 2,5	3 000	4 000	2 500	3 500
	Более 2,5	3 500	4 500	3 000	4 000
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	3 000	4 000	2 500	3 500
	От 0,5 до 2,5	3 500	4 500	3 000	4 000
	Более 2,5	4 000	5 000	3 500	4 500
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	3 500	4 500	3 000	4 000
	От 0,5 до 2,5	4 000	5 000	3 500	4 500
	Более 2,5	5 000	6 000	4 500	5 500

Таблица 6—62

Нормы магнезиальной агрессивности воды-среды

Вода считается агрессивной, если содержание в ней ионов $\ddot{Mg}$ в *мг/л* составляет не менее 1 000 *мг/л* и превышает величину, определяемую по формуле $K—(SO''_4)$, в которой (SO''_4) обозначает содержание ионов SO''_4 в *мг/л*, K — коэффициент, принимаемый по данным настоящей таблицы. При содержании $\ddot{Mg}$ менее 1000 *мг/л* вода считается не обладающей магнезиальной агрессивностью независимо от содержания SO''_4.

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции в *м*	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлаковые портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуццолановые и шлаковые портландцементы
1. Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 *м/сутки*	Менее 0,5	6 000	5 000	5 000	4 500
	От 0,5 до 2,5	7 000	6 000	6 000	5 000
	Более 2,5	8 000	7 000	7 000	6 000
2. Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	8 000	7 000	7 000	6 000
	От 0,5 до 2,5	9 000	8 000	8 000	7 000
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется
3. Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 *м/сутки*	Менее 0,5	Не нормируется	9 000	9 000	8 000
	От 0,5 до 2,5	То же	Не нормируется	Не нормируется	9 000
	Более 2,5	„	То же	То же	Не нормируется

Таблица 6—63

Допустимые значения коэффициента стойкости бетона в водной среде

Среда, окружающая бетон	Величина коэффициента стойкости (Kс.б) не менее
Вода или сильно фильтрующий грунт (крупный песок, сильно трещиноватая порода и т. д.)	0,90
Слабо фильтрующий грунт (глины, суглинки и т. д.)	0,80

6—Ж. РАСТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ

6—22. РАСТВОРЫ ДЛЯ КЛАДКИ

(по ТУ и НП «Кирпичные гидротехнические сооружения», МЭС, 1947)

Таблица 6—64

Пределы прочности цементно-песчаных растворов различных марок

Марка раствора	Предел прочности раствора в *кг/см²*		Марка раствора	Предел прочности раствора в *кг/см²*	
	при сжатии	при растяжении		при сжатии	при растяжении
80	80	Более 8	8	8—14	2—2,9
50	50—79	7—8	4	4—7	1—1,9
30	30—49	5—6,9	2	2—3	Около 1
15	15—29	5—4,9			

Таблица 6—65

Марки и составы гидротехнических растворов

Наименование вяжущих	Марка вяжущего	Расчетный насыпной вес цемента в *кг/м³*	Составы растворов по объему при марке раствора				
			80	50	30	15	8
Портландцемент (по ГОСТ 970-41)	200	1 200	1 : 3	1 : 3,5	1 : 4,5	—	—
Шлакопортландцемент (по ГОСТ 970-41)	250	1 200	1 : 3	1 : 4	1 : 5	—	—
Гипсошлаковый цемент (по ГОСТ 2548-49)	250	1 200	1 : 3,5	1 : 4,5	—	—	—
	300	1 200	1 : 4	1 : 5	—	—	—

Продолжение табл. 6—65

Наименование вяжущих	Марка вяжущего	Расчетный насыпной вес цемента в *кг/м*³	Составы растворов по объему при марке раствора 80	50	30	15	8
Пуццолановый портландцемент (ГОСТ 970-41)	200	1 000	1 : 2,5	1 : 3	1 : 3,5	1 : 5	—
	250	1 000	1 : 2,5	1 : 3	1 : 4	1 : 6	—
	300	1 000	1 : 3	1 : 3,5	1 : 4,5	—	—
	400	1 000	1 : 3,5	1 : 4	1 : 5	—	—
Цемент для строительных растворов (ГОСТ 4726-49)	50	1 200	—	—	—	1 : 2,5	1 : 3
Гипсошлаковый цемент (ГОСТ 2543-44)	100	1 000	—	1 : 2,5	1 : 3	1 : 4	1 : 4,5
Известково-шлаковый цемент (ГОСТ 2544-44)	150	1 000	—	1 : 3	1 : 3,5	1 : 5	1 : 5
Известково-пуццолановый цемент (ГОСТ 2544-44)	50	800	—	—	—	1 : 2,5	1 : 3
	100	800	—	—	1 : 2,5	1 : 3	1 : 3,5

Примечание. Применение для гидротехнических сооружений растворов ниже марки 50 должно быть каждый раз специально обосновано.

Для кладок гидротехнических устанавливаются марки 100 и 50

Таблица 6—66

Значение *В/Ц* при расходе цемента не менее 300 *кг* на 1 *м*³ раствора

Расположение сооружения и условия службы	*В/Ц*, максимально допустимое по весу: портландцемент и шлакопортландцемент	пуццолановый портландцемент
В частях сооружений, расположенных в зоне переменного уровня воды:		
а) в суровом климате .	0,55	0,60
б) в умеренном и мягком климате	0,60	0,65
В частях сооружений подземных, а также постоянно находящихся под водой или подвергающихся напору воды	0,60	0,65

Для водонепроницаемых и морозостойких растворов расход цемента во всех случаях должен быть не ниже 300 *кг/м*³.

Методы испытания, проектирование состава гидротехнических растворов по ТУ «Кирпичные гидротехнические сооружения», МЭС — 1947 г.

6—23. РАСТВОРЫ ДЛЯ ЦЕМЕНТАЦИИ ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ И ГРАВЕЛИСТЫХ ГРУНТОВ, БЕТОННЫХ И КАМЕННЫХ КЛАДОК (ТУ МС 1949 г., ТУ и НП МЭС 1949 г. и Инструкция по цементации МС, 1947 г.)

Для цементации применяются тщательно перемешанные цементные растворы различной консистенции — от 1 : 12 до 1 : 0,6 (цемент : вода) по весу. Консистенция раствора назначается в зависимости от удельного водопоглощения цементируемой породы или кладки. Начальная консистенция раствора подбирается по табл. 6—67. В последующие периоды нагнетания консистенция раствора постепенно повышается одновременно с повышением давления.

Таблица 6—67

Начальная консистенция раствора для цементации в зависимости от удельного водопоглощения

Удельное водопоглощение на 1 *пог. м.* скважины при давлении 0,1 *ат* в *л/мин*	Консистенция (цемент : вода)
От 0,001 до 0,01	1 : 12
„ 0,01 „ 0,1	1 : 10
„ 0,1 „ 0,5	1 : 8
„ 0,5 „ 1,0	1 : 6
„ 1,0 „ 2,0	1 : 4
„ 2,0 „ 5,0	1 : 2

Удельным водопоглощением называется водопоглощение, отнесенное к 1 *м* напора и 1 *пог. м* скважины и определяемое по формуле:

$$q = \frac{Q}{Hl}, \qquad (6\text{—}21)$$

где q — удельное водопоглощение скважины в *л/мин*;
Q — полное фактическое водопоглощение скважины в *л/мин* при испытании под напором;
l — глубина скважины в *м* в пределах испытания нагнетанием;
H — напор в *м*.

Консистенция раствора подбирается или по весу или по удельному весу ареометром по табл. 6—68.

Таблица 6—68

Значение удельного веса цементного раствора в зависимости от консистенции (для портландцемента марки 400 по ГОСТ 970-41)

Консистенция раствора цемент:вода (по весу)	Удельный вес	Расход цемента на 1 *м*³ раствора в *кг/м*³	Консистенция раствора цемент: вода (по весу)	Удельный вес	Расход цемента на 1 *м*³ раствора в *кг/м*³
1 : 12	1,052	80	1 : 4,5	1,142	210
1 : 11	1,060	87	1 : 4	1,156	232
1 : 10	1,064	95	1 : 3,5	1,174	257
1 : 9	1,072	107	1 : 3	1,204	301
1 : 8	1,080	120	1 : 2,5	1,232	342
1 : 7	1,092	136	1 : 2	1,290	431
1 : 6	1,106	158	1 : 1,5	1,366	540
1 : 5,5	1,116	172	1 : 1	1,470	690
1 : 5	1,128	188			

Сорт и марка цемента для цементации назначаются в зависимости от агрессивности водной среды, требуемой прочности, режима грунтовых вод и условий работы. В агрессивной водной среде в зависимости от степени и характера ее агрессивности применяются наиболее устойчивые для этой среды портландцементы, шлако-портландцементы и глиноземистые цементы.

При больших скоростях движения грунтовых вод применяется глиноземистый цемент. При применении портландцементов вводится в качестве ускорителя схватывания добавка хлористого кальция — от 4 до 7% от веса цемента.

В неагрессивной водной среде применяются портландцемент и шлако-портландцемент (по ГОСТ 970-41) марки не ниже 300.

Применение для раствора инертных добавок в виде молотого известняка или песка, а также в виде природных песков допускается после опытной проверки. Природный песок применяется мелкий — крупностью фракции менее 0,6 *мм*.

6—24. РАСТВОРЫ ДЛЯ ГЛИНИЗАЦИИ ОСНОВАНИЙ (по ТУ МЭС, 1942 г.)

Для глинизации оснований применяются растворы из глинистых грунтов.

Исключительно жирные глины не применяются ввиду их высокой вязкости и малой водоотдачи.

Обогащение глин производится при приготовлении раствора для нагнетания. Для ускорения приготовления глины предварительно — за 10—12 час. — замачиваются.

В качестве коагулянтов применяются кремнефторид натрия, хлорид кальция, хлорид магния, известь и др. Для предварительных расчетов можно принимать расход хлорида кальция по отношению к весу воздушно-сухой глины в количестве 3—5%.

Для уменьшения вязкости раствора в него вводят до 3% растворимого стекла.

Растворимое стекло вводится в раствор при его приготовлении. Коагулянты вводятся в скважины раздельно от раствора, периодически, после предварительной промывки скважины от глинистого раствора.

Для начального нагнетания и предварительных расчетов консистенция глинистого раствора принимается в зависимости от удельного водопоглощения скважины по табл. 6—69. При последующем нагнетании консистенция раствора повышается с повышением давления.

Таблица 6—69

Начальная консистенция глинистого раствора в зависимости от величины удельного водопоглощения и ориентировочный расход раствора

Удельное водопоглощение скважины	Удельный вес глинистого раствора	Поглощение глинистого раствора в *л* на 1 *пог. м* скважины
Меньше 0,05	1,1 — 1,2	50
От 0,05 до 0,1	1,2 — 1,25	100
„ 0,1 „ 1	1,25—1,3	200
„ 1 „ 3	1,3 — 1,4	500
„ 3 „ 5	1,4 — 1,5	1 000
Более 5	От 1,5 до предельного возможного	3 000

6—3. БЕТОН ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ

6—25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА

1. Определение и разновидности гидротехнического бетона (по ГОСТ 4795-53)

Бетоны, применяемые для возведения гидротехнических сооружений, постоянно или периодически омываемые водой и обладающие такими свойствами, которые обеспечивают длительную нормальную службу бетонной кладки в указанных условиях, называются гидротехническими.

Бетон внутренних зон массивных гидротехнических сооружений, не подвергающийся напору и расположенный от внешней поверхности не ближе 2 *м*, может не причисляться к гидротехническим и рассматривается как обычный бетон.

Гидротехнический бетон должен обладать водостойкостью, обеспечивающей длительную службу в водесреде, а также — при соответствующих условиях службы бетонного сооружения — водонепроницаемостью, морозостойкостью и пониженным тепловыделением.

В зависимости от расположения бетона в сооружении по отношению к уровню воды гидротехнический бетон подразделяют на:

1) подводный, постоянно находящийся в воде;

2) расположенный в зоне переменного уровня воды;

3) надводный, подвергающийся эпизодическому омыванию водой.

В зависимости от условий работы и вытекающих отсюда требований, гидротехнический бетон делится на разновидности:

массивный (наружной или внутренней зоны);
немассивный;
наружной зоны;
внутренней зоны;
напорных конструкций или сооружений;
безнапорных конструкций или сооружений.

2. Основные характеристики гидротехнического бетона

а) Подвижность (пластичность) бетонной смеси характеризуется осадкой нормального конуса и удобоукладываемостью (по ОСТ 9000—39) и определяется в соответствии с указаниями ГОСТ 4799-49. Требуемая подвижность гидротехнического бетона в зависимости от конструктивных особенностей сооружения приводится в табл. 6—70.

б) Прочность бетона, характеризуемая пределом прочности при сжатии в проектном возрасте образцов-кубов размером 20×20×20 *см*, изготовленных и испытанных по ГОСТ 4800—49, определяется маркой бетона. Марки гидротехнического бетона по ГОСТ 4795-53

приводятся в табл. 6—71. Нормативная кубиковая прочность приводится в табл. 6—72.

в) Водостойкость бетона — требование, предъявляемое ко всем разновидностям гидротехнического бетона,—обеспечивается надлежащим выбором соответствующих условиям работы сооружения цементов и заполнителей для бетона по указаниям, изложенным в пп. 6—Д и 6—Е гл. VI, а также соблюдением требований производства работ по ГОСТ 4063-48 «Сооружения гидротехнические. Производство бетонных работ. Технические условия».

г) Водонепроницаемость бетона характеризуется наибольшим давлением воды, при котором еще не наблюдается просачивания ее через образцы проектного возраста, изготовленные и испытанные по ГОСТ 4800-49. По водонепроницаемости бетон делится на марки, которые приведены в табл. 6—73.

Марки бетона для гидротехнических сооружений перечислены в табл. 6—74.

д) Морозостойкость бетона характеризуется наибольшим числом повторных циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое способны выдержать образцы проектного возраста без снижения прочности более 25% и без потери веса более 5% при испытании их по ГОСТ 4800-49.

Требование к бетону в отношении морозостойкости должно сопровождаться обязательным требованием в отношении водонепроницаемости: для морозостойкого бетона напорных конструкций марка по водонепроницаемости назначается по табл. 6—75; для морозостойкого бетона безнапорных конструкций марка по водонепроницаемости должна быть В-4. Требование морозостойкости предъявляется лишь к тем гидротехническим бетонам, которые подвергаются в конструкциях совместному действию воды и мороза.

Бетоны по морозостойкости подразделяются на выдерживающие определенное количество циклов поперемен-

Таблица 6—70

Требуемая подвижность гидротехнического бетона (по ГОСТ 4795-53)

Характеристика бетонируемых конструкций	Осадка нормального конуса в *см*	Удобоукладываемость в секундах
Массивные бетонные конструкции Массивные малоармированные конструкции	2— 4	30—20
Железобетонные конструкции, сечение арматуры которых не превышает 1% от площади расчетного сечения бетона	4— 8	20—10
Железобетонные конструкции, сечение арматуры которых превышает 1% от площади расчетного сечения бетона	8—14	10—5

Таблица 6—71

Марки гидротехнических бетонов (по ГОСТ 4795-53)

Показатели	Марки бетона					
	75	100	150	200	250	300
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 дней в *кг/см²* не менее	75	100	150	200	250	300

Нормативные сопротивления бетона в *кг/см²* *Таблица 6—72*

№ п/п	Вид напряженного состояния	Условные обозначения	Марка бетона (нормативная кубиковая прочность)									
			35	50	75	100	150	200	300	400	500	600
1	Сжатие осевое (призменная прочность)	$R^н_{пр}$	28	40	60	80	115	145	200	260	310	350
2	Сжатие при изгибе	$R^н_{и}$	35	50	75	100	140	180	250	325	390	440
3	Растяжение осевое	$R^н_{р}$	5	6	8	10	13	16	21	25	28	30

Примечания. 1. Для гидротехнических сооружений следует применять бетон марок от 75 до 300. Применение марок ниже 100 и выше 200 должно обосновываться проектом.

2. Марка бетона для конструкций, размеры которых определяются прочностью в растянутой зоне, должна назначаться по пределу прочности как при сжатии, так и при растяжении.

Таблица 6—73

Марки бетона по водонепроницаемости (по ГОСТ 4795-53)

Показатели	Марки бетона		
	В-2	В-4	В-8
Наибольшее давление в *кг/см²*, при котором не наблюдается просачивания воды через образцы 28-дневного возраста	2	4	8

ного замораживания и оттаивания: 25(Мрз 25); 50(Мрз 50); 100(Мрз 100); 150(Мрз 150) и 200 (Мрз 200).

Количество циклов замораживания и оттаивания для гидротехнического бетона устанавливается по табл. 6—75.

е) Требование к бетону в отношении тепловыделения при его твердении предъявляется только к бетонам массивных сооружений и обеспечивается применением цемента с пониженной теплотой гидратации в соответствии с ГОСТ 4797-49 и назначением состава бетона с минимально необходимым расходом цемента в соответствии с ГОСТ 4801-49.

Таблица 6—74

Марки бетона по водонепроницаемости в зависимости от конструкции и напора (по ГОСТ 4795-53)

Условия работы сооружений	Подводный бетон и бетон зоны переменного горизонта воды	Величина водонепроницаемости по классам сооружения			
		I	II	III	IV
Напорные; отношение действующего напора к толщине сооружения (градиент) < 25	Бетон наружной зоны	В-8			
	Бетон внутренней зоны	В-4			
Напорные; отношение действующего напора к толщине сооружения (градиент) >25	Бетон наружной зоны	В-8		В-4	
	Бетон внутренней зоны	В-4		В-2	
Безнапорные	Бетон наружной зоны	В-4			

Таблица 6—75

Количество циклов замораживаний и оттаиваний для бетона в зависимости от условий работы (по ГОСТ 4795-53)

Характер работы	Климатические условия			
	умеренные		суровые	
	Число перемен горизонта воды за зимний период на омываемой поверхности бетона или число смен замораживания и оттаивания			
	до 50	более 50	до 50	более 50
Бетон, подвергающийся в конструкциях (сооружениях) совместному действию воды и мороза	Мрз 50	Мрз 100	Мрз 100	Мрз 150

Продолжение табл. 6—75

Характер работы	Климатические условия			
	умеренные		суровые	
	Число перемен горизонта воды за зимний период на омываемой поверхности бетона или число смен замораживания и оттаивания			
	до 50	более 50	до 50	более 50
Бетон, подвергающийся в конструкциях (сооружениях) эпизодическому действию воды и мороза	Мрз 25	Мрз 50	Мрз 50	Мрз 100

Примечания. 1. Умеренные климатические условия характеризуются среднемесячной температурой более холодного месяца от −5° до −15°. Суровые климатические условия характеризуются среднемесячной температурой наиболее холодного месяца ниже −15°.

2. Зимний период для строительства определяется по данным гидрометеорологической службы.

3. Бетон Мрз 200 применяется в особо суровых климатических условиях.

3. Условные обозначения разновидностей гидротехнического бетона (по ГОСТ 4795-53)

Индекс БПТ-100, В-4 обозначает: бетон подводный тонкостенных конструкций или наружной зоны массивных сооружений марки 100, водонепроницаемость которого равна В-4.

Индекс БГТ-150, В-8, Мрз 100 обозначает: бетон тонкостенных конструкций или наружной зоны массивных сооружений марки 150 в условиях переменного горизонта воды, водонепроницаемостью, равной В-8, и морозостойкостью Мрз 100.

Индекс БНМ-100, МТ обозначает: бетон надводный массивных сооружений марки 100, к которому предъявляются требования малого тепловыделения.

6—26. НАЗНАЧЕНИЕ СОСТАВА ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА

1. Выбор составляющих для гидротехнического бетона

Выбор цементов и добавок к ним для бетона различного назначения производится в соответствии с табл. 6—38 и табл. 6—39. Для бетонов, к которым предъявляются специальные требования, выбор производится с учетом минералогического состава цементов и физико-химических свойств добавок.

Для нахождения состава бетона по заданной его марке ($R_б$), определяется марка цемента ($R_ц$), которая для наивыгоднейшего его расхода должна быть в пределах:

$$4R_б > R_ц > 2R_б.$$

Если при имеющемся в наличии цементе $R_ц$ превышает $R_б$ более чем в 2,5—3 раза, необходимо вводить в состав бетона тонкомолотые добавки в целях экономии

цемента (по п. 6—16). Марку цементов, предназначенных для получения бетона при нормальных условиях твердения, рекомендуется принимать по указаниям табл. 6—76.

Добавки активные и наполнители молотые следует добавлять к портландцементу в количествах, не превышающих величин, указанных в табл. 6—77.

Таблица 6—76

Рекомендуемые марки цемента, определяемые испытанием жестких растворов

Марки бетона		50	75	100	150	200	300	400 и выше
Рекомендуемые марки цемента	от	100	150	200	250	400	500	600
	до	200	250	300	400	500	600	—

Таблица 6—77

Предельное количество добавок для тяжелых и облегченных бетонов на портландцементе при нормальных условиях твердения

Условия службы конструкций	Степень морозостойкости $M_{рз}$ не менее	Марка бетона в пределах	Наибольшее количество добавок в % к общему весу вяжущего		
			активных	наполнителей молотых	всего не более
Надземные конструкции, не подвергающиеся замерзанию в насыщенном водой состоянии	—	200—400	10	20	20
	—	100—200	20	30	30
	—	25—75	30	40	50
Подземные и подводные конструкции, не подвергающиеся замерзанию	—	200—400	20	15	30
	—	100—200	30	25	40
Конструкции в зоне переменного уровня или подсоса воды, подвергающиеся замерзанию в насыщенном водой состоянии	200	200—400	—	—	—
	100	150—200	10	15	15
	50	100—150	15	25	25
	25	100—150	15	25	25

Оптимальные количества добавок должны определяться опытным путем на основании лабораторных испытаний. Выбор заполнителей для гидротехнических бетонов производится в соответствии с п. 6—Е гл. VI.

Примечание. Табл. 6—76 и 6—77 составлены для бетонов различного назначения. Ими рекомендуется также пользоваться при подборе гидротехнического бетона.

Таблица 6—78

Максимально допустимые величины водоцементного отношения ($В/Ц$) для гидротехнического бетона (ГОСТ 4801-49)

Условия работы бетона	В железобетонных конструкциях		В бетонных и малоармированных массивных конструкциях	
	в морской воде	в пресной воде	в морской воде	в пресной воде
В частях сооружения, расположенных в зоне переменного уровня воды:				
а) в суровых климатических условиях . . .	0,50	0,55	0,55	0,60
б) в умеренных и мягких климатических условиях	0,55	0,60	0,60	0,65
В частях сооружений, постоянно находящихся под водой:				
а) напорных	0,55	0,60	0,60	0,65
б) безнапорных	0,60	0,65	0,65	0,65
В надводных частях сооружения, эпизодически смываемых водой	0,65	0,65	0,70	0,70

Примечания. 1. Зона переменного уровня воды определяется с учетом возможных колебаний уровня воды, волновых явлений, капиллярного подсоса и т. п.

2. Определения климатических условий см. примечание к табл. 6—75.

Таблица 6—79

Рекомендуемые наибольшие величины водоцементного отношения ($В/Ц$) и наименьшие расходы вяжущих для тяжелых бетонов

Условия службы конструкций	Дополнительные условия и степень морозостойкости	Наибольшее $В/Ц$	Наименьшие расходы вяжущего (цемент + добавка) в $кг/м^3$ для конструкций	
			армированных	неармированных
Надземные конструкции, не подвергающиеся замерзанию в насыщенном водой состоянии	—	Не нормируется	225	200

Продолжение табл. 6—79

Условия службы конструкций	Дополнительные условия и степень морозостойкости	Наибольшее $B/Ц$	Наименьшие расходы вяжущего (цемент+добавка) в $кг/м^3$ для конструкций	
			армированных	неармированных
Подземные и подводные конструкции, не подвергающиеся замерзанию	1) Не испытывающие напора воды и находящиеся в пресных водах	Не нормируется	250	225
	2) Испытывающие напор воды или находящиеся в агрессивной среде	0,65	275	250
Конструкции в зоне переменного уровня или подсоса воды, подвергающиеся замерзанию в насыщенном водой состоянии	1) В пресной воде:			
	$M_{рз}$ 100	0,65	275	250
	$M_{рз}$ 50	0,70	250	225
	2) В морской воде:			
	$M_{рз}$ 200	0,50	350	325
	$M_{рз}$ 100	0,60	300	275
	$M_{рз}$ 50	0,65	275	250

Наибольшие водоцементные отношения и наименьшие расходы вяжущего для тяжелых бетонов различного назначения устанавливаются по указаниям табл. 6—78 и 6—79.

2. Формулы для приближенного определения В/Ц и прочности бетона

Принятый для укладки бетон должен обеспечить при наименьшем расходе цемента надлежащие прочность, степень морозостойкости, плотность, подвижность, удобоукладываемость и другие свойства, обусловленные проектом. При условии выполнения указанных требований расчет состава бетона может производиться различными способами. При этом окончательный состав бетона уточняется на основе опытных замесов и результатов испытаний образцов бетона.

Определение водоцементного отношения, соответствующего заданной прочности бетона, производится по приближенной формуле:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{R_ц}{K_1 R_б + K_2 R_б}, \qquad (6-22)$$

где $R_б$ — предел прочности бетона при сжатии в $кг/см^2$ после твердения в нормальных условиях в течение 28 суток;

$R_ц$ — активность цемента в $кг/см^2$, определенная стандартным испытанием образцов из жестких трамбованных растворов; при этом K_2 принимается равным 0,5;

K_1 — коэффициент, принимаемый для бетона на гравии равным 2,0, а на щебне—1,85.

Выбор водоцементного отношения, обеспечивающего заданную степень морозостойкости бетона, производится с учетом таблиц 6—81 и 6—82. При этом из двух значений $B/Ц$ принимается наименьшее. Определение прочности пластичного бетона производится по приближенной формуле:

$$R_{28} = AR_ц \left(\frac{Ц}{B} - 0{,}5\right), \qquad (6-23)$$

где R_{28} — предел прочности бетона в возрасте 28 суток в $кг/см^2$;

$\frac{Ц}{B}$ — расход цемента в $кг$ на 1 $кг$ воды (цементоводное отношение);

A — коэффициент, равный для бетона на гравии 0,50, для бетона на щебне 0,55;

$R_ц$ — марка цемента, определенная испытанием стандартных трамбованных образцов жесткой консистенции.

Приближенная формула для установления предела прочности бетона в требуемый срок ($R_п$):

$$R_п = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}, \qquad (6-24)$$

где $R_п$ — предел прочности бетона при сжатии в $кг/см^2$ к требуемому сроку n суток;

R_{28} — прочность бетона в возрасте 28 суток;

$\lg n$ и $\lg 28$ — десятичные логарифмы возраста бетона (в днях).

Примечание. Формула применима для портландцемента при $n \geqslant 3$.

3. Назначение состава бетона при малых его объемах и для первоначальной ориентировки по таблицам

Для предварительных расчетов, а также при годовом расходе бетона до 500 $м^3$ назначение состава бетона производится по табл. 6—80, 6—81 и 6—82 с обяза-

Таблица 6—80

Ориентировочный расход воды на 1 $м^3$ бетонной смеси с гравием крупностью до 40 $мм$ и песком средней крупности

Осадка конуса в $мм$	Расход воды на 1 $м^3$ бетона в $л$
10—20	150
20—40	160
40—60	170
60—80	175
80—100	185

Примечания. 1. Расход воды для бетонной смеси со щебнем увеличивают на 15 $л$ на 1 $м^3$ смеси сверх величин, указанных в таблице 6—80.

2. При заполнителях крупностью 10 и 20 $мм$ расход воды соответственно увеличивают на 35 и 15 $л$, а при заполнителях с наибольшей крупностью 80 и 100 $мм$ — уменьшают на 20 и 30 $л$.

3. Расход воды при употреблении мелкого песка увеличивают на 20 $л$, а при употреблении крупного уменьшают на 10 $л$.

Таблица 6—81

Исходные составы бетона на гравии крупностью 40 *мм* и портландцементе марки 250

Характеристика бетонной смеси		Марка бетона через 28 суток—100		
осадка конуса в *мм*	показатель подвижности в секундах	номинальный состав по весу (цемент: песок: гравий)	расход на 1 $м^3$ бетона	
			цемента в *кг*	воды в *л*
10—20	35—25	1:3,4:6,1	210	150
30—40	25—15	1:3,1:5,8	225	160
40—60	15—12	1:2,8:5,4	240	170
60—80	12—10	1:2,5:4,5	250	175

тельной проверкой подвижности получаемой бетонной смеси и с внесением соответствующих изменений в расход цемента, если количество воды, требуемое для получения бетона заданной подвижности, отличается от указанного в табл. 6—81 и 6—82.

Таблица 6—82

Исходные составы бетона на гравии крупностью 40 *мм* и портландцементе марки 400

Характеристика бетонной смеси		Марка бетона через 28 суток—150		
осадка конуса в *мм*	показатель подвижности в секундах	номинальный состав по весу (цемент: песок: гравий)	расход на 1 $м^3$ бетона	
			цемента в *кг*	воды в *л*
10—20	35—25	1:3,6:6,4	200	150
20—40	25—15	1:3,2:6,0	215	160
40—60	15—12	1:3,0:5,6	230	170
60—80	12—10	1:2,7:5,3	240	175

4. Лабораторный подбор состава бетона по способу ЦНИПС

Расчет водопотребности на 1 $м^3$ бетона производят по формулам:

для вибрированного бетона

$$B_{30} = 0{,}5\,(60 - t) + B_0; \qquad (6—25)$$

для бетона ручной укладки

$$B_{30} = 5S + (B_0 + 10), \qquad (6—26)$$

где t — удобоукладываемость в секундах, определенная на приборе проф. Скрамтаева;
S — осадка конуса в *см*;
B_0 — начальная водопотребность (количество воды в *л*), приводимая в табл. 6—83;
B_{30} — водопотребность для бетона, укладываемого через 30 мин. после перемешивания.

Таблица 6—83

Величина начальной водопотребности (B_0) бетона в *л*

Вид бетона	При гравии крупностью в *мм* до		
	80	60	40
Бетон на портландцементе, шлако-портландцементе и песке средней крупности	130	140	150
То же, при крупном песке	120	130	140
Бетон на пуццолановом портландцементе и песке средней крупности	150	160	170
То же, при крупном песке	140	150	160

Примечания. 1. Табл. 6—83 составлена для бетона, укладываемого через 30 мин. после перемешивания; при укладывании ранее или позднее этого срока на каждые 15 добавочных или недостающих минут значение B_0 изменяется на ± 5 *л*.
2. При замене гравия щебнем значение B_0 увеличивается на 20 *л*.

Расход цемента на 1 $м^3$ бетона ($Ц$) определяется по формуле:

$$Ц = B\left(A\,\frac{R_б}{R_ц} + 0{,}5\right), \qquad (6—27)$$

где B — водопотребность на 1 $м^3$ бетона, определенная выше;
A — коэффициент, равный для бетонов на гравии 2, а на щебне — 1,8;
$R_б$ — требуемая марка бетона при сроке твердения в 28 суток;
$R_ц$ — марка цемента при том же сроке твердения, что и $R_б$.

Расчет расхода заполнителей бетона производится по табл. 6—84.

Таблица 6—84

Расход заполнителей на 1 $м^3$ бетона

Заданная консистенция бетона	Расход на 1 $м^3$ бетона	
	песка в $м^3$ ($П$)	гравия или щебня в $м^3$ ($Г$)
Жесткий бетон, укладываемый с тщательным вибрированием (осадка 0—2 *см*)	$0{,}8\alpha$	0,9
Бетон средней подвижности, укладываемый с вибрацией или вручную (осадка 3—5 *см*)	1α	0,8
Бетон пластичный, укладываемый вручную (осадка 7—12 *см*)	$1{,}1\alpha$	0,75

Примечание. α — пустотность гравия или щебня, выраженная в долях объема.

В составе бетона (*Ц : В : П : Г*), полученном расчетом, проверяют на контрольном замесе его консистенцию и удобоукладываемость. Объем замеса — 25 *л* для трех кубов 20×20×20 *см* (или 12,5 *л* для трех кубов 15×15×15 *см*). Для замеса отмеряют по $^1/_{40}$ (или $^1/_{80}$) части от нормы расхода материалов на 1 *м*³ бетона, перемешивают и определяют консистенцию — конусом, удобоукладываемость — на приборе проф. Скрамтаева.

Если подвижность массы чрезмерна, уменьшают расход цемента (*Ц*) и воды (*В*), сохраняя постоянным отношение *В/Ц*; если подвижность массы недостаточна, прибавляют цемента ($Ц_{доб}$) и воды ($В_{доб}$); так поступают, пока не будет получен бетон заданной консистенции и удобоукладываемости.

Для получения действительного объемного веса свежеуложенного бетона $\gamma_б$ необходимо его определить опытным путем, так как он не будет точно соответствовать расчетному объемному весу ($\gamma_р$), определяемому по расчетному расходу материала на 1 *м*³ бетона:

$$\gamma_р = [(Ц \pm Ц_{доб}) + (В \pm В_{доб}) + П\gamma_п + Г\gamma_г]. \quad (6—28)$$

Отношение между ними даст поправочный коэффициент *К*:

$$K = \frac{\gamma_б}{[(Ц \pm Ц_{доб}) + (В \pm В_{доб}) + П\gamma_п + Г\gamma_г]}, \quad (6—29)$$

где $\gamma_п$ и $\gamma_г$ — объемные веса песка и гравия.

Расчет дозировки материалов на 1 *м*³ бетона ведется по следующим формулам.

Определение количества цемента (*Ц*) ведется по формуле (6—27). При $R_б$=110, $R_ц$=300 и *В*=200

$$Ц = 200 \cdot 1 \left(1{,}8\frac{110}{300} + 0{,}5\right) = 232 \text{ кг (на 1 } м^3 \text{ бетона)};$$

$$Ц_0 = (Ц \pm Ц_{доб})\,К \text{ кг}; \quad (6—30)$$

$$В_0 = (В + В_{доб})\,К \text{ л}; \quad (6—31)$$

$$П_0 = ПК \text{ м}^3; \quad (6—32)$$

$$Г_0 = ГК \text{ м}^3, \quad (6—33)$$

где $Ц_0$, $В_0$, $П_0$ и $Г_0$ — дозировочные весовые количества для бетона.

Если на производстве заполнители будут иметь иную влажность, то необходимо учесть: 1) при дозировке воды — разность в содержании влаги в заполнителях; 2) изменение объема песка при изменении его влажности.

Для определения дозировки материалов в бетономешалки с ковшом емкостью 150, 250, 375, 500, 1 000 и 2 200 *л* расчетные расходы материалов на 1 *м*³ бетона уменьшают соответственно в 10; 6; 4; 3; 1,5 и 0,68 раза.

5. Состав бетона для подводного бетонирования

(по ТУ МС 1953 г. и работам ВНИИГ 1952 г.)

Бетон и материалы для его изготовления при бетонировании методом вертикально перемещающейся трубы (ВПТ) должны отвечать требованиям ГОСТ 4797-49, а также следующим специальным требованиям:

1) начало схватывания цемента — не менее 2 час.;

2) водоотделение из цементного теста при *В/Ц*=1,0 в течение 1 часа — не более 30% от общего объема цемента и воды;

3) крупный заполнитель — гравий с плавной и выпуклой кривой просеивания и с добавкой 20—25% щебня для увеличения связности раствора с заполнителем; зерна заполнителя должны быть не более $^1/_4$ диаметра трубы и $^1/_2$ просвета между стержнями арматуры, но не более 60 *мм*;

4) песок — окатанный, с плавной кривой просеивания, с содержанием мелких частиц (0,15 и 0,30 *мм*), на 10—15% большим, чем по ГОСТ 4797-49.

Состав бетона должен подбираться согласно ГОСТ 4801-49, а также с соблюдением следующих специальных требований:

1) прочность кубиков, изготовленных согласно ГОСТ 4800-49, должна быть на 20% выше проектной марки;

2) осадка конуса из бетонной смеси должна быть в пределах 16—20 *см*; при расплыве конуса не должно происходить отделения раствора от крупного заполнителя; бетонная смесь, уложенная в цилиндр объемом 10—20 *л*, не должна отделять за 2 часа воды более 1,5% от объема бетона;

3) относительное содержание песка в смеси заполнителей должно быть в пределах согласно табл. 6—85.

Таблица 6—85

Относительное содержание песка в смеси заполнителей

Род заполнителя	Наибольшая крупность заполнителя в *мм*	
	40	60
	Содержание песка в %	
Гравий	0,50—0,55	0,47—0,52
Щебень	0,53—0,58	0,50—0,55

Если при заданных *В/Ц* и расходе цемента согласно ГОСТ 4801-49 подвижность бетонной смеси не обеспечивается, рекомендуется вводить в состав смеси активные гидравлические и мелкомолотые добавки по ГОСТ 4797-49.

6—27. ДОБАВКИ В БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ПОДВИЖНОСТИ, МОРОЗОСТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

1. Пластифицированные цементы и пластифицирующие добавки концентратов сульфитно-спиртовой барды

Для увеличения подвижности бетонной смеси, ее связности против расслоения при транспортировке и для уменьшения водоотделения при перемешивании применяются соответственно обработанные сульфит-целлюлозные щелоки (сульфитно-спиртовая барда), являющиеся массовым отходом бумажной и деревообрабатывающей промышленности; они содержат лигносульфиновую кислоту или ее соли, являющиеся пенообразователями и пластифицирующими добавками; введение их в бетонную смесь в количестве около 0,25% (от веса цемента) резко увеличивает подвижность бетонной смеси, сокращает потребность в воде для затворения, вследствие чего может быть снижен расход цемента на 8—10% при сохранении водоцемент-

ного отношения и подвижности, а также повышена прочность, морозостойкость, солестойкость и водонепроницаемость бетона. Пластифицирующие добавки удлиняют сроки схватывания бетона и уменьшают тепловыделение в первые периоды твердения бетона, что особенно ценно при изготовлении массивных гидротехнических сооружений.

Сульфитно-спиртовая барда применяется в виде концентратов: жидких (КБЖ), твердых (КБТ), порошкообразных (КБП) и термообработанных (ТКБ) (по ГОСТ 6003-51). Требования к концентратам приведены в табл. 6—86.

Введение этих добавок может осуществляться на цементных заводах при помоле клинкера для получения пластифицированного цемента на базе портландцементов (ГОСТ 970-41) или непосредственно на строительстве при приготовлении бетона. Подбор состава бетона и приготовление бетонов с пластифицирующей добавкой на месте работ производится по ИМ 202-51 («Инструкция по изготовлению бетона с применением пластифицированного цемента или обычного цемента с добавкой на месте работ концентратов сульфитно-спиртовой барды»).

Таблица 6—86

Требования к концентратам сульфитно-спиртовой барды (по ГОСТ 6003-51)

Физико-химические показатели	Марки			
	КБЖ	КБТ	КБП	ТКБ
Внешний вид и цвет	Густая жидкость темно-коричневого цвета	Масса темно-коричневого цвета	Порошок светло-коричневого цвета	Порошок темно-коричневого цвета
Содержание сухих веществ в % не менее	50	76	87	87
Содержание воды к весу сухих веществ в % не более . .	20	20	20	20
Содержание редицирующих веществ к весу сухих веществ в % не более	10	10	10	10
Удельный вес не менее . . .	1,275	Не определяется		

2. Винсол

В качестве поверхностно активных добавок в бетоны и растворы, изменяющих их микроструктуру и повышающих морозостойкость и долговечность, применяют как добавки, не растворимые в воде (в виде солей жирных кислот, древесных смол), так и растворимые в воде (соли щелочных металлов, сульфокислоты, омыленные пеки и др.). Не растворимые в воде добавки вводятся в цемент в сухом виде при помоле или после предварительной обработки в виде водных растворов вместе с водой для затворения. Добавки в виде водных растворов более эффективны, так как они пригодны для всяких цементов независимо от их химического состава.

Смолы и жиры, содержащиеся в добавках, вступают во взаимодействие со щелочами, имеющимися в цементе или добавляемыми к ним заранее, и образуют растворимые в воде калиевые и натриевые мыла. В процессе смешивания бетона или раствора мыла вспениваются, вследствие чего увеличивается подвижность смеси; это дает возможность уменьшить содержание воды в смеси, сохраняя заданную консистенцию. В гидротехническом строительстве для данных целей применяется в качестве добавки винсол, получаемый из еловой смолы — серки (окисленная абиетиновая смола).

Добавка винсола вводится в сухом виде в цемент в количестве от 0,025 до 0,1% от веса цемента или в виде «нейтрализованного» винсола в растворе NaOH (едкого натра).

Нейтрализованный винсол получается смешением 45,4 *г* винсола с раствором 22,7 *г* NaOH и 2 000 *г* воды и дозируется вместе с водой затворения.

Добавка винсола снижает прочность бетона в пределах 10—15%, но так как с введением его увеличивается подвижность бетонной смеси и имеется возможность за этот счет снизить водоцементное отношение, прочность бетона с введением винсола не изменяется.

6—И. БИТУМНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6—28. БИТУМЫ И ПЕКИ

Таблица 6—87

Основные показатели нефтебитумов (по ГОСТ 1544-52)

Наименование показателей	Марки						Методы испытаний
	БН-0	БН-I	БН-II	БН-II-V	БН-III	БН-III-V	
Твердость (пенетрация) при 25° при нагрузке 100 *г* в течение 5 сек.	Не менее 200	В пределах 121—200	В пределах 81—120	В пределах 81—120	В пределах 41—80	В пределах 41—80	По ГОСТ 2400-50
Растяжимость (дуктильность) в *см* при 25° не менее	Не нормируется	100	60	60	40	40	То же
Температура размягчения в град. по методу „кольцо и шар" не ниже	Не нормируется	25	40	45	45	50	»

Примечание. Битум поставляется в таре (бочках, металлических бидонах и цистернах). Битумы марок БН-0, БН-I и БН-II считаются пластичными; БН-II-V, БН-III и БН-III-V – твердыми. Сдача и перевозка битума марок БН-II-V, БН-III и БН-III-V допускается в чушках и глыбах.

Упаковка, хранение и приемка битумов производятся по ГОСТ 1510-50; отбор проб — по ГОСТ 2517-52.

Таблица 6—88

Основные показатели каменноугольных пеков (ГОСТ 1038-41)

Наименование	Пек мягкий	Пек средний	Пек электродный
Температура размягчения в град. по методу Кремер-Сарнова . . .	45—50	65—75	63—75
Содержание свободного углерода в % не более	12	28	28
Содержание золы в % не более	0,3	0,3	0,3
Содержание влаги в % не более	0,4	0,5	1,0

В ГОСТ 1038-41 указаны температуры размягчения пеков по Кремер-Сарнову. Для перехода к температурам размягчения пеков по методу «кольцо и шар» прибавляется величина в градусах по табл. 6—89.

Таблица 6—89

Поправки в градусах при переходе от показаний по Кремер-Сарнову к температурам размягчения по методу «кольцо и шар» (КиШ) — для пеков

По Кремер-Сарнову	Для показаний по методу КиШ прибавить	По Кремер-Сарнову	Для показаний по методу КиШ прибавить
40—49	12,0	80—89	14,0
50—59	12,5	90—99	14,5
60—69	13,0	100—109	15,0
70—79	13,5	110—120	16,0

6—29. РУЛОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ

1. Гидроизоляционные рулонные материалы

а) Гидроизол — асбестовый или асбестоцеллюлозный картон, пропитанный нефтяным битумом с температурой размягчения не ниже 50°.

б) Ткани гидроизоляционные — хлопчатобумажные, джутовые и асбестовые, пропитанные нефтяным битумом с температурой размягчения не ниже 50°, и ткани джутовые, пропитанные и покрытые битумами.

Примечание. Гидроизоляционные ткани изготовляются также с применением каменноугольных дегтей.

в) Металлоизол — алюминиевая фольга, покрытая с обеих сторон слоем нефтяного битума с наполнителями (битума — 75%, наполнителя-асбеста — 25% по весу) с температурой размягчения не ниже 65°. Используется для оклеечной гидроизоляции с применением битумных приклеивающих мастик в подземных сооружениях при требованиях повышенной прочности, а также совместно с гидроизоляционными материалами на другой основе.

г) Борулин, изготовляемый из нефтяного битума с температурой размягчения 65—70° и асбестового волокна путем прокатки смеси в полотнища. Применяется для гидроизоляции трубопроводов канального и бесканального типов. Борулин марки БП допускается укладывать при наружной температуре не ниже —10°, а борулин марки Б — не ниже +5°.

Таблица 6—90

Основные требования к гидроизоляционным рулонным материалам

Вид материала	Обозначение марки	Вес рулона в *кг* не менее	Площадь рулона в $м^2$	Отношение веса пропиточного битума к весу абсолютно сухой основы не менее	Сопротивление разрыву полосы шириной 50 *мм* в *кг* не менее	Диаметр стержня при испытании на изгиб в *мм*
Гидроизол асбестовый	ГА	13	18±0,5	0,55:1	24	20 при +20°
Гидроизол асбестоцеллюлозный	ГАЦ	13	18±0,5	0,45:1	27	
Ткань изоляционная	ТИ	9	18±0,5	1,5:1	40	20 при +20°
Ткань изоляционная с покровным слоем . .	ТИП	19	10±0,5	1,5:1	70	
Металлоизол . . .	МА-270	10	5±0,5	—	30	20 при +20°
Металлоизол . . .	МА-550	16	5±0,5	—	70	
Борулин .	Б	15	5±0,5	—	17	20 при +5°
Борулин пластифицированный .	БП	12,5	5±0,5	—	8	20 при —10°

Примечание. В обозначении марок материалов буквы указывают вид материала, цифры — средний вес 1 $м^2$ основы в граммах.

Основные требования к гидроизоляционным рулонным материалам перечислены в табл. 6—90.

2. Кровельные рулонные материалы, применяемые для гидроизоляции

а) Пергамин (беспокровный битумкартон) — рулонный материал, изготовленный путем пропитки кровельного картона, бумаги или ролевой целлюлозы нефтяными битумами с температурой размягчения не ниже 42° (ГОСТ 2697-51).

б) Толь беспокровный кровельный (толь-кожа) — кровельный картон, пропитанный каменноугольными дегтепродуктами с температурой размягчения не ниже +34° (ГОСТ 1887-51).

Таблица 6—91

Основные требования к беспокровным рулонным материалам

(по ГОСТ 2697-51 и ГОСТ 1887-51)

Вид материалов	Обозначение марки	Вес рулона в *кг* не менее	Сопротивление разрыву полосы шириной 50 *мм* в *кг* не менее	Диаметр стержня при испытании на гибкость в *мм*
Пергамин (беспокровный битумкартон)	П-350	13	27	10
	П-300	11	25	
	П-250	9	22	
	П-200	7	20	
Толь беспокровный (беспокровный дегтекартон, толь-кожа)	ТК-350	20	30	10
	ТК-300	17	27	
	ТК-250	14	25	
	ТК-200	11	22	

Примечание. В обозначении марок материалов буквы указывают вид материала, цифры—средний вес 1 $м^2$ кровельного картона в граммах.

6—30. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАСТИКИ

Характеристики и марки мастик на нефтяных битумах (по ГОСТ 2889-51) и на каменноугольной смоле (дегтевой основе) (по ГОСТ 3580-51)

Таблица 6—92

Наименование показателей	Марки мастик на нефтебитумах			Марки мастик на дегтевой основе	
	А	Б	В	А	Б
Температура размягчения по методу „кольцо и шар" в град.	60—70	71—80	81 и выше	48—56	56—68

Продолжение табл. 6—92

Наименование показателей	Марки мастик на нефтебитумах			Марки мастик на дегтевой основе	
	А	Б	В	А	Б
Консистенция по пестику Тетмайера при температуре 40° в течение 10 сек. в *мм*	15—25	6—17	0—6	16—27	5—15
Содержание наполнителя в %	10—40	10—50	10—50	10—50	10—50
Содержание воды в % не более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Гранулометрический состав наполнителей:
через сито 1 600 *отв/см²* проходит полностью;
на сите 3 600 *отв/см²* остаток не более 3%;
на сите 6 400 *отв/см²* остаток не более 45%;
на сите 10 000 *отв/см²* остаток не более 75%.

Холодная обмазочная (мастичная) изоляция приготовляется преимущественно из нефтяных битумов. Состав грунтового покрытия: битума — 25—30%, растворителя (бензина и т. п.) — 70—75%.

Масса для изолирующего покрытия: битума — 70—75%, растворителя — 25—30%, наполнителя — 5%.

Изоляционный материал из каменноугольных смол с наполнителем из глинистого ила с песком применяется в следующем соотношении: каменноугольный деготь — 15 *кг*, каменноугольный пек — 25 *кг*, наполнитель — 0,06 $м^3$.

Изоляционный состав укладывается слоем 5 *см*.

Состав изоляции из горячего асфальта

Таблица 6—93

Наименование составных материалов	Состав 1	Состав 2
	частей по весу	
Асфальтовая мастика	55	0
Асфальтовый порошок	0	35
Нефтяной битум	2	5
Гравий или щебень	30	42
Песок	10	14

6—К. ПРОЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

6—31. ХВОРОСТЯНЫЕ И ФАШИННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для берегоукрепительных, выправительных (регуляционных) сооружений применяются:

1) хворост преимущественно из ивовых, а также из разнородных лиственных пород, с толщиной отдельных ветвей не более 4 *см* и длиной не менее 1,5 *м*;

2) фашины однокомельные длиной 2,5—2,75 *м* и толщиной 0,25—0,4 *м* из ветвей тех же размеров, что и в п. 1, уложенных комлями в одну сторону, фашины двухкомельные длиной 4—4,5 *м*, хворостяные канаты, тяжелые фашины, фашинные тюфяки с каменной пригрузкой и др.

6—32. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СЕТКИ ДЛЯ ГАБИОНОВ

Металлические сетки изготовляют из стальной мягкой оцинкованной проволоки толщиной от 0,7 до 4,2 *мм*. Для тяжелых габионов чаще применяют проволоку сечением 2,7—3,9 *мм*.

Сетки изготовляют с ячейками квадратной, ромбической и шестиугольной формы и различных размеров в зависимости от назначения.

Таблица 6—94

Размеры ячеек сеток и толщина проволоки

Род материала	Размер ячеек шестиугольной формы в *мм*	Толщина проволоки в *мм*
Мелкая галька и щебень	50×70 60×80	2,0—2,5 2,0—2,8
Средняя галька и щебень	80×100 100×120	2,5—3,1 2,8—3,4
Крупная галька и камень	120×140 150×180	3,1—3,8 3,4—4,2

6—33. СИЛИКАТ-ГЛЫБА И РАСТВОРИМОЕ СТЕКЛО

Таблица 6—95

Требования к силикат-глыбе (по ГОСТ 917-41)

Химический состав	Виды силикат-глыбы		
	содовая	содово-сульфатная	сульфатная
Кремнезем (SiO_2)	71,5—73,0%	70—72,5%	70—72,5%
Окись натрия (Na_2O)	26—27,5%	25—27,5%	25—27,5%
Окись кальция (CaO) не более	0,4%	0,6%	0,8%
Серный ангидрит (SO_3) не более	0,36%	1,5%	2,0%
Окись железа и окись алюминия ($Fe_2O_3+Al_2O_3$) не более	0,7%	1,2%	1,6—2,0%
Модуль силиката натрия $n=\frac{SiO_2}{Na_2O}$	2,65—3,0	2,63—3,0	2,63—3,0

Для силикатизации грунтов, бетонной и каменной кладки:

1) концентрация жидкого стекла (удельный вес) должна быть при модуле 2,5 не менее 1,45, при модуле 3,0 не менее 1,41;

2) нерастворимых примесей — не более 2%.

Силикат-глыбу хранят на открытом воздухе в условиях, исключающих загрязнение; растворы — в деревянных бочках и стеклянной таре.

Таблица 6—96

Требования к жидкому стеклу (силикату натрия) (по ГОСТ 962-41)

Показатели	Виды жидкого стекла		
	содовое	содово-сульфатное	сульфатное
Плотность в $г/см^3$	1,50—1,55	1,43—1,50	1,43—1,50
Модуль стекла *n*	2,60—3,00	2,56—3,00	2,65—3,00
Химический состав в %:			
а) кремнезем (SiO_2)	32,0—34,5	25—32	28—32
б) окись кальция (CaO)	0,20	0,30	0,35
в) окись натрия (Na_2O)	11—13,5	10—12	10—12
г) серный ангидрит (SO_3) не более	0,18	1,0	1,5
д) окись железа и окись алюминия ($Fe_2O_3+Al_2O_3$) не более	0,25	0,40	0,50
е) воды не более	51	60	60

6—34. ХЛОРИСТЫЙ КАЛЬЦИЙ

Таблица 6—97

Основные требования к хлористому кальцию (ГОСТ 450-41)

Химический состав	1-й сорт	2-й сорт
Хлористый кальций безводный не менее	67%	67%
Хлористый магний не более	0,9%	Не нормируется
Хлористый натрий не более	2,0%	То же
Нерастворимый в воде остаток (прокаленный) не более	0,2%	0,5%

Разновидности технического хлористого кальция: кристаллическая соль с 6 или 4 частями воды, безводный, плавленый и водный раствор.

Содержание $CaCl_2$ в водном растворе должно быть не менее 30%.

Для силикатизации грунтов, бетонов и каменной кладки применяется хлористый кальций удельным весом от 1,21 до 1,30.

Хлористый кальций доставляется в герметических металлических барабанах весом 160 и 180 *кг* нетто.

6—35. ЦЕРЕЗИТ

Церезит применяется для придания водонепроницаемости цементным растворам. Церезит выпускается в виде суспензий, транспортируется в деревянных бочках (по 150—200 *кг*) или металлических банках (по 10—20 *кг*). Смесь товарного церезита с 10 частями воды дает церезитовое молоко, прибавляемое к раствору цемент : песок (1 : 2 и 1 : 3). Пропорция церезитового молока 1 : 10 рассчитана на содержание воды в растворе 18%; для растворов с другой консистенцией на 1 часть церезита следует брать количество воды, указанное в табл. 6—98.

Таблица 6—98

Определение состава церезитового молока в зависимости от цементно-водного отношения (Ц/В)

Ц/В по весу	Воды по отношению к весу сухой смеси цемента с песком в %	Объемный состав церезитового молока (церезит:вода)	Расход церезита на 1 м³ раствора в кг
2,5	10,0	1:5	19
2,0	12,5	1:6	
1,7	15,0	1:7	
1,4	17,5	1:9	
1,3	18,0	1:10	
1,25	20,0	1:12	
1,1	22,5	1:18	

Удельный вес церезита—1,06.

Таблица 6—99

Расход церезита на 1 м² поверхности гидроизоляционного слоя

Толщина гидроизоляционного слоя в см	Расход церезита в кг
2	0,5
3	0,75
4	1,0

Расход цемента и церезитового молока на 1 м³ растворов разного состава (по данным завода «Церезит») приведен в табл. 6—100 и 6—101.

Таблица 6—100

Расход цемента и песка

Состав раствора (цемент:песок)	Расход цемента в кг				Расход песка в м³			
	на 1 м³ раствора	на 1 м² при толщине изоляционного слоя в мм			на 1 м³ раствора	на 1 м² при толщине изоляционного слоя в мм		
		20	30	40		20	30	40
1:1	1 083	21,66	32,49	43,22	0,77	0,0154	0,0231	0,0308
1:2	732	14,64	21,96	29,28	1,09	0,0208	0,0312	0,0416
1:3	497	9,94	14,91	19,98	1,06	0,0212	0,0318	0,0424

Таблица 6—101

Расход церезитового молока

Состав раствора (цемент:песок)	Расход церезитового молока в кг							
	для раствора с влажностью 9% при составе церезитового молока 1:5				для раствора с влажностью 18% при составе церезитового молока 1:10			
	на 1 м³ раствора	на 1 м² при толщине изоляционного слоя в мм			на 1 м³ раствора	на 1 м² при толщине изоляционного слоя в мм		
		20	30	40		20	30	40
1:1	155	3,1	4,65	6,2	305	6,1	9,14	12,18
1:2	125	2,5	3,75	5,0	245	4,9	7,35	9
1:3	100	2,0	3	4	195	3,9	5,85	7,8

ЛИТЕРАТУРА

1. Временные технические условия на водонепроницаемые расширяющиеся цементы, методы физических и механических испытаний их и инструкции по применению этих цементов (ТУ 66-50; ТУ 68-50; ТУ 69-50; ТУ 70-50; И 145-50 и И 146-50).

2. Гришин М. М., проф., Гидротехнические сооружения, ч. II, Госстройиздат, 1949.

3. Инструкция по силикатизации грунтов, МСПТИ, 1952.

4. Инструкция по цементации и силикатизации бетонных и каменных кладок гидротехнических сооружений, Стройвоенмориздат, 1947.

5. Кирпичные гидротехнические сооружения, ТУ и НП МЭС, 1947.

6. Ковельман И. А., Специальные строительные материалы, Краткий справочник, Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.

7. Москвин В. М., Коррозия бетона, Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.

8. Производство работ по устройству асфальтовых гидроизоляций гидротехнических сооружений, ТУ 8 115-49, МЭС, 1950.

9. Скрамтаев Б. Г., Попов Н. А., Герливанов Н. А. и Мудров Г. Г., Строительные материалы, Промстройиздат, 1952.

10. Справочник машиностроителя, т. 2, Машгиз, 1952.

11. Справочник архитектора, т. IX. Строительные материалы, Издательство Академии архитектуры, 1950.

12. Технические условия на производство и приемку общестроительных и специальных работ. Общестроительные работы, Стройиздат, 1948.

13. Технические условия на цементацию трещиноватых скальных пород и гравелистых грунтов, Машстройиздат, 1950.

14. Трубопроводы напорные стальные для гидроэлектротехнических станций, ТУ и НП МЭС, Госэнергоиздат, 1952.

15. Технические условия на производство гидротехнических работ. Глинизация оснований, Госэнергоиздат, 1942.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОБЩИЕ НОРМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

7—1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО КАПИТАЛЬНОСТИ [7]

Классификация распространяется на проектирование вновь возводимых и реконструируемых гидротехнических сооружений.

Объекты гидротехнического строительства подразделяются на категории согласно табл. 7—1.

Таблица 7—1

Показатели для установления категории объектов гидротехнического строительства

Категория объекта строительства	Гидроэлектрические станции	Мелиоративные системы		Внутренние водные пути	Речные порты	
	мощность станции в тыс. *квт*	характер мелиорации	площадь мелиорируемых земель в тыс. *га*	категория внутренних водных путей	среднесуточный грузооборот в тыс. *т*	среднесуточный пассажирооборот в чел.-днях
I	Более 250	Орошение или осушение	Более 250	Сверхмагистральные	Более 10	Более 2 000
II	От 250 до 50	а) Орошение или осушение б) Обводнение в) Обвалование	От 250 до 75 Более 500 „ 250	Магистральные	От 10 до 3	От 2 000 до 500
III	От 50 до 2	а) Орошение или осушение б) Обводнение в) Обвалование	От 75 до 25 „ 500 „ 100 „ 250 „ 75	Местного значения	От 3 до 0,5	От 500 до 200
IV	От 2 до 0,2	а) Орошение или осушение б) Обводнение в) Обвалование	25 и менее 100 „ „ 75 „ „	Местного значения—малые реки	0,5 и менее	200 и менее

Отдельные постоянные гидротехнические сооружения относятся к основным или второстепенным согласно табл. 7—2.

Примечания. 1. К постоянным гидротехническим сооружениям относятся сооружения, используемые при эксплуатации объекта.

2. К временным гидротехническим сооружениям относятся сооружения, используемые в период строительства объекта или ремонта отдельных его сооружений: перемычки, строительные водосбросы и водоводы (туннели, каналы и пр.), временные шлюзы, насосные станции и др.

Таблица 7—2

Основные и второстепенные сооружения объектов гидротехнического строительства

Наименование сооружений по их значению в объекте	Объекты гидротехнического строительства			
	гидроэлектрические станции	мелиоративные системы	внутренние водные пути	речные порты
Основные	Сооружения, прекращение работы которых в случае ремонта или аварии влечет за собой значительное уменьшение мощности гидроэлектростанции или же полную остановку ее, а именно:	Сооружения, прекращение работы которых в случае ремонта или аварии влечет за собой прекращение или значительное и длительное уменьшение подачи воды в оросительные или обводнительные системы, подтопление осушаемой и затопление обваловываемой территории, а именно:	Сооружения, прекращение работы которых в случае ремонта или аварии влечет за собой прекращение или значительное сокращение судоходства или лесосплава, а именно:	Сооружения, прекращение работы которых в случае ремонта или аварии влечет за собой прекращение или значительное сокращение деятельности речного порта, а именно:
	а) головные узлы — плотины, водосбросы, водоприемники и т. п.	а) головные узлы — плотины, насосные станции, водоприемники, водосбросы и т. п.	а) судоходные каналы, заградительные ворота	а) пассажирские причалы

Продолжение табл. 7—2

Наименование сооружений по их значению в объекте	Объекты гидротехнического строительства			
	гидроэлектрические станции	мелиоративные системы	внутренние водные пути	речные порты
Основные	б) деривация—каналы, мосты-водоводы, дюкеры, туннели, трубопроводы и т. п.	б) магистральные (главные) каналы и сооружения на них	б) шлюзы, подходные каналы к шлюзам, затворы, системы наполнения, противоаварийные устройства	б) механизированные грузовые причалы, служащие для переработки грузооборота по основным грузам порта; крановые опоры; сооружения при наличии на них подъемных транспортных механизмов
	в) станционные узлы—напорные бассейны, водосбросы, уравнительные резервуары, турбинные трубопроводы, здания ГЭС, отводящие каналы, тунели и т. п.	в) межхозяйственные оросительные, обводнительные и осушительные каналы и сооружения на них	в) плотины, дамбы; судоходные разборные плотины, водоводы, водоприемники, водосбросы, водоспуски	в) оградительные и ледозащитные сооружения, обеспечивающие безаварийную работу основных сооружений, а также отстой флота
		г) оградительные дамбы или валы и сооружения на них	г) навигационная обстановка	г) навигационная обстановка
Второстепенные	Сооружения и их отдельные части, прекращение работы которых не влечет за собой последствий, указанных для основных сооружений (табл. 7—2)			
	Подпорные стенки, не участвующие в создании подпорного фронта, ледозащитные стенки, струенаправляющие и раздельные дамбы, служебные мостики, не несущие нагрузок от подъемных механизмов затворов; ремонтные затворы, берегоукрепительные сооружения, отстойники мелиоративных систем и т. д.		Подпорные стенки, не участвующие в создании подпорного фронта; направляющие устройства (палы), отбойные и причальные приспособления; служебные мостики, не несущие нагрузок от подъемных механизмов. ремонтные заграждения, берегоукрепления каналов и т. д.	Механизированные грузовые причалы, служащие для переработки грузооборота по неосновным грузам порта, оградительные и ледозащитные сооружения второстепенного значения, берегоукрепительные сооружения, отбойные палы и рымы; прочие конструкции, не несущие нагрузок от подъемных и транспортных механизмов, и т. д.

Речные гидротехнические сооружения по капитальности разделяются на пять классов согласно табл. 7—3.

Таблица 7—3

Классификация по капитальности

Класс сооружений	Характеристика сооружений
I	Постоянные сооружения, удовлетворяющие повышенным требованиям
II	Постоянные сооружения, удовлетворяющие средним требованиям
III	Постоянные сооружения, удовлетворяющие требованиям ниже средних
IV	Постоянные сооружения, удовлетворяющие минимальным требованиям
V	Временные сооружения

Примечание. В соответствии с указаниями, приведенными ниже, временные сооружения могут быть отнесены также к III и IV классам.

Класс капитальности постоянных и временных гидротехнических сооружений в зависимости от категорийности объектов, в которые они входят, назначается согласно табл. 7—4 и 7—5.

Таблица 7—4

Классы постоянных гидротехнических сооружений

Категория объекта гидротехнического строительства	Класс основных сооружений объекта	Класс второстепенных сооружений объекта
I	I	III
II	II	III
III	III	IV
IV	IV	IV

Таблица 7—5

Классы временных гидротехнических сооружений

Категория объекта гидротехнического строительства	Класс временных гидротехнических сооружений
I	IV
II	IV
III	V
IV	V

Класс отдельных постоянных гидротехнических сооружений комплексного гидроузла, обеспечивающего одновременно работу нескольких объектов различных категорий, должен устанавливаться по табл. 7—4 в следующем порядке:

а) для отдельных сооружений, обеспечивающих действие гидроузла в целом, исходя из высшей категории народнохозяйственных объектов, обслуживаемых гидроузлом;

б) для отдельных сооружений, обеспечивающих действие только одного объекта, исходя из категории этого объекта.

Классы капитальности гидротехнических сооружений характеризуются следующими требованиями:

а) в отношении строительных материалов—видом материала, качеством или маркой материалов, а также конструктивными защитными мероприятиями для сохранения неизменяемости свойств материалов в условиях эксплуатации сооружений (защита от разрушающего воздействия климатических факторов, воды, химической и биологической агрессии);

б) в отношении прочности и устойчивости сооружений—запасами прочности и устойчивости сооружения;

в) в отношении надежности сооружений против разрушающего воздействия паводковых и высоких вод—величиной расчетной обеспеченности наибольших расходов и уровней, а также величиной возвышения гребня плотин и дамб, берм каналов и других незатопляемых площадок над наивысшим эксплуатационным уровнем воды;

г) в отношении надежности и удобств эксплуатации сооружений—размерами отдельных элементов сооружений, установкой специального оборудования и т. п.

Примечание. Отдельные требования, предъявляемые к гидротехническим сооружениям различных классов в отношении строительных материалов, прочности и устойчивости сооружений, а также отдельные требования в отношении надежности против разрушающего воздействия паводков и высоких вод, надежности и удобства эксплуатации, приведены в соответствующих главах справочника.

Допускается при наличии достаточных обоснований предъявлять к постоянным сооружениям повышенные требования в следующих случаях:

а) если авария основного сооружения объектов II, III и IV категорий влечет за собой последствия катастрофического характера для населенных пунктов и предприятий, расположенных ниже гидроузла, в состав которого входит данное основное сооружение, или может причинить значительный ущерб народному хозяйству.

б) при проектировании особо крупных плотин, шлюзов и других подпорных сооружений, работающих под большим напором, а также сложных или мало изученных конструкций основных сооружений объектов II и III категорий;

в) при проектировании основных и второстепенных сооружений в неблагоприятных геологических или гидрогеологических условиях, например, при наличии слабых или химически неустойчивых грунтов, а также оползневых явлений.

Повышенные требования к постоянным сооружениям должны быть предъявлены либо ко всему комплексу требований (см. выше), либо только по части из них.

При необходимости повышения всего комплекса требований класс сооружений должен быть повышен на единицу против указанного в табл. 7—4. При необходимости повышения только части требований (одного или нескольких) класс сооружения не повышается, а повышаются лишь соответствующие требования применительно к требованиям, характеризующим классы сооружений, повышенные на единицу против указанных в табл. 7—4.

Допускается при наличии достаточных обоснований предъявлять к временным сооружениям повышенные требования и класс сооружения повышать на единицу против указанного в табл. 7—5 в следующих случаях:

а) если авария временного сооружения может вызвать последствия катастрофического характера для населенных пунктов и предприятий, расположенных ниже временного сооружения;

б) если авария временного сооружения может вызвать серьезные повреждения или значительную задержку возведения постоянных сооружений объектов I и II категорий.

Допускается к основным сооружениям объектов I категории, имеющим особо важное народнохозяйственное значение, предъявлять повышенные требования с составлением в каждом отдельном случае специальных норм и технических условий.

К основным сооружениям объектов I, II и III категорий надлежит предъявлять пониженные требования и класс сооружений понижать на единицу против указанного в табл. 7—4 в случаях, если:

а) выработка энергии в год составляет для гидроэлектростанций I категории менее 1 млрд. *квт-ч*, для гидроэлектростанций II категории—менее 200 млн. *квт-ч*; для гидроэлектростанций III категории—менее 8 млн. *квт-ч*;

б) сооружение расположено на вполне надежном основании и имеет относительно небольшие размеры и простые конструкции при малых напорах;

в) сооружение работает с длительными перерывами или позволяет производить его ремонт без нарушения работы гидроузла;

г) срок службы сооружения заранее ограничен и составляет не более 10 лет и это сооружение в период эксплуатации гидроузла будет заменено другим.

Примечание. Допускается в этих же случаях второстепенные сооружения объектов II категории относить к IV классу, если основные сооружения будут отнесены к III классу.

Допускается к временным сооружениям IV класса предъявлять пониженные требования и относить их к V классу в случаях, если:

а) геологические и гидрогеологические условия хорошо изучены и обеспечивают безаварийность временного сооружения при обеспечении сроков строительства объекта;

б) временные сооружения предназначены для строительства и ремонта второстепенных сооружений или на время ремонта основных сооружений, имеющих относительно небольшие размеры и простые конструкции, и если повреждения временных сооружений не вызывают нарушения работы основного сооружения.

7—2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ СИЛЫ И НАГРУЗКИ

1. Нагрузки, воздействия и их сочетания [7]

Нагрузки и воздействия при расчете гидротехнических сооружений должны приниматься в следующих сочетаниях.

А. Основные сочетания образуются из: а) нагрузок от собственного веса сооружения и находящихся на нем постоянных устройств; б) статического и динамического давления воды при нормальном подпорном уровне и пропуске нормальных расчетных паводков; в) давления волны; г) давления фильтрационных вод при установившемся или регулярно повторяющемся неустановившемся режиме фильтрации; д) давления льда; е) давления грунта с учетом нагрузок, расположенных на его поверхности; ж) давления наносов при заилении водохранилища; з) снеговой нагрузки; и) тяговых усилий, создаваемых подъемными и транспортными механизмами; к) нагрузки от судов.

Примечание. Снеговая нагрузка и давление льда в зависимости от характера сооружения и условий его работы при наличии специального обоснования могут быть отнесены к дополнительным сочетаниям нагрузок и воздействий.

Б. Дополнительные сочетания образуются из воздействий и нагрузок, входящих в основные сочетания, а также из: л) давления фильтрационных вод, возникающего в результате нарушения нормальной работы дренажных устройств (учитывается взамен подпункта «г»); м) давления ветра; н) температурных и усадочных воздействий в бетонных и железобетонных конструкциях; о) сил, действующих во время постройки, испытаний и ремонта сооружений.

Примечание. Давление ветра в зависимости от характера сооружения и условий его работы при наличии специального обоснования может быть отнесено также к основным сочетаниям нагрузок и воздействий.

В. Особые сочетания образуются из воздействий и нагрузок, указанных в подпунктах «а»—«о», а также: п) сейсмических воздействий; р) давления воды при пропуске наибольших расходов воды в чрезвычайных условиях эксплуатации (учитывается взамен подпункта «б»); с) давления льда при ледоходе катастрофической силы (учитывается взамен подпункта «д»).

Примечания. 1. К особым сочетаниям нагрузок и воздействий может быть отнесено при наличии специального требования давление воды в случае возможности разрушения вышерасположенных или нижерасположенных сооружений или силы, возникающие при разрушении части сооружения.

2. Расчетные сочетания нагрузок и воздействий для различных гидротехнических сооружений должны быть установлены в соответствии с физической возможностью одновременного их действия на сооружения.

2. Собственный вес сооружения

Собственный вес сооружения определяется на основании размеров, взятых из проектных чертежей, или предварительно — по эмпирическим формулам.

3. Гидростатическое и гидродинамическое давление воды

Гидростатическое и гидродинамическое давление воды определяется по формулам гидравлики при объемном весе воды $\gamma = 1\,000$ *кг/м*³.

Гидродинамическое давление воды на плоскость сооружения или его элемента в общем случае равно:

$$W_д = K\gamma \frac{Q}{g} v\,(1-\cos\alpha), \qquad (7—1)$$

где Q — расход воды;

v — скорость ее движения;

α — угол, составляемый направлением струи с плоскостью, воспринимающей удар струи;

K — коэффициент обтекания;

g — ускорение силы тяжести.

При $\alpha = 90°$

$$W_д = K\gamma \frac{Q}{g} v = 2K\,\gamma\omega \frac{v^2}{2g}. \qquad (7—2)$$

Здесь ω — площадь сечения струи.

4. Волновое давление воды [9]

а) Общие соображения. Определение расчетных размеров волны (высоты, длины) производится либо на основании наблюдений в натуре, либо по эмпирическим формулам. При наблюдениях в натуре необходимо вести многократные измерения в течение длительного периода; при этом должны быть построены кривые обеспеченности высоты волны.

При пользовании эмпирическими формулами (см. ниже) следует учитывать, что они имеют преимущественно местный характер; следует также иметь в виду, что ветровой режим над поверхностью водохранилища резко изменяется по сравнению с ветровым режимом над поверхностью суши; поэтому скорости ветра, входящие в эмпирические формулы (для определения вы-

соты волны) и полученные из наблюдений материковых метеорологических станций, должны быть увеличены (подробности см. [1]); могут измениться и направления ветров.

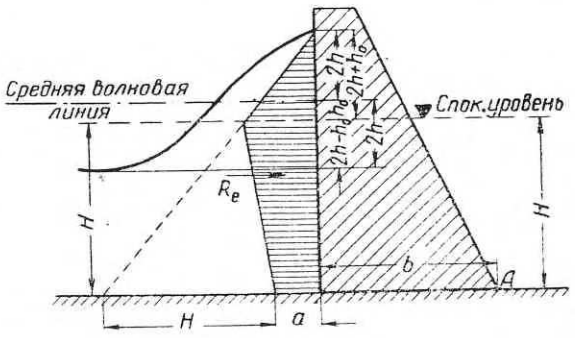
в) Волны зыби и интерферированные стоячие волны могут иметь место при $H > H_{кр}$, где H — глубина воды

Таблица 7—6

Значения $H_{кр}$

Характер дна водоема перед сооружением	$H_{кр}$
Ровное и пологое дно	3 h
Дно с повышенной шероховатостью (каменная наброска, глыбы камня и пр.) . . .	4 h
Дно озер и водохранилищ	2 h

Примечание. $2h$ — высота волны зыби в метрах.



Фиг. 7—1

перед сооружением в спокойном состоянии в *м*; $H_{кр}$ — критическая глубина (на которой волна разбивается) в *м*. Приближенные величины $H_{кр}$ берутся из табл. 7—6.

в) Определение волновых воздействий на сооружения с вертикальной лицевой гранью или лицевой гранью с уклоном круче 1 : 1. При глубине воды перед сооружением с вертикальной стенкой больше критической ($H > H_{кр}$) и при протяженности стенки по фронту более L (длины полуволны), когда перед стенкой возникает интерферированная стоячая волна, волновое воздействие определяется следующими зависимостями.

Эпюра избыточного давления на стенку при подходе гребня волны к стенке показана на фиг. 7—1.

Полное боковое избыточное давление (сверх гидростатического), действующее на 1 *пог. м* стенки со стороны воздействия волны, определяется в тоннах:

$$R_e = \gamma \left[\frac{(H + h_0 + 2h)(H + a)}{2} - \frac{H^2}{2} \right], \qquad (7—3)$$

где

$$h_0 = \frac{4\pi h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L};$$

$$a = \frac{2h}{\operatorname{ch} \frac{\pi H}{L}}.$$

Опрокидывающий момент этого давления относительно точки A основания (на 1 *пог. м* в *тм*):

$$M_e = \gamma \left[\frac{(H + h_0 + 2h)^2 (H + a)}{6} - \frac{H^3}{6} \right]. \qquad (7—4)$$

В формулах (7—3) и (7—4):

a — величина избыточного (сверх гидростатического) давления волны у подошвы стенки в *м*;

h_0 — возвышение средней волновой линии (т. е. линии, делящей высоту волны пополам) над спокойным уровнем воды в *м*;

$2L$ — длина волны зыби и интерферированной (стоячей) волны в *м*;

γ — объемный вес воды в *т/м³* ($\gamma = 1$).

Величины элементов волны — высоту $2h$ и длину $2L$ в метрах — допускается определять по приближенным эмпирическим формулам табл. 7—7, где $L_{раз}$ — разгон волны в километрах до противоположного берега по направлению ветра.

Таблица 7—7

Длина разгона волны в *км*	Формула для определения высоты волны
$L_{раз} < 60$	$2h = 0{,}34 \sqrt[4]{L_{раз}} - 0{,}76 - 0{,}26 \sqrt[4]{L_{раз}}$, (7—5)
$3 < L_{раз} < 30$	$2h = 0{,}0208\, w^{5/4} \sqrt[3]{L_{раз}}$ (7—6) (формула Андреянова)

В формуле (7—6) w — скорость ветра в *м/сек*.

Отношение длины волны к ее высоте $\frac{2L}{2h}$ для наибольших высот волн озер и водохранилищ колеблется в пределах от 8 до 12.

Примечание. Необходимо иметь в виду возможные изменения высоты волны в зависимости от местных условий: поворота и сужения водоемов, изменения их глубины и пр.

г) Высота вскатывания волны на откос ($h_в$) в метрах определяется по формуле Н. Н. Джунковского:

$$h_в = 3{,}2K(2h) \operatorname{tg} \alpha, \qquad (7—7)$$

где K — коэффициент, зависящий от степени шероховатости откоса: 1) для гладкой поверхности (бетонные стенки или плиты; земляные плотины с мощеным передним откосом) — $K = 1$; 2) для шероховатой поверхности (каменная наброска из крупного рваного камня или из массивов) — $K = 0{,}77$;

α — угол, образуемый откосом с горизонтом;

$2h$ — высота волны зыби в *м*.

Формула справедлива для α от 14° до 45°.

ГОСТ 3255-46 [9] перерабатывается. О волновых нагрузках см. также Ляхницкий В. Е. и др. Портовые гидротехнические сооружения, Водтрансиздат, 1953.

5. Давление фильтрационного потока [18]

а) Скальное основание. Давление фильтрационного потока на подошву плотины или другого напорного сооружения (противодавление), возведенного на скальном основании, в случае отсутствия дренажа или при ненадежности последнего учитывается по трапецоидальной эпюре (фиг. 7—2) на 1 *пог. м* длины сооружения:

$$P_ф = \alpha \frac{H_1 + H_2}{2} b. \qquad (7—8)$$

Во временных ТУ и Н проектирования и возведения гравитационных плотин 1933 г. рекомендуются следующие значения α.

Таблица 7—8

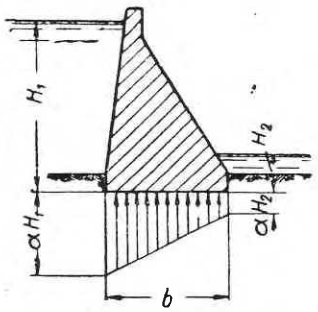
Значения коэффициента α

Характер основания	Высота плотины H в м		
	$H<25$	$25<H<50$	$H>50$
Скала однородная водонепроницаемая . . .	1/3	1/3—1/2	1/2—2/3
Скала с незначительными недостатками .	1/3—1/2	2/3—3/4	3/4—1
Скала сильно трещиноватая, усиленно цементируемая	3/4—1	3/4—1	—

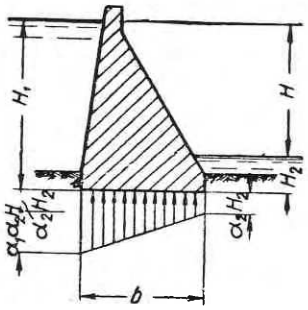
Приведенные в табл. 7—8 значения для коэффициента α считаются в настоящее время преувеличенными.

М. М. Гришин рекомендует определять фильтрационное давление на подошву плотин дифференцированным путем, учитывая отдельно влияние наличия цементации, дренажа и зуба введением коэффициента α_1 и отдельно — влияние трещиноватости скалы, неплотности в контакте кладки с ней и т. д. введением коэффициента α_2 (фиг. 7—3):

$$P_ф = \left(\frac{\alpha_1 Hb}{2} + H_2 b\right)\alpha_2 = \frac{1}{2}\alpha_2 b\,(\alpha_1 H + 2H_2). \qquad (7-9)$$



Фиг. 7—2



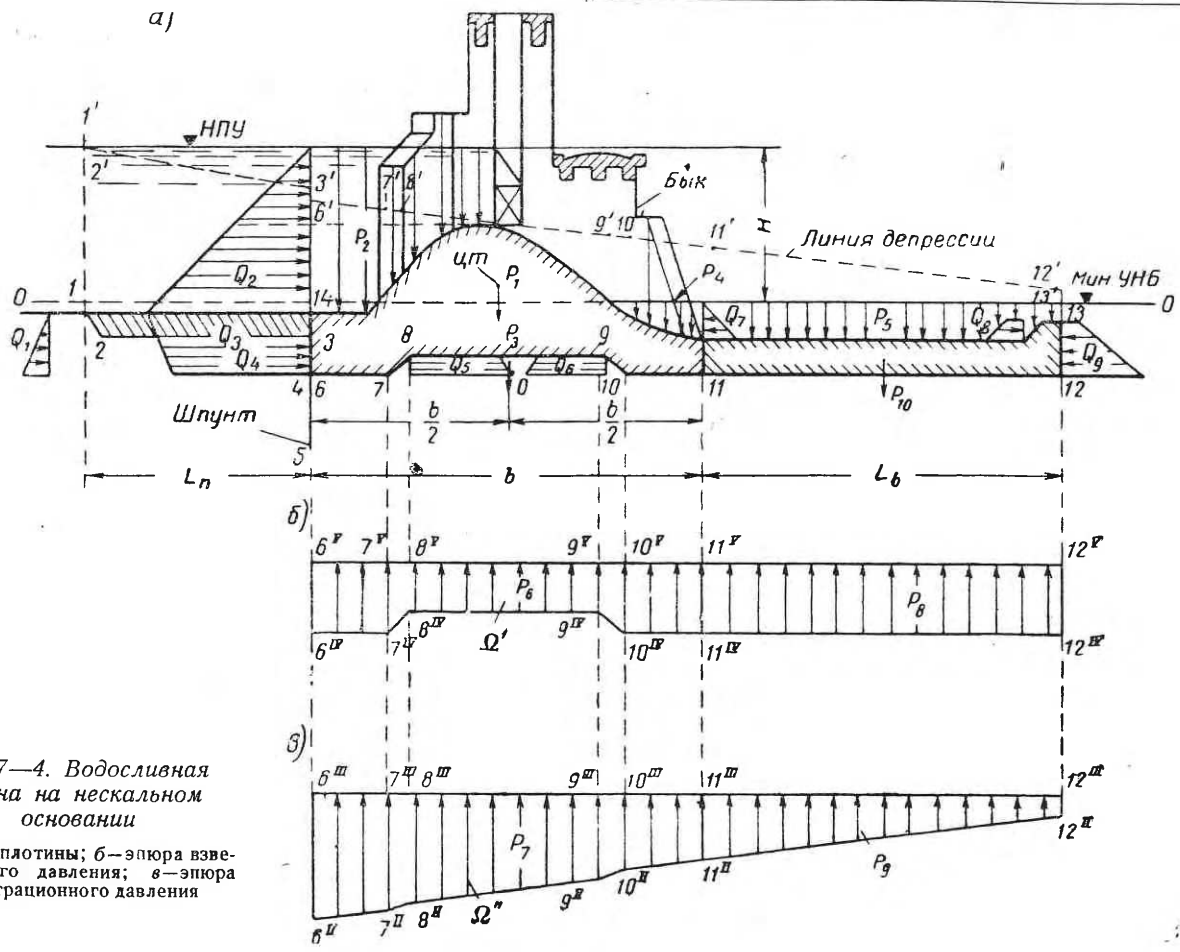
Фиг. 7—3

В зависимости от качества шва у подошвы плотины и качества скалы рекомендуется принимать $\alpha_2 = 0{,}7 \div 0{,}9$, а значение коэффициента α_1 при наличии зуба и цементации брать из табл. 7—9.

Таблица 7—9

Значения коэффициента α_1

Качество скалы основания	Значение коэффициента α_1
Скала однородная водонепроницаемая	0,1—0,35
Скала с незначительными недостатками	0,2—0,5
Скала сильно трещиноватая . . .	0,4—0,7



Фиг. 7—4. Водосливная плотина на нескальном основании

а—схема плотины; *б*—эпюра взвешивающего давления; *в*—эпюра фильтрационного давления

б) Нескальное основание. Схема определения фильтрационного давления приводится на примере водосливной плотины на нескальном основании. Эпюры действующих на нее вертикальных и горизонтальных сил даны на фиг. 7—4. На схеме одним из методов, приведенных в гл. 18, построена пунктиром линия $1'2'3'6'7'8'9'10'11'12'13'$ фильтрационного давления (пьезометрическая линия).

Вертикальные силы. Взвешивающее давление (на 1 *пог. м* плотины) P_6 на подошву водослива равно (фиг. 7—4) площади эпюры $\Omega'=6^{IV}-11^{IV}-11^{IV}-6^{V}$ в квадратных метрах, умноженной на γ — объемный вес воды в $т/м^3$. Ординаты эпюры Ω' определяются как глубины соответствующих точек подземного контура (т. е. подошвы) водослива, считаемые от линии *0—0* — линии расчетного уровня нижнего бьефа. Фильтрационное давление P_7 равно площади эпюры $\Omega''=6^{II}-11^{II}-11^{III}-6^{III}$, умноженной на γ. Ордината эпюры Ω'' определяется как расстояние от расчетного уровня нижнего бьефа (линия *0—0*) до пьезометрической линии, взятое в метрах, на вертикали, проведенной через рассматриваемую точку водонепроницаемого контура.

Полное давление фильтрационного потока на подошву плотины равняется сумме сил $P_ф=P_6+P_7$, а полная интенсивность давления (давление на 1 $м^2$ подошвы в тоннах) равна для любой точки подземного контура сумме соответствующих ординат обеих эпюр, взятых в метрах.

Взвешивающее P_8 и фильтрационное P_9 давление на водобой определяется аналогичным способом. В приведенных выше соображениях предполагается, что дренаж под сооружением заилился и не работает.

При нормальной работе дренажа под сооружением эпюра фильтрационного давления на подошву сооружения будет меньше в зависимости от положения дренажа; взвешивающее же давление воды от дренажа не зависит.

Горизонтальные силы. Горизонтальное давление фильтрационного потока Q_3, действующее на часть грани переднего зуба *3—14*, и давление того же потока Q_4, действующее на часть грани *3—4* (фиг. 7—4), определяются на основании соображений, приведенных выше при определении ординат взвешивающего и фильтрационного давления.

В частности, полное горизонтальное фильтрационное давление в $т/м^2$ в точке 7 равно по абсолютной величине полному вертикальному (взвешивающему и фильтрационному) давлению в этой же точке, т. е. равно сумме ординат $7^{II}-7^{III}-7^{IV}-7^{V}$ в метрах. Силы Q_3 и Q_4, а также сила Q_9 (горизонтальное давление фильтрационного потока на пяту водобоя) определяются аналогично.

6. Давление льда [10]

а) Общие указания. Воздействия ледяного покрова на гидротехнические сооружения могут быть разделены на следующие: динамическое давление при ударе свободно плавающих льдин; статическое давление ледяного поля на сооружение под влиянием ветра или течения и при термическом расширении сплошного ледяного покрова; истирающее воздействие при движении льда вдоль поверхности его соприкосновения с сооружением; вертикальные (поднимающие, выдергивающие) воздействия при колебании уровня воды под льдом, примерзшим к сооружению.

Если уровень воды колеблется и ледяной покров постоянно взламывается или если при проектировании сооружения предусмотрены специальные меры (нагнетание сжатого воздуха, постоянная околка льда и т. п.) по борьбе с теми или иными воздействиями льда, то последние могут не учитываться при отсутствии в задании на проектирование сооружения особых указаний.

Излагаемые ниже методы определения ледовых нагрузок распространяются на сооружения всех классов (при отсутствии нагромождений льда, заторов и т. п.), причем для сооружений I класса полученные величины ледовых нагрузок должны быть проверены наблюдениями в натуре и опытами на моделях.

б) Динамическое давление на сооружение ($P_д$) в тоннах при ударе плавающих льдин, перемещаемых ветром или течением по свободной воде, определяется по следующим формулам П. А. Кузнецова:

1) при направлении движения льдин, близком к нормали к фронту сооружения (угол между фронтом сооружения и направлением движения льдин $\varphi=80^\circ \div 90^\circ$)

$$P_д=Kv\delta\sqrt{lb}; \qquad (7—10)$$

2) при направлении движения льдин под углом $\varphi < 80^\circ$ к фронту сооружения

$$P_д=cv\delta^2\sqrt{\frac{lb}{\mu lb+\lambda\delta^2}}, \qquad (7—11)$$

где v — скорость движения льдин в *м/сек*, зависящая от скорости течения и скорости ветра;

δ — толщина льда в *м*, принимаемая в зависимости от условий таяния его равной 60—80% от наибольшей из наблюденных для данной местности за многолетний период;

l и b — длина (по направлению движения) и ширина (по направлению, перпендикулярному к движению) льдин в *м*, принимаемые в зависимости от местных условий;

K, c и λ — коэффициенты, принимаемые по табл. 7—10, причем K и c — в *сек* $т/м^3$;

μ — отношение тригонометрических функций угла $\varphi\left[\frac{\cos^2\varphi}{\operatorname{tg}^2\varphi}\right]$, принимаемое по табл. 7—11.

Таблица 7—10

Значения коэффициентов K, c, λ

Для пресноводного льда	Значения коэффициентов K	c (в *сек* $т/м^3$)	λ
На уровне начальной стадии ледохода при коротком периоде потепления ($\sigma_{сж}=200$ $т/м^2$) .	6	136	500
На наивысшем уровне ледохода или на уровне начальной стадии ледохода при длительном таянии ($\sigma_{сж}=100$ $т/м^2$) . .	4,3	136	1 000

Таблица 7—11

Значения μ

Величина угла φ в град.	20	30	45	55	60	65	70	75	80
Соответствующее значение $\mu=\frac{\cos^2\varphi}{\operatorname{tg}^2\varphi}$	6,7	2,25	0,5	0,16	0,08	0,04	0,009	0,005	0,001

Примечание. Если грань сооружения, воспринимающая удар льдины, наклонена к горизонту под углом $\alpha<80°$, то нормальное к ней давление $P_\alpha = P_д \sin\alpha$, а горизонтальная составляющая его $P_{\alpha_0} = P_д \sin^2\alpha$.

в) Давление ($P_н$) в тоннах, воспринимаемое сооружением от навала ледяного поля вследствие ветра или течения, определяется по формулам:

1) при длине ледяного поля по направлению его движения $L<1\,200$ *м*

$$P_н = pB = \left(0{,}3 + \frac{L}{1\,000}\right) v^2 B; \qquad (7—12)$$

2) при длине ледяного поля по направлению его движения $L>1\,200$ *м*

$$P_н = pB = \left(3 - \frac{1\,800}{L}\right) v^2 B, \qquad (7—13)$$

где p — давление ледяного поля, приходящееся на 1 *пог. м* его ширины, в *т*;

B — ширина ледяного поля в направлении, перпендикулярном его движению, в *м*;

v — средняя скорость течения под льдом в *м/сек*.

При отсутствии течения принимают ветровой нагон при $v=1$ *м/сек*.

г) Статическое давление ледяного покрова вследствие его термического расширения ($P_т$) в т/пог. м определяется:

1) при протяженности $L_п$ ледяного покрова между сооружением и противоположным ему упором покрова (по нормали к сооружению) менее 50 *м*

$$P_т = 0{,}9\,\delta\,(t_0+1)\sqrt[3]{\frac{t_0}{s}(t_0+1)^2}, \qquad (7—14)$$

где δ — толщина льда в *м*, принимаемая наибольшей из наблюденных за многолетний период;

t_0 — наибольшее возможное непрерывное повышение температуры ледяного покрова в градусах в течение s часов, принимаемое равным $0{,}35t$, где t — повышение температуры воздуха за этот же период времени;

s — наиневыгоднейшая длительность непрерывного повышения температуры воздуха в часах; при отсутствии метеорологических данных о величине s следует принимать $\frac{t_0}{s} = \frac{6}{t}$;

2) при протяженности $L_п$ ледяного покрова от 50 до 150 *м* — по табл. 7—12, в которой даны величины давлений льда ($P_т$) в условиях наиболее тяжелых температурных изменений.

Таблица 7—12

Толщина ледяного покрова δ в *м*	Статическое давление ($P_т$) ледяного покрова в *т/пог. м* вследствие его термического расширения			
	$L_п=150$ *м* и более	$L_п=100$ *м*	$L_п=75$ *м*	$L_п=50$ *м*
1,5	28	39	47	55
1,2	20	25	30	36
1,0	15	19	23	27
0,7	10	13	17	20
0,5	7	8	10	13

Примечание. Величина давления на сооружение не должна приниматься большей, чем $P=\sigma_{сж}\delta B_0$, где $\sigma_{сж}$ — предел прочности льда на сжатие, B_0 — ширина фронта непосредственного соприкосновения льда с сооружением.

д) Истирающее воздействие льда. Применяются специальные одежды, либо устойчивые против истирания льдом, либо позволяющие легко заменять истертую одежду.

е) Вертикальное усилие ($P_в$) в тоннах, передаваемое отдельно стоящим сваям и свайным кустам, примерзшим к ним ледяным покровом при повышении уровня воды под ним, определяется по формуле П. А. Кузнецова:

$$P_в = \frac{300\,\delta^2}{\ln\frac{50\,\delta}{d}}, \qquad (7—15)$$

где δ — толщина ледяного покрова в *м*;

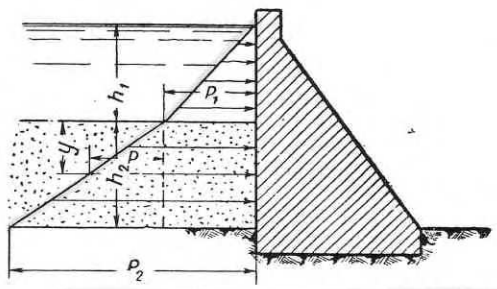
d — диаметр сваи или опоры в *м*; при прямоугольной форме опоры со сторонами a и b величина d принимается равной $\sqrt{ab}$.

Примечания. 1. Нормы, определяющие давление льда, пересматриваются в сторону их снижения.

2. При наличии соответствующих наблюдений, необходимо пользоваться их результатами для определения величины давления льда.

7. Давление наносов

а) Крупнозернистые наносы (песчаные и песчано-гравелистые). Давление таких наносов определяется по обычным формулам давления сыпучих тел с учетом взвешивания частиц водой.



Фиг. 7—5. Эпюра полного давления воды и наносов

б) Мелкие наносы (мельчайшие частицы ила и глины, коллоидальные частицы).

Этот вид наносных отложений представляет собой массу, по механическим свойствам приближающуюся к

жидкости. Угол внутреннего трения $\varphi_н$ близок к нулю, объемный вес $\gamma_н$ принимается равным приблизительно 1,3—1,4. $т/м^3$.

Интенсивность давления наносов на глубине y от поверхности наносов при вертикальной напорной грани сооружения равна (фиг. 7—5):

$$p = \gamma_н y \operatorname{tg}^2\left(45° - \frac{\varphi_н}{2}\right), \qquad (7—16)$$

где $\varphi_н$ — угол внутреннего трения наносов.

Для предельного состояния (при $\varphi_н = 0$) предельная максимальная интенсивность давления равна:

$$q_{max} = \gamma_н y. \qquad (7—17)$$

Эпюра полного давления воды и наносов имеет вид трапеции (фиг. 7—5) с верхним основанием, равным:

$$p_1 = \gamma h_1, \qquad (7—18)$$

и нижним основанием

$$p_2 = \gamma h_1 + \gamma_н h_2, \qquad (7—19)$$

где $\gamma = 1$ $т/м^3$ — объемный вес воды.

В этой эпюре учитывается гидростатическое давление воды лишь от слоя воды над наносами; взвешивающее давление от воды учтено в величине объемного веса наносов $\gamma_н$.

Возможная высота слоя отложившихся наносов в водохранилище определяется на основании специальных гидрологических расчетов (см. например, Г. И. Шамов, Речные наносы, Гидрометеоиздат, 1954).

8. Давление ветра и снега [12] и [19]

Ветровая нагрузка на гидротехнические сооружения и их элементы принимается в соответствии с ГОСТ 1664-42 «Расчет строительных конструкций. Нагрузка ветровая».

Снеговая нагрузка на гидротехнические сооружения и их элементы определяется в соответствии с ОСТ 90058-40 «Нагрузка снеговая».

9. Сейсмические нагрузки [20]

а) Сила землетрясения в районах или пунктах гидростроительства оценивается сейсмичностью в баллах по ГОСТ 6249-52 и принимается по картам сейсмического районирования территории СССР или по списку основных населенных пунктов СССР с указанием принятой для них сейсмичности в баллах [20].

В табл. 7—13 приведена шкала для определения силы землетрясения сейсмометром в соответствии с ГОСТ 6249-52

Таблица 7—13

Сила землетрясения

Сила землетрясения в баллах	Максимальное относительное смещение сферического упругого маятника сейсмометра x_0 в *мм*
6	От 1,1 до 2,0
7	„ 2,1 „ 4,0
8	„ 4,1 „ 8,0
9	„ 8,1 „ 16,0

Примечания. 1. Маятник имеет период собственных колебаний $T = 0{,}25$ сек. и логарифмический декремент затухания колебания $\lambda = 0{,}50$.

2. В местах, где отсутствуют сейсмометры, силу землетрясения следует определять в соответствии с указаниями ГОСТ 6249-52.

Гидротехнические сооружения с расчетной сейсмичностью в 6 и менее баллов осуществляются без специальных антисейсмических мероприятий.

Уточнение сейсмичности пункта строительства производится на основании карт сейсмического микрорайонирования.

Сейсмическое микрорайонирование территорий строительства и населенных мест производится по материалам, характеризующим физико-механические свойства грунтов, геологические и гидрогеологические условия и рельеф местности; рекомендуется использование материалов сейсмометрических наблюдений и специальных исследований, проводимых в целях получения характеристики сейсмических свойств грунтов.

При отсутствии карт сейсмического микрорайонирования в районах с сейсмичностью 7 баллов и более уточнение сейсмичности площадки строительства может производиться в сторону уменьшения или увеличения на 1 балл по материалам общих инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий и по согласованию с утверждающей проект инстанцией. При этом следует учитывать, что наиболее устойчивыми в сейсмическом отношении грунтами являются невыветренные скальные и полускальные породы, а также плотные крупнообломочные грунты.

Неблагоприятными в сейсмическом отношении являются насыщенные водой гравийные, песчаные и глинистые (макропористые), а также пластичные, текучие глинистые (не макропористые) грунты.

Неблагоприятными в сейсмическом отношении условиями участка являются: сильно расчлененный рельеф местности, обрывистые берега, овраги, ущелья и др.; выветренность и сильная нарушенность пород физико-геологическими процессами; районы оползней, обвалов, осыпей и плывунов; зоны, расположенные вблизи линий тектонических разрывов.

При необходимости строительства на таких участках должны быть осуществлены мероприятия по обеспечению сейсмостойкости сооружений согласно особым проектам (инженерная подготовка участка, специальные конструктивные мероприятия по усилению сооружений и др.).

При уточнении сейсмичности участков строительства должны учитываться характеристики сейсмических свойств грунтов, являющихся основанием для этих сооружений.

б) Расчетная величина сейсмических сил инерции. При расчете конструкций гидротехнических сооружений, возводимых в сейсмических районах, кроме обычных воздействий должны учитываться условные сейсмические силы инерции.

Расчет ведется в предположении статического действия условных сейсмических сил инерции, их распределение принимается в соответствии с распределением нагрузок (масс).

При проектировании гидротехнических сооружений следует учитывать, что сейсмические силы могут иметь любое направление. Расчетным является такое направление сейсмических нагрузок, которое наиболее опасно для сооружения при данном направлении основных действующих сил.

Расчетная величина сейсмических сил инерции определяется по формуле:

$$S = \alpha K_c P, \qquad (7—20)$$

где K_c — сейсмический коэффициент (принимается по табл. 7—14);

α — коэффициент, зависящий от динамических характеристик сооружения или его элементов, а также от характера сейсмических воздействий, принимается по табл. 7—15;

P — силовые воздействия, зависящие только от массы (вес элементов сооружения; нагрузка, вызывающая при сейсмических толчках инерционную силу, срезывающую или растягивающую анкерные соединения, и т. п.).

Таблица 7—14

Значения сейсмического коэффициента K_c

Расчетная сейсмичность в баллах	7	8	9
Значение сейсмического коэффициента	1/40	1/20	1/10

Примечание. Для сооружений I, II и III классов в зависимости от сейсмических характеристик грунтов допускается уточнять сейсмический коэффициент K_c на основании материалов специальных изысканий.

Для башен и других гибких сооружений рекомендуется ограничивать величину расчетного периода собственных колебаний T значениями:

$T \leqslant 0{,}8\sqrt{\frac{H}{g}}$ — при расчетной сейсмичности 7 и 8 баллов;

$T \leqslant 0{,}7\sqrt{\frac{H}{g}}$ — при расчетной сейсмичности 9 баллов.

Здесь $g = 9{,}81$ *м/сек²* — ускорение силы тяжести, H — высота сооружения в *м*.

Таблица 7—15

Значения коэффициента α

Характер рассчитываемых сооружений или их элементов	Значения коэффициента α
Сооружения или их элементы, кроме указанных ниже в настоящей таблице	1
Высокие сооружения: водонапорные башни, высокие опоры мостов, высокие подпорные стены, высокие железобетонные, бетонные и каменные плотины:	
а) у верха сооружения высотой H	2
б) у обреза фундамента сооружения	1
в) на промежуточных высотах h	$1+\frac{h}{H}$
Распорные конструкции (арки и своды)	2
Местные соединения отдельных частей сооружений: анкерные болты колонн, ферм, арок, неподвижных опор пролетных строений мостов и т. п. (кроме анкерных болтов для крепления деревянных конструкций); элементы крепления водонапорных баков к башне и т. п.	5
Анкерные болты для крепления деревянных конструкций	1

Если сейсмичность пункта строительства определяется согласно [20], сейсмический коэффициент K_c (по табл. 7—14) для гидротехнических сооружений I, II и III классов уточняется умножением на коэффициент β, приведенный в табл. 7—16.

Таблица 7—16

Значения коэффициента β

Грунты основания гидротехнического сооружения	Значения коэффициента β
Скальные	0,5
Полускальные (кроме неводостойких: гипса, каменной соли, гипсоносных конгломератов и т. п.)	0,75
Крупнообломочные, глина твердая	1,0
Насыщенные водой (очень влажные), песчаные, супесчаные, суглинистые, пластичные глинистые	2,0

Расчетная сейсмичность гидротехнических сооружений приведена в табл. 7—17.

При расчете устойчивости откосов земляных плотин, дамб и т. п. и при определении давления грунта на элементы гидротехнических сооружений угол внутреннего трения грунта уменьшается:

в районах с сейсмичностью 7 и 8 баллов . . на 3°

» » 9 » . . » 6°

Таблица 7—17

Расчетная сейсмичность гидротехнических сооружений

Классы гидротехнических сооружений	Расчетная сейсмичность сооружений при сейсмичности пункта строительства в баллах			
	6	7	8	9
I класс	7	8	9	—
II и III классы	6	7	8	9
IV класс	6	6	6	6
V класс	6	6	6	6

Примечания. 1. В районах с сейсмичностью 9 баллов гидротехнические сооружения I класса должны возводиться с дополнительными антисейсмическими мероприятиями по специальным проектам.

2. При проектировании гидротехнических подпорных сооружений, образующих водохранилища значительных размеров, прорыв которых может повлечь за собой затопление населенных пунктов или промышленных предприятий, сопровождающееся разрушением зданий (сооружений) или порчей ценного оборудования, назначение расчетной сейсмичности должно быть подвергнуто особому рассмотрению и специально обосновано.

При расчете плотин, стен шлюзов и тому подобных гидротехнических сооружений, соприкасающихся с водой, следует учитывать дополнительное инерционное воздействие прилегающей части воды, возникающее при землетрясении. Величина дополнительного давления воды и его распределение по высоте сооружения может определяться так:

$$q_y = K_c \gamma h \left(0{,}3 + 0{,}5\frac{y}{h}\right), \qquad (7—21)$$

где q_y — горизонтальная сейсмическая сила инерции в $т/м^2$ на расстоянии y от поверхности воды в $м$;

K_c — сейсмический коэффициент, определяемый по табл. 7—14;

γ — 1 $т/м^3$ — объемный вес воды;

h — общая глубина воды у сооружения в $м$;

y — глубина воды относительно рассматриваемой точки в $м$.

10. Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета проезжей части гидротехнических сооружений под автомобильную дорогу [11]

а) Общие положения. Приводимые ниже нормы устанавливают нормативные подвижные вертикальные нагрузки для расчета конструкций мостов, труб и других искусственных сооружений на автомобильных дорогах.

Нормативная подвижная вертикальная нагрузка для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах устанавливается трех видов.

1. Нормативная автомобильная нагрузка по схемам Н-18, Н-13, Н-10 и Н-8.

Примечание. Схема нормативной автомобильной нагрузки обозначается буквой Н и числом, соответствующим весу нормального автомобиля для данной схемы нагрузки в тоннах.

2. Нормативная колесная или гусеничная нагрузка по схемам НК-80, НГ-60 и НГ-30.

Примечание. Схема нормативной колесной или гусеничной нагрузки обозначается буквами НК или НГ в зависимости от того, колесная ли это или гусеничная нагрузка, и числом, соответствующим весу расчетной машины для данной схемы нагрузки в тоннах.

3. Нормативная нагрузка от толпы.

Подвижные вертикальные нагрузки для расчета искусственных сооружений назначаются в зависимости от категории дороги согласно табл. 7—18.

Таблица 7—18

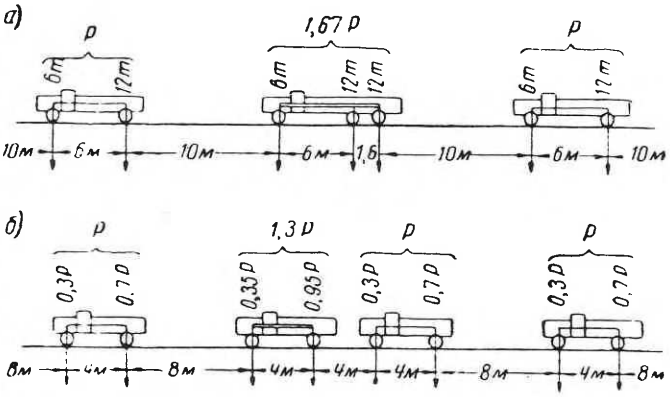
Категория дороги	Металлические, железобетонные и каменные сооружения		Деревянные сооружения		Нормативная нагрузка от толпы
	нормативная автомобильная нагрузка	нормативная колесная или гусеничная нагрузка	нормативная автомобильная нагрузка	нормативная гусеничная нагрузка	
I—II	Н-18	НК-80	—	—	Согласно указаниям подпункта „г“
III	Н-13	НГ-60	Н-10	НГ-60	
IV	Н-13	НГ-60 или НГ-30	Н-10	НГ-60 или НГ-30	
			Н-8	НГ-30	
V	Н-10	НГ-60 или НГ-30	Н-10	НГ-60 или НГ-30	
			Н-8	НГ-30	

Примечание. Нормативная гусеничная нагрузка для дорог IV и V категорий устанавливается по согласованию с заинтересованными министерствами или ведомствами.

Каждое сооружение рассчитывается на действие: 1) нормативной автомобильной нагрузки, нормативной нагрузки от толпы, расположенной на тротуарах, и 2) нормативной колесной или гусеничной нагрузки.

б) Нормативная автомобильная нагрузка принимается состоящей из расчетных колонн автомобилей, установленных в расчетном положении на проезжей части параллельно оси сооружения.

Расчетная колонна автомобилей принимается состоящей из ряда следующих друг за другом в установленном порядке (схемы фиг. 7—6) машин одинакового веса P (нормальных), среди которых имеется один автомобиль утяжеленный. Длина расчетной колонны не ограничивается



Фиг. 7—6

При расчете сооружения направление движения всех расчетных колонн принимается в одну сторону.

Расположение автомобилей в расчетной колонне по схеме Н-18 принимается по фиг. 7—6,*а*, а по схемам Н-13, Н-10 и Н-8 — по фиг. 7—6,*б*.

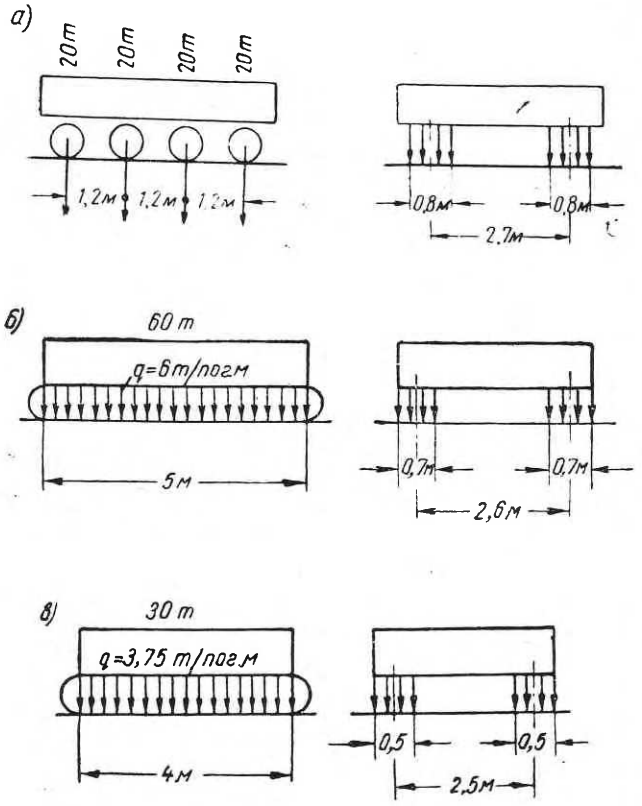
Краткие показатели для автомобилей расчетных колонн по схемам Н-18, Н-13, Н-10 и Н-8 приведены в табл. 7—19.

Таблица 7—19

Наименование основных показателей	Единица измерения	Схема нагрузки							
		Н-18		Н-13		Н-10		Н-8	
		утяжеленный	нормальный	утяжеленный	нормальный	утяжеленный	нормальный	утяжеленный	нормальный
Вес нагруженного автомобиля	$т$	30	18	16,9	13	13	10	10,4	8
Давление на заднюю ось	„	2×12	12	12,35	9,1	9,5	7,0	7,6	5,6
Давление на переднюю ось	„	6	6	4,55	3,9	3,5	3,0	2,8	2,4

При расчете искусственных сооружений на нормативную автомобильную нагрузку необходимо учитывать ее динамическое воздействие в соответствии с указаниями действующих технических условий.

При расчете искусственных сооружений на нормативную автомобильную нагрузку по схемам Н-18, Н-13, Н-10 и Н-8 допускается нагрузку от расчетной колонны автомобилей заменять эквивалентной нагрузкой (см. [11]).



Фиг. 7—7

в) Нормативная колесная или гусеничная нагрузка принимается состоящей из одной расчетной машины на колесном или гусеничном ходу, установленной в расчетном положении на проезжей части параллельно оси сооружения.

Нормативная колесная нагрузка по схеме НК-80 принимается по фиг. 7—7,*а*.

Нормативная гусеничная нагрузка по схеме НГ-60 принимается по фиг. 7—7,*б*.

Нормативная гусеничная нагрузка по схеме НГ-30 принимается по фиг. 7—7,*в*.

Краткие основные показатели для расчетных машин по схемам НК-80, НГ-60 и НГ-30 приведены в табл. 7—20.

Расстояние от внешней грани гусеницы или ската до колесоотбойного бруса или бордюра тротуара должно быть не менее 0,25 *м*.

Таблица 7—20

Наименование основных показателей	Единица измерения	Схема нагрузки		
		НК-80	НГ-60	НГ-30
Вес машины	*т*	80	60	30
Давление на 1 *пог. м* гусеницы	„	—	6	3,75
Давление на ось	„	20	—	—
Длина опирания гусеницы	*м*	—	5	4

При расчете искусственных сооружений на нормативную колесную или гусеничную нагрузку по схемам НК-80, НГ-60 и НГ-30 допускается нагрузку от расчетной машины на колесном или гусеничном ходу заменять эквивалентной нагрузкой (см. [11]).

При расчете искусственных сооружений на пропуск по ним нормативной колесной или гусеничной нагрузки подвижные вертикальные нагрузки других видов не учитываются.

г) Нормативная нагрузка от толпы принимается для расчета искусственных сооружений на дорогах всех категорий в виде равномерно распределенной нагрузки в 300 *кг/м²*, располагаемой только на тротуарах.

Нормативная нагрузка от толпы на тротуарах принимается одновременно с нормативной автомобильной нагрузкой.

Настил тротуара, кроме расчета на нормативную нагрузку от толпы, должен быть проверен на сосредоточенный груз в 130 *кг*.

При расчете искусственных сооружений, которые не имеют тротуаров, нормативная нагрузка от толпы не учитывается.

Для пешеходных переходных мостов через автомагистрали нормативная нагрузка от толпы принимается равной 400 *кг/м²*.

7—3. РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ([5], [17])

1. Общие указания

Расчеты устойчивости гидротехнических сооружений, находящихся под действием вертикальных и горизонтальных сил, производятся:

а) на скольжение по горизонтальной плоскости подошвы основания сооружения.

При проверке на сдвиг по плоскости подошвы основания сооружения сцепление между глинистым грунтом и сооружением не учитывается;

б) в предположении возможности образования в грунтах основания поверхностей скольжения.

Указанные поверхности скольжения должны выбираться таким образом, чтобы они проходили в наиболее неустойчивых грунтах. При наличии в грунте основания прослойки с пониженным коэффициентом сдвига должна быть произведена поверка на скольжение сооружения по этой прослойке.

Выбор коэффициента запаса на устойчивость должен производиться в зависимости от метода расчета и надежности принятых в расчете числовых характеристик грунта.

2. Коэффициенты запаса устойчивости

а) Нормы ВНИИГ 1941 г. [5]. Коэффициенты запаса устойчивости в соответствии с нормами должны быть вычислены при самых невыгодных из всех возможных при нормальных условиях строительства и эксплуатации величинах и комбинациях сил и нагрузок, действующих на сооружение и его основание.

Допускаемые коэффициенты устойчивости можно брать при составлении технических проектов в зависимости от класса сооружений из табл. 7—20[а] (для слу-

чая действия основных и дополнительных сил и нагрузок).

Таблица 7—20[а]

Класс проектируемого сооружения	Допускаемый коэффициент устойчивости
I	1,5
II	1,4
III	1,3

Примечания. 1. В проектном задании величина коэффициента запаса должна быть принята согласно специальным указаниям или условиям. При их отсутствии рекомендуется принимать для проектного задания коэффициенты запаса, увеличенные на 10% по сравнению с принимаемыми для технического проекта.

2. При расчете сооружения на случай действия не только основных и дополнительных, но и особых сил и нагрузок, следует принимать для всех классов сооружений и всех стадий проектирования коэффициент запаса равным 1,1.

б) Нормы Гидроэнергопроекта 1952 г. [17]. В качестве ориентирующих указаний рекомендуется коэффициент запаса устойчивости относить:

1) к наиболее опасному фактически возможному для данного сооружения сочетанию действующих на него сил и нагрузок, т. е. основных, дополнительных и особых (если возникновение особых сил и нагрузок физически возможно для рассматриваемого сооружения), и основных и дополнительных, если возникновение особых сил и нагрузок физически невозможно;

2) к сниженным силам сопротивления (пассивным силам);

3) к наиболее опасной (для потери устойчивости) расчетной схеме (см. выше, пункт 1 «а» и 1 «б») и направлению возможной деформации.

Коэффициент запаса устойчивости (допускаемый) против смещения сооружений K по принятой схеме деформации рекомендуется принимать согласно табл. 7—21 (для стадии технического проекта).

При расчете на сдвиг рекомендуется учитывать также динамику воздействия на водосбросные сооружения и их основания падения водного потока, снижающего вследствие вибрации сопротивление сдвигу сооружения. Для такого учета следует повышать общий коэффициент устойчивости на сдвиг (табл. 7—21) умножением его на специальный коэффициент δ согласно табл. 7—22.

Таблица 7—21

Класс сооружения	I	II	III	IV—V
Коэффициент запаса K устойчивости против смещения сооружения .	1,15	1,12	1,10	1,05

Примечания. 1. Для стадий, предшествующих техническому проекту, величины K рекомендуется увеличивать на 5—10%.

2. При расчете сооружений на глинистых основаниях необходимо учитывать медленность передачи нагрузки на скелет грунта и производить проверку устойчивости в наиболее невыгодный в отношении устойчивости момент времени, характеризующийся значительным развитием нарушающих устойчивость сил и незаконченным процессом уплотнения грунта.

3. Сопротивление связных и несвязных грунтов сдвигу, угол внутреннего трения и сила сцепления должны быть установлены на основе испытаний в лаборатории (см. [17]).

Таблица 7—22

Тип и массивность сооружения	Значения коэффициента δ
Глухие плотины	1
Массивные водосливные плотины, здания гидростанций, шлюзы	1,05
Легкие железобетонные водопропускные сооружения	1,10

Примечание. Дополнительные указания о величинах коэффициентов запаса устойчивости сооружений приведены в соответствующих главах справочника.

7—4. ДОПУСКАЕМЫЕ ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТЫ [17]

1. Скальные и полускальные грунты

При составлении проектов сооружений I, II и III классов величины пределов прочности скальных грунтов определяются специальными исследованиями путем раздавливания кубиков размером 5×5×5 *см* из скальных грунтов.

Допускаемое давление на скальное основание для весьма прочных скальных грунтов, склонных к трещиноватости, принимается от $^1/_{20}$ до $^1/_{25}$ величины предела прочности скального грунта при раздроблении, от $^1/_{10}$ до $^1/_{20}$ — для скалы среднего качества. Для слабых, но однородных и нетрещиноватых грунтов, а также для полускальных пород допускаемое давление составляет от $^1/_5$ до $^1/_{10}$ предела прочности.

Для выветрившихся скальных пород допускаемые давления устанавливаются пониженными на 25—50% в зависимости от состояния породы.

Для сооружений IV и V классов при ненарушенной выветриванием скале давления на ее поверхность могут быть допущены в пределах, приведенных в табл. 7—23.

Меньшие величины норм настоящего пункта в табл. 7—23 следует принимать для менее прочных пород указываемой категории, при худшем их состоянии и учете только основных нагрузок, бо́льшие — при учете и дополнительных сил.

Приведенные в табл. 7—23 данные относятся к основаниям фундаментов небольших размеров в плане.

При больших площадях подошвы, при отсутствии резких градиентов напряжений (т. е. при отсутствии

Таблица 7—23

Наименование породы	Допускаемое давление в *кг/см²*
Слабая скала (туфы, плотный мел, трахиты)	8—12
Скала среднего качества (песчаники, известняки и др.)	12—20
Твердая скала (гнейсы, граниты, порфириты, плотные песчаники, плотные известняки и др.)	20—40
Особо твердая скала (кварциты, мелкозернистые граниты и др.)	40—60

необходимости в значительном повышении сопротивления основания по краям подошвы) допускаемые давления могут быть повышены против табличных данных на величину до 25%.

Приведенные выше величины допускаемых давлений предполагают залегание скалы слоем достаточной мощности. Если под скалой залегает слабый сжимаемый грунт, то необходимо считаться с тем, что скала под тяжестью сооружения может проломиться.

Этот вопрос каждый раз должен быть подвергнут специальному изучению.

2. Нескальные грунты

Допускаемое давление на основание в этом случае определяется условием невыпирания грунта из-под основания сооружения, устойчивостью на сдвиг и величинами осадок, безопасными для рассматриваемого сооружения.

Таблица 7—24

Наименование грунтов	Допускаемое давление σ_0 в *кг/см²*	Примечание
1. Глинистые грунты		
Глины в твердом состоянии	7,0—3,3	В зависимости от пористости
Глины в пластичном состоянии	4,0—1,3	То же
Суглинки в твердом состоянии	4,0—3,0	»
Суглинки в пластичном состоянии	3,3—1,3	»
II. Песчаные грунты (кварцевые)		
Супесь маловлажная . . .	4,0—3,3	В зависимости от плотности
» влажная	3,3—2,0	
Пески пылеватые маловлажные	4,0—3,5	
Пески пылеватые влажные	3,0—2,5	
Пески пылеватые насыщенные	2,0—1,5	
Пески мелкие маловлажные	4,5—3,0	
Пески влажные и насыщенные	3,5—2,0	
Пески средней крупности, независимо от влажности	5,0—4,0	
Пески гравийные и крупные, независимо от влажности	6,5—5,0	
III. Галечниковые и гравийные грунты		
Галечниковые и щебенистые грунты с песчаным заполнителем пор.	8,5	
Галечниковые и щебенистые грунты с глинистым заполнителем пор	5,5—3,5	В зависимости от консистенции глинистого заполнителя
Гравийные и дресвяные грунты, образовавшиеся из кристаллических пород	7,0	
Гравийные и дресвяные грунты, образовавшиеся из осадочных горных пород	4,0	

Примечания. 1. Приведенные в табл. 7—24 допускаемые давления предусматривают: а) ширину фундамента не менее 1 *м* и глубину заложения не менее 2 *м*;

б) статическую нагрузку на основание, т. е. медленное ее изменение, одновременное и равномерное по всей площади сооружения.

2. При значительных площадях подошвы фундаментов допускаемые давления определяются условием устойчивости грунта на выпирание и допускаемым размером осадок (см. [17]).

3. Допускаемые давления на грунты, теряющие свою структуру при замачивании под нагрузкой, а также на грунты, находящиеся в рыхлом и текучем состоянии, определяются по особым нормам.

4. Допускаемые давления на супеси, пылеватые пески и мелкие пески установлены в табл. 7—24 при условии недопущения разрыхления этих грунтов восходящими токами воды во время производства работ (применение водопонижения взамен открытого водоотлива из котлована и т. д.).

Выбор допускаемого давления для сооружений I, II и III классов должен быть основан на специальных расчетах: устойчивости сооружения на сдвиг, осадок основания, устойчивости грунтов основания на выпор, прочности принятых конструкций сооружений и с обязательным учетом фильтрационных сил. Допускаемые давления на грунт при расчетах сооружений IV класса с малой площадью основания и всех сооружений V класса принимаются согласно табл. 7—24.

Приведенные в табл. 7—24 допускаемые давления соответствуют наиболее опасному сочетанию действующих на сооружение сил и нагрузок, т. е. основных, дополнительных и особых (если возникновение особых сил и нагрузок физически возможно для рассматриваемого сооружения).

В случае отсутствия особых сил приведенные в табл. 7—24 величины допускаемых давлений следует уменьшить на 15%.

При назначении допускаемого давления на основание надо учитывать не только характер и свойства грунта, на котором непосредственно возводится сооружение, но и более слабые прослойки, залегающие в глубине грунтового массива.

При заложении сооружения на глубине h, превышающей 2 *м*, величины допускаемых давлений определяются по формуле:

$$\sigma_h = \sigma_0 + K_0 \gamma_w (h - 2), \qquad (7-22)$$

где σ_h — допускаемое давление в *кг/см²* на глубине h *м*;

σ_0 — допускаемое давление в *кг/см²* на глубине 2 *м*, указанное в табл. 7—24;

γ_w — объемный вес грунта в *т/м³*, лежащего выше подошвы основания, вместе с заключенной в порах грунта водой.

Для грунтов, находящихся ниже уровня грунтовых вод, необходимо учитывать уменьшение веса за счет взвешивания водой.

Значения коэффициента K_0:

для песков . . . . . K_0=0,25

» супесей, сухих суглинков и глин K_0=0,20

» пластичных суглинков, глин и пылеватых песков . . . . . K_0=0,15

Если фундамент сооружения не находится под водой, защищающей его от промерзания, основание сооружения должно быть заложено на глубине, достаточной для исключения опасности промерзания.

Примечание. При наличии вечной мерзлоты расчеты производятся по особым нормам.

7—5. ДОПУСКАЕМЫЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ [15]

1. Общие указания

Средние скорости течения, учитываемые в расчетах, должны соответствовать расчетным расходам воды, устанавливаемым согласно соответствующим техническим условиям проектирования.

Средние скорости течения определяются:

а) при расчетах отверстий сооружений, размывов и при проектировании креплений по всему периметру поперечного сечения водотока, как частное от деления расчетного расхода водотока на площадь его живого сечения;

б) при проектировании местных креплений — как такое же частное для соответствующей части водотока (ближайшей к укрепляемому месту).

В сложных и ответственных случаях производятся специальные натурные и лабораторные исследования.

2. Допускаемые скорости течения воды в гидротехнических сооружениях без искусственных креплений

а) Общие указания. В сооружениях без искусственного крепления, в которых при расчетных расходах водотока размыв не допускается, средние скорости течения воды, как правило, не должны превышать значений, указанных в табл. 7—25, 7—26 и 7—27.

Таблица 7—25

Допускаемые (неразмывающие) средние скорости течения для несвязных грунтов

Грунты и их характеристики		Размеры частиц грунта в *мм*	Средние глубины потока в *м*					
наименование	разновидности		0,4	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0 и более
			Средние скорости течения в *м/сек*					
Пыль и ил	Пыль и ил с мелким песком; растительная земля	0,005—0,05	0,15—0,20	0,20—0,30	0,25—0,40	0,30—0,45	0,40—0,55	0,45—0,65
Песок мелкий	Песок мелкий с примесью среднего	0,05—0,25	0,20—0,35	0,30—0,45	0,40—0,55	0,45—0,60	0,55—0,70	0,65—0,80
Песок средний	Песок мелкий с глиной; песок средний с примесью крупного	0,25—1,00	0,35—0,50	0,45—0,60	0,55—0,70	0,60—0,75	0,70—0,85	0,80—0,95

Продолжение табл. 7—25

Грунты и их характеристики		Размеры частиц грунта в *мм*	Средние глубины потока в *м*					
наименование	разновидности		0,4	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0 и более
			Средние скорости течения в *м/сек*					
Песок крупный	Песок крупный с примесью гравия; среднезернистый песок с глиной	1,00—2,50	0,50—0,65	0,60—0,75	0,70—0,80	0,75—0,90	0,85—1,00	0,95—1,20
Гравий мелкий	Гравий мелкий с примесью среднего	2,50—5,00	0,65—0,80	0,75—0,85	0,80—1,00	0,90—1,10	1,00—1,20	1,20—1,50
Гравий средний	Гравий крупный с песком и мелким гравием	5,00—10,0	0,80—0,90	0,85—1,05	1,00—1,15	1,10—1,30	1,20—1,45	1,50—1,75
Гравий крупный	Галька мелкая с песком и гравием	10,0—15,0	0,90—1,10	1,05—1,20	1,15—1,35	1,30—1,50	1,45—1,65	1,75—2,00
Галька мелкая	Галька средняя с песком и гравием	15,0—25,0	1,10—1,25	1,20—1,45	1,35—1,65	1,50—1,85	1,65—2,00	2,00—2,30
Галька средняя	Галька крупная с примесью гравия	25,0—40,0	1,25—1,50	1,45—1,85	1,65—2,10	1,85—2,30	2,00—2,45	2,30—2,70
Галька крупная	Булыжник мелкий с галькой и гравием	40,0—75,0	1,50—2,00	1,85—2,40	2,10—2,75	2,30—3,10	2,45—3,30	2,70—3,60
Булыжник мелкий	Булыжник средний с галькой	75,0—100	2,00—2,45	2,40—2,80	2,75—3,20	3,10—3,50	3,30—3,80	3,60—4,20
Булыжник средний	Булыжник средний с примесью крупного; булыжник крупный с мелкими примесями	100—150	2,45—3,00	2,80—3,35	3,20—3,75	3,50—4,10	3,80—4,40	4,20—4,50
Булыжник крупный	Булыжник крупный с примесью мелких валунов и гальки	150—200	3,00—3,50	3,35—3,80	3,75—4,30	4,10—4,65	4,40—5,00	4,50—5,40
Валун мелкий	Валуны средние с примесью гальки	200—300	3,50—3,85	3,80—4,35	4,30—4,70	4,65—4,90	5,00—5,50	5,40—5,90
Валун средний	Валуны с примесью булыжника	300—400	—	4,35—4,75	4,70—4,95	4,90—5,30	5,50—5,60	5,90—6,00
Валун особо крупный	—	400—500 и более	—	—	4,95—5,35	5,30—5,50	5,60—6,00	6,00—6,20

Примечания. 1. В каждой графе таблицы нижние пределы скоростей течения соответствуют нижним пределам размеров частиц грунта, верхние пределы скоростей — верхним пределам размеров частиц.

2. Табличные значения скоростей не следует интерполировать. При промежуточных размерах частиц грунта и глубинах водотока значения скоростей течения принимаются по ближайшим табличным значениям размеров частиц и глубин водотока.

Таблица 7—26

Допускаемые (неразмывающие) скорости течения для связных грунтов

Наименование грунтов	Содержание частиц в %		Характеристики грунтов															
	менее 0,005 *мм*	0,005—0,05 *мм*	грунты малоплотные (приведенная порозность 1,2—0,9); объемный вес грунтового скелета — до 1,20 *т/м³*				грунты среднеплотные (приведенная порозность 0,9 — 0,6); объемный вес грунтового скелета — 1,20—1,66 *т/м³*				грунты плотные (приведенная порозность 0,6 — 0,3); объемный вес грунтового скелета — 1,66—2,04 *т/м³*				грунты очень плотные (приведенная порозность 0,3 — 0,2); объемный вес грунтового скелета — 2,04—2,14 *т/м³*			
			Средние глубины потока в *м*															
			0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0	0,4	1,0	2,0	3,0
			Средние скорости течения в *м/сек*															
Глины	30—50	70—50	0,35	0,40	0,45	0,50	0,70	0,85	0,95	1,10	1,00	1,20	1,40	1,50	1,40	1,70	1,90	2,10
Тяжелые суглинки	20—30	80—70																
Тощие суглинки	10—20	90—80	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65	0,80	0,90	1,00	0,95	1,20	1,40	1,50	1,40	1,70	1,90	2,10
Лёссовые грунты в условиях закончившихся просадок	—	—	—	—	—	—	0,60	0,70	0,80	0,85	0,80	1,00	1,20	1,30	1,10	1,30	1,50	1,70
Супеси	5—10	20—40	По табл. 7—25 в зависимости от крупности песчаных фракций															

Примечания. 1. Табличные значения скоростей не следует интерполировать. При промежуточных глубинах водотока значения коростей принимаются по глубинам, ближайшим к натурным.

2. Величины допускаемых скоростей течения при глубинах водотока более 3,0 *м* (в случае отсутствия специальных исследований и расчетов) принимаются по их значениям для глубины 3,0 *м*.

3. При проектировании поверхностных водоотводов в подверженных выветриванию плотных и очень плотных грунтах допускаемые скорости ограничиваются теми же значениями, что и для грунтов средней плотности.

Таблица 7—27

Допускаемые (неразмывающие) средние скорости течения для скальных грунтов

Наименование грунтов	Средние глубины потока в *м*			
	0,4	1,0	2,0	3,0
	Средние скорости течения в *м/сек*			
Конгломерат, мергель, сланцы	2,0	2,5	3,0	3,5
Пористый известняк, плотный конгломерат, слоистый известняк, известковый песчаник, доломитовый известняк	3,0	3,5	4,0	4,5
Доломитовый песчаник, плотный неслоистый известняк, кремнистый известняк, мрамор	4,0	5,0	6,0	6,5
Граниты, диабазы, базальты, андезиты, кварциты, порфиры	15	18	20	22

Примечания. 1. Табличные значения скоростей не следует интерполировать. При промежуточных глубинах водотока значения скоростей принимаются по глубинам, ближайшим к натурным.

2. Величины допускаемых скоростей течения при глубинах водотока, больших 3,0 *м* (в случае отсутствия специальных исследований и расчетов), принимаются по их значениям для глубин в 3,0 *м*.

Характеристики грунтов устанавливаются на основании данных натурных исследований и в необходимых случаях лабораторных определений, объем и методика которых устанавливаются указаниями по инженерно-геологическим изысканиям и производству лабораторных исследований грунтов.

б) Допускаемые средние скорости течения воды для несвязных грунтов принимаются по нормам табл. 7—25.

Для неоднородных несвязных грунтов допускаемые скорости принимаются по нормам табл. 7—25, как для однородного грунта с размерами фракций, равными средневзвешенному размеру фракций неоднородного грунта.

в) Допускаемые средние скорости течения для однородных связных грунтов принимаются по нормам табл. 7—26.

Для сложных связных грунтов (с включением крупных зерен и комков), в которых связная часть грунта лишь заполняет поры между крупными зернами или комками, допускаемые скорости устанавливаются по размерам этих последних, как для несвязного грунта (по табл. 7—25).

г) Допускаемые средние скорости течения воды для скальных грунтов принимаются по нормам табл. 7—27, которые установлены из условия сохранности скального грунта (породы).

Для пород трещиноватых или выветренных табличные значения скоростей подлежат уменьшению на 10—15% в зависимости от степени сохранности породы. Для сильно выветренных (разборных) пород допускаемые скорости принимаются по табл. 7—25, как для несвязных грунтов, по размерам преобладающих отдельностей.

3. Допускаемые скорости течения воды в гидротехнических сооружениях с искусственными креплениями

Допускаемые средние скорости течения воды (при расчетных расходах водотока) для искусственных креплений принимаются по нормам табл. 7—28.

Значения скоростей, указанные в табл. 7—28, преду-

сматривают нормальные грунтовые условия и качество укрепительных работ, соответствующее техническим условиям и правилам их производства.

При неблагоприятных грунтовых условиях (свежеотсыпанный грунт и др.), неблагоприятных обстоятельствах производства работ и эксплуатации креплений нормы табл. 7—28 должны быть понижены с учетом местных условий.

Таблица 7—28

Допускаемые (неразмывающие) средние скорости течения для искусственных креплений

Типы креплений	Средние глубины потока в *м*			
	0,4	1,0	2,0	3,0
	Средние скорости течения в *м/сек*			
Одерновка плашмя (на плотном основании)	0,9	1,2	1,3	1,4
Одерновка в стенку	1,5	1,8	2,0	2,2
Каменная наброска из булыжного или рваного камня в зависимости от его крупности	По табл. 7—25 с коэффициентом 0,90			
Каменная наброска в 2 слоя в плетнях в зависимости от крупности камня	По табл. 7—25 с коэффициентом 1,10			
Одиночное мощение на мху (слой мха не менее 5 *см*):				
а) из булыжника размером 15 *см*	2,0	2,5	3,0	3,5
б) из булыжника размером 20 *см*	2,5	3,0	3,5	4,0
в) из булыжника размером 25 *см*	3,0	3,5	4,0	4,5
Одиночное мощение на щебне (слой щебня не менее 10 *см*):				
а) из рваного камня размером 15 *см*	2,5	3,0	3,5	4,0
б) из рваного камня размером 20 *см*	3,0	3,5	4,0	4,5
в) из рваного камня размером 25 *см*	3,5	4,0	4,5	5,0
Одиночное мощение с подбором лица и грубым приколом на щебне (слой щебня не менее 10 *см*):				
а) из камней размером 20 *см*	3,5	4,5	5,0	5,5
б) из камней размером 25 *см*	4,0	4,5	5,5	5,5
в) из камней размером 30 *см*	4,0	5,0	6,0	6,0

Типы креплений	Средние глубины потока в *м*			
	0,4	1,0	2,0	3,0
	Средние скорости течения в *м/сек*			
Двойное мощение из рваного камня на щебне: нижний слой из камней 15 *см*, верхний—из камней 20 *см* (слой щебня не тоньше 10 *см*)	3,5	4,5	5,0	5,5
Хворостяная выстилка и хворостяные покрывала на плотном основании (для временных креплений):				
а) при толщине выстилки $\delta = 20-25$ *см*	—	2,0	2,5	—
б) при других толщинах выстилки	По п. „а" с коэффициентом $0{,}2\sqrt{\delta}$			
Фашинные тюфяки:				
а) при толщине $\delta = 50$ *см*	2,5	3,0	3,5	—
б) при других толщинах тюфяков	По п. „а" с коэффициентом $0{,}15\sqrt{\delta}$			
Габионы (размерами не менее 0,5×0,5×1,0 *м*)	До 4,0	До 5,0	До 5,5	До 6,0
Бутовая кладка из камня известковых пород (с пределом прочности не менее 100 *кг/см²*)	3,0	3,5	4,0	4,5
Бутовая кладка из камня крепких пород (с пределом прочности не менее 300 *кг/см²*)	6,5	8,0	10,0	12,0
Бетон как одежда для креплений:				
марки 170	6,5	8,0	9,0	10
„ 140	6,0	7,0	8,0	9,0
„ 110	5,0	6,0	7,0	7,5
Бетонные лотки с гладкой поверхностью				
Бетон марки:				
170	13	16	19	20
140	12	14	16	18
110	10	12	13	15
Деревянные лотки гладкие при надежном основании и течении вдоль волокон	8	10	12	14

Примечания. 1. Табличные значения скоростей не следует интерполировать. При промежуточных глубинах водотока значения скоростей принимаются по глубинам, ближайшим к натурным.

2. Величины допускаемых скоростей течения при глубинах водотока, больших 3,0 *м* (в случае отсутствия специальных исследований и расчетов), принимаются по их значениям для глубины 3,0 *м*.

3. Величины допускаемых скоростей для рисберм и креплений дна зависят в основном от характера течения воды (равномерное, неравномерное, наличие прыжка и т. п.) и подлежат установлению на основании дополнительных исследований. Для ориентировочных расчетов в предварительных стадиях проектирования можно принимать указанные в табл. 7—28 величины допускаемых скоростей при глубине 0,4 *м*.

При предварительных расчетах допускается пользоваться табличными значениями скоростей для глубины водотока 0,4 *м*.

В случае наличия в водотоке значительного количества взвешенных и влекомых наносов (более 1 500 *г/м*³) значения скоростей, указанные в табл. 7—28, могут быть уменьшены на 10÷20% в зависимости от состава и количества наносов.

Нормы скоростей течения воды для креплений установлены из условия, что: а) крепления откосов и берегов обеспечены от подмыва их нижней части; б) камень для набросок и мощений — морозостойкий, крепких пород, с объемным весом не менее 2,0 *т/м*³; в) крепления на цементном растворе при агрессивности вод обеспечены от химического воздействия этих вод.

7—6. ТРАНСПОРТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И НЕЗАИЛЯЮЩИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В КАНАЛАХ [13]

При расчете каналов, не имеющих облицовки и не покрытых растительностью, с расходом воды $Q=0{,}2\div150$ *м*³/*сек*, со средней гидравлической крупностью взвешенных наносов $w\leqslant10$ *мм/сек*, с содержанием взвешенных наносов в воде до 5 *кг/м*³ и со средней по живому сечению скоростью течения воды $v>0{,}3$ *м/сек* определение транспортирующей способности каналов, продольный и поперечный профили которых установлены, рекомендуется производить по следующей формуле:

$$\rho = 700\frac{v}{w_0}\sqrt{\frac{Riv}{w}}, \qquad (7-23)$$

где ρ — транспортирующая способность в *кг/м*³;
R — гидравлический радиус в *м*;
i — уклон поверхности воды;

$w_0=w$, если $w>2$ *мм/сек* и $w_0=2$ *мм/сек*, если $w<2$ *мм/сек*.

При приближенном определении транспортирующей способности каналов расчет можно производить по формуле:

$$\rho = \frac{9\,000}{w-1{,}25}Ri. \qquad (7-24)$$

В формуле (7—24) w принимается не менее 2 *мм/сек*.

Если расход воды Q *м*³/*сек* и уклон канала даны, но живое сечение еще не установлено, то транспортирующая способность определяется по формуле:

$$\rho = BQ^{0,4}i. \qquad (7-25)$$

Здесь B — коэффициент, значения которого приведены в табл. 7—29.

Приближенное определение величины незаиляющей скорости течения (v *м/сек*) производится по формуле:

$$v = AQ^{0,2}, \qquad (7-26)$$

где A — коэффициент, значения которого даны в табл. 7—30.

Таблица 7—29

Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов w в *мм/сек*	Значение коэффициента B
<1,5	4 700
1,6÷3,5	3 000
3,6÷6,5	1 100
>6,5	600

Таблица 7—30

Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов w в *мм/сек*	Значение коэффициента A
<1,5	0,33
1,5÷3,5	0,44
>3,5	0,55

Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов w определяется в зависимости от содержания в воде разных фракций (в процентах) и от средней крупности каждой фракции $w_{ср}$.

Последняя определяется зависимостью:

$$w_{ср} = \frac{w_1+w_2+\sqrt{w_1w_2}}{3}, \qquad (7-27)$$

где w_1 и w_2 — предельные значения гидравлической крупности, характеризующие данную фракцию, приведенные в табл. 7—31.

Таблица 7—31

d в *мм*	w в *мм/сек*	d в *мм*	w в *мм/сек*	d в *мм*	w в *мм/сек*	d в *мм*	w в *мм/сек*
0,05	1,73	0,50	54,0	0,95	90,6	3,00	192,5
0,10	6,92	0,55	59,4	1,00	94,4	3,25	201,0
0,15	15,60	0,60	64,8	1,25	115,0	3,50	208,5
0,20	21,60	0,65	70,2	1,50	125,6	3,75	215,5
0,25	27,90	0,70	73,2	1,75	139,2	4,00	222,5
0,30	32,40	0,75	77,0	2,00	152,9	4,25	229,5
0,35	37,80	0,80	80,7	2,25	166,2	4,50	236,5
0,40	43,20	0,85	84,0	2,50	176,5	4,75	243,0
0,45	48,60	0,90	87,5	2,75	185,0	5,00	249,0

7—7. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ [6]

Таблица 7—32

Характеристика трущихся поверхностей	Коэффициент трения
а) Разные материалы	
Дерево по камню насухо	0,60
„ по дереву вдоль волокон насухо	0,50
То же, со смазкой	0,30
„ в присутствии воды (поперек волокон)	0,70
Дерево по стали насухо	0,55
То же, со смазкой при шлифованной поверхности	0,20
То же, в присутствии воды	0,65
Сталь по стали при слабой смазке	0,15
То же, со смазкой в винтовых нарезках подъемных механизмов	0,12
Сталь по чугуну	0,19
„ „ камню	0,45
То же, при смазке и шлифованной поверхности	0,30
Сталь по стали в цапфах механизмов с учетом загрязнения в присутствии воды	0,35
Сталь по стали в подъемниках с учетом частичного обмерзания	0,40
Сталь по фосфористой бронзе (чистая)	0,11
То же, с учетом загрязнения и обмерзания в подъемниках	0,40
Сталь по льду	0,027
Кожа (плашмя) по дубу	0,61
„ на ребро по дубу	0,43
То же, в присутствии воды	0,79
б) Каменная и бетонная кладка	
Камни или кирпич по кирпичу (гладко обделанный)	0,65
То же, по гладкому цементу	0,60
Гладко обделанный гранит по такому же граниту	0,60
Грубо обделанный гранит по такому же граниту	0,73
То же, по бетону	0,60
Каменная кладка по кладке	0,75
Бетон по бетону	0,65
Каменная кладка по бетону	0,70
Каменная кладка и бетон по твердому сухому грунту	0,65
Каменная кладка и бетон по сырому глинистому грунту	0,30
То же, по мокрому глинистому грунту	0,20
„ „ песку сухому	0,55
„ „ песку мокрому	0,45
„ „ сухому суглинку	0,45
„ „ мокрому суглинку	0,25
„ „ сухой супеси	0,50
„ „ мокрой супеси	0,35
„ „ скале	0,75
Габион по габиону	0,70
в) Деревянные ряжи	
Ряжи, заполненные камнем, по мокрой супеси	0,40
То же, по таким же ряжам	0,60
„ „ скале	0,60
„ „ мокрой глине	0,20
Ряжи, заполненные супесью, по мокрому суглинку	0,30
То же, по мокрой супеси	0,40
„ „ мокрой глине	0,20
„ „ таким же мокрым ряжам	0,40
„ „ мокрым ряжам, заполненным камнем	0,40
Ряжи с глинобетоном по супеси	0,35
„ „ глинобетоном по суглинку	0,30
То же, по глине	0,20
„ „ скале	0,35
„ „ таким же ряжам	0,35
Ряжи по песку в воде	0,35
То же, насухо	0,45
„ „ каменной наброске	0,60
г) Опускные колодцы и кессоны	
Кессоны с бетонной, деревянной и металлической поверхностью по сухим глинам	0,40
То же, по мокрым глинам	0,20
„ „ сухим суглинкам и супеси	0,45
„ „ мокрым суглинкам и супеси	0,30
„ „ сухому среднему песку	0,50
„ „ мокрому среднему песку	0,35
„ „ сухому мелкому песку	0,45
„ „ мокрому мелкому песку	0,30

7—8. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД [16]

Таблица 7—33

Категория грунта	Наименование грунта	Средний объемный вес грунта в плотном теле в состоянии естественной влажности в *кг/м³*	Предел прочности при раздавливании в *кг/см²*	Время чистого бурения 1 *пог. м* легким перфоратором в минутах	Коэффициент крепости *f*
I	Песок	1 500	—	—	0,5—0,6
	Супесь	1 600	—	—	
	Растительный грунт	1 200	—	—	
	Торф	600	—	—	
II	Легкий и лёссовидный суглинок	1 600	—	—	0,6—0,8
	Влажный рыхлый лёсс, мягкий солончак и солонец	1 600	—	—	
	Гравий рыхлый, мягкий и средний до 15 *мм*	1 700	—	—	
	Плотный растительный грунт с корнями от травы	1 400	—	—	
	Торф и растительный грунт с корнями диаметром до 30 *мм*	1 100	—	—	
	Песок и растительный грунт, смешанный со щебнем или галькой и щепой	1 650	—	—	
	Насыпной слежавшийся грунт с примесью щебня или гальки	1 700	—	—	
	Супесь с примесью щебня, гальки и строительного мусора	1 900	—	—	
III	Жирная глина, в том числе карбонная, юрская и моренная	1 800	—	—	0,8—1,0
	Тяжелый суглинок	1 750	—	—	
	Гравий крупный, галька и щебень крупностью от 15 до 40 *мм*	1 750	—	—	
	Сухой лёсс и лёсс естественной влажности, смешанный с гравием или галькой	1 790	—	—	
	Растительная земля или торф с корнями диаметром более 30 *мм*	1 400	—	—	
	Суглинок, смешанный со щебнем или галькой и строительным мусором	1 900	—	—	
IV	Тяжелая ломовая глина, в том числе твердая юрская и карбонная	1 950	—	—	1,0—1,5
	Жирная глина и тяжелые суглинки с примесью щебня, гальки, строительного мусора и булыг весом до 25 *кг* с содержанием булыг до 10%	1 950	—	—	

Продолжение табл. 7—33

Категория грунта	Наименование грунта	Средний объёмный вес грунта в плотном теле в состоянии естественной влажности в *кг/м³*	Предел прочности при раздавливании в *кг/см²*	Время чистого бурения 1 *пог. м* легким перфоратором в минутах	Коэффициент крепости *f*
IV	Моренная глина с валунами весом до 50 *кг* при наличии валунов до 10% по объему	2 000	—	—	1,0—1,5
	Сланцевая глина	2 000	—	—	
	Крупная галька размером до 90 *мм* чистая или с примесью булыг весом до 10 *кг*	1 950	—	—	
	Плотный отвердевший лёсс и отвердевший солончак	1 800	—	—	
	Сцементировавшийся строительный мусор	1 850	—	—	
	Металлургические невыветрившиеся шлаки	1 500	—	—	
	Мергель мягкий и опоки	1 900	—	—	
	Дресва	1 800	—	—	
V	Морена с валунами весом до 50 *кг* при наличии их более 10% по объему	2 100	Менее 200	Менее 3.5	1,5—2,0
	Трепел и мягкие меловые породы	1 800			
	Конгломерат слабо сцементированный	1 900			
	Сланцы разные некрепкие	2 600			
	Гипс	2 200			
VI	Туф и пемза	1 100	200—400	3,5	2—4
	Известняк мягкий пористый, сильно трещиноватый и ракушечник	1 200			
	Сланцы средней крепости	2 700			
	Мергель средней крепости	2 300			
VII	Конгломерат с галькой из осадочных пород на известковом цементе	2 200	400—600	6	4—6
	Песчаник глинистый выветренный, сильно трещиноватый	2 000			
	Сланец глинистый крепкий	2 800			
	Мергель крепкий	2 500			
VIII	Гранит дресвяный	2 300	600—800	8,5	6—8
	Известняки мергелистые	2 300			
	Песчаник глинистый	2 200			
	Сланцы слюдяные и песчаные	2 300			
	Ангидрит	2 900			
IX	Гранит, гнейс и сиенит мягкие, сильно выветренные	2 500	800—1 000	11,5	8—10
	Змеевик огалькованный	2 400			
	Известняк плотный	2 500			
	Конгломерат с галькой из осадочных пород на кремнистом цементе	2 500			
	Песчаники	2 500			
	Сидерит	2 700			
	Сланцы песчано-известковые	2 500			
	Магнезит	3 000			

Продолжение табл. 7—33

Категория грунта	Наименование грунта	Средний объемный вес грунта в плотном теле в состоянии естественной влажности в *кг/м³*	Предел прочности при раздавливании в *кг/см²*	Время чистого бурения 1 *пог. м* легким перфоратором в минутах	Коэффициент крепости *f*
X	Доломиты Известняки крепкие Мрамор Песчаник плотный на известковом цементе Сланец песчаный крепкий	2 700 2 700 2 700 2 600 2 600	1 000 – 1 200	15,0	10—12
XI	Гранит крупнозернистый Доломит весьма крепкий Змеевик Конгломерат с галькой из изверженных пород на известковом цементе Песчаник крепкий на кварцевом цементе Сиенит крупнозернистый	2 800 2 900 2 600 2 800 2 700 2 700	1 200—1 400	18,5	12—14
XII	Андезит и базальт со следами выветривания Гнейс Известняк весьма крепкий Конгломерат с галькой из изверженных пород на кремнистом цементе Трахит	2 700 2 600 2 900 2 900 2 600	1 400—1 600	22,0	14—16
XIII	Гранит среднезернистый Гнейс крепкий Диабаз Порфирит Трахит крепкий Сиенит среднезернистый	3 100 2 800 2 700 2 500 2 800 2 800	1 600—1 800	27,5	16—18
XIV	Гранит мелкозернистый, весьма крепкий Гранито-гнейс Диорит Известняк высшей крепости Порфирит крепкий	3 300 2 900 2 900 3 100 2 700	1 800—2 000	32,5	18—20
XV	Андезит, базальт, роговик крепкий Диабаз, диорит высшей крепости Габбро и кварцит крепкие	3 100 2 900 2 800	2 000—2 500	46,0	20—25
XVI	Базальт лабрадоровый и оливиновый Габбро-диабаз, кварцит и порфирит исключительно крепкие	3 300 3 000	Более 2 500	Более 60	Более 25

ЛИТЕРАТУРА

1. Близняк Е. В., Водные исследования, Речиздат, 1952.
2. Близняк Е. В., Гришин М. М. и др., Гидротехнические сооружения, ч. I, Госстройиздат, 1938.
3. ВНИИ Водгео, Гравитационные плотины. Временные технические условия и нормы проектирования и возведения, Гос. издательство „Стандартизация и рационализация", 1934.
4. ВНИИГ, Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Деривационные каналы гидроэлектростанций, часть первая и вторая, Госэнергоиздат, 1948.
5. ВНИИГ, Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Геотехнические расчеты оснований, ТУ 24-103-40, Стройиздат, 1941.
6. Гидроэнергопроект, Стандарты, нормы и технические условия проектирования гидротехнических сооружений гидроэлектростанций, Сборник № 1 под ред. Е. В. Близняка, Ст. 24-4414. Госстройиздат, 1939.
7. Строительные нормы и правила, ч. II, глава II-Д·2, Речные гидротехнические сооружения.
8. ГОСТ 3999-48 „Сооружения гидротехнические. Расчет максимальных расходов воды рек."
9. ГОСТ 3255-46, Нагрузки на гидротехнические сооружения. Воздействия волновые.
10. ГОСТ 3440-46, Нагрузки на гидротехнические сооружения. Нагрузки ледовые.
11. Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства. Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах. Н 106-53.
12. ГОСТ 1664-42, Расчет строительных конструкций. Нагрузка ветровая.
13. ГОСТ-3908-47, Транспортирующая способность и незаиляющие скорости течения воды в каналах.
14. Гришин М. М., Гидротехнические сооружения, ч. I, Госстройиздат, 1954.
15. МПС, Главтранспроект, Временные нормы допускаемых скоростей течения воды в постоянных ж.-д. гидротехнических сооружениях. Трансжелдориздат, 1952.
16. МЭС, Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Гидротехнические туннели гидроэлектростанций ТУ 11-51, Госэнергоиздат, 1952.
17. МЭС, Гидроэнергопроект, Грунты как основание гидротехнических сооружений, Нормы проектирования, ТУ 18-51, 1952.
18. Олешкевич Л. В., Гравитационные (массивные) плотины гл. XI второй части курса гидротехнических сооружений, под ред. Замарина Е. А. Сельхозгиз, 1946.
19. ОСТ 90058-40. Нагрузка снеговая.
20. Положение по строительству в сейсмических районах (ПСП-101-51). Раздел VII, Гидротехнические сооружения, Гос. издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.

Зак. 125

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Приведенные ниже данные (согласно ГОСТ 3061-46) распространяются на проектирование деревянных конструкций вновь сооружаемых, реконструируемых и восстанавливаемых гидротехнических сооружений II, III, IV и V классов: плотин, водосливов, водоспусков, судоходных шлюзов, плотоходов, бревноспусков, затворов, акведуков, лотков-регуляторов, причальных и оградительных сооружений, перемычек и служебных мостов плотин.

Примечание. Отнесение сооружения к тому или иному классу в зависимости от срока его службы и степени ответственности сооружения производится согласно ГОСТ 3315-46 (см. гл. 7, п. 7–1).

8—2. МАТЕРИАЛЫ

Для деревянных конструкций применяются пиленые и круглые лесоматериалы хвойных (преимущественно сосновых) и лиственных пород, удовлетворяющие требованиям: ГОСТ 468-43 «Лесоматериалы круглые хвойных пород, применяемые без продольной распиловки»; ГОСТ 3008-45 «Пиломатериалы хвойных пород. Доски и бруски»; ГОСТ 3021-45 «Брусья хвойных пород»; ГОСТ 726-44 «Кряжи пиловочные твердых лиственных пород. Технические условия»; ГОСТ 2695-44 «Пиломатериалы твердых лиственных пород» и требованиям настоящего параграфа.

Пределы прочности сосны 1 и 2 сортов, влажностью 15% должны быть (см. также табл. 6—28):

при сжатии вдоль волокон	не менее	300	*кг/см*
„ статическом изгибе	„	500	„
„ скалывании вдоль волокон . . .	„	50	„

Для подводных конструкций должны применяться сырые лесоматериалы (влажностью более 23%); для надводных рекомендуется применение полусухих лесоматериалов (влажностью 18—23%). Применение полусухих лесоматериалов для подводных конструкций допускается лишь при наличии технического обоснования.

Примечание. К надводным относятся конструкции, находящиеся постоянно выше уровня воды или в земле выше грунтовых вод; к подводным — конструкции, находящиеся постоянно под водой или в пределах переменного уровня.

Растянутые и изгибаемые элементы несущих конструкций в сооружениях II и III классов изготовляются из лесоматериалов 1 и 2 сортов, сжатые — из лесоматериалов 2 сорта.

Растянутые и изгибаемые элементы несущих конструкций в сооружениях IV и V классов изготовляются из лесоматериалов 2 и 3 сортов, сжатые — из лесоматериалов 3 сорта. Нерасчетные и неответственные конструкции в сооружениях IV и V классов допускается изготовлять из лесоматериалов ниже 3 сорта.

Применять лесоматериалы, пораженные гнилью, не допускается.

Дуб применяется в конструкциях, к которым предъявляются повышенные требования в отношении прочности и стойкости против загнивания.

Для несущих конструкций сооружений II, III и IV классов, находящихся в неблагоприятных условиях в отношении загнивания, рекомендуется применять лесоматериалы, пропитанные антисептиками, не растворяющимися в воде. При отсутствии пропитанных лесоматериалов должна быть произведена упрощенная пропитка или обмазка лесоматериалов антисептиками.

К конструкциям сооружений, находящимся в морской воде при наличии в ней древоточцев, должны применяться меры защиты в зависимости от степени активности древоточцев.

Объемные веса древесины (расчетные) принимаются согласно табл. 8—1 (см. также табл. 6—28).

Таблица 8—1

Породы древесины	Объемный вес древесины в *кг/м³*	
	полусухой	сырой
Хвойные		
Лиственница	700	800
Сосна	550	600
Ель, кедр, пихта кавказская, сосна Якутии и Кольского полуострова . .	500	550
Пихта сибирская	450	500
Лиственные		
Дуб	750	800
Бук	650	700

Объемные веса древесины конструкций, находящихся постоянно в воде, принимаются: сосны — 800 *кг/м³*, дуба — 1 000 *кг/м³*.

Таблица 8—2

Модули упругости древесины

Вид древесины	Модуль упругости в *кг/см²* при	
	растяжении и сжатии	изгибе
Для сырого леса	70 000	50 000
» полусухого леса . . .	90 000	70 000

Модуль упругости древесины в *кг/см²* при расчете на растяжение и сжатие вдоль волокон, а также на изгиб принимается независимо от породы древесины согласно данным табл. 8—2 (Модуль упругости при изгибе см [3].)

8—3. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Допускаемые напряжения для сосны 2 сорта приведены в табл. 8—3 в форме дробей, числители которых соответствуют допускаемым напряжениям для надводных конструкций из полусухих лесоматериалов, а знаменатели — для конструкций подводных и надводных из сырых лесоматериалов.

Таблица 8—3

Допускаемые напряжения для сосны 2 сорта в *кг/см²*

Вид напряжений	Условные обозначения допускаемых напряжений	Классы сооружения											Примечание
		II			III			IV			V		
		Воздействия											
		основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	
Изгиб, сжатие и смятие вдоль волокон	$[\sigma_{из}], [\sigma_{сж}], [\sigma_{см}]$	72 65	86 78	114 104	88 80	106 96	140 128	110 100	132 120	160 145	132 120	160 145	[1]При длине свободного конца элемента не менее его толщины и не менее 10 *см*, а также при расчете опорных плоскостей деревянных конструкций
Растяжение вдоль волокон	$[\sigma_р]$	60 55	73 65	97 88	75 68	90 82	120 109	94 85	112 102	135 123	112 102	135 123	
Сжатие и смятие поперек волокон по всей поверхности и в щековых врубках	$[\sigma_{сж}]_{90°}[\sigma_{см}]_{90°}$	11 10	13 12	18 16	13 12	15 14	21 19	16 15	20 18	24 22	20 18	24 22	
Смятие поперек волокон на части длины и в лобовых врубках[1]	$[\sigma_{см}]_{90°}$	18 16	21 19	28 26	22 20	26 24	35 32	27 25	33 30	40 36	33 30	40 36	
Скалывание при изгибе	$[\tau_{из}]$	13 12	15 14	21 19	15 14	19 17	25 23	20 18	24 22	29 26	24 22	29 26	[2]При учете длины скалывания не более двух толщин брутто элемента в направлении врезки и не более 10 глубин врезки
Скалывание в лобовых врубках и призматических шпонках[2]: вдоль волокон	$[\tau]$	7 6	9 8	11 10	9 8	11 10	14 13	11 10	13 12	15 14	13 12	15 14	
поперек волокон	$[\tau]_{90°}$	3,5 3	4,5 4	5,5 5	4,5 4	5,5 5	7 6,5	5,5 5	6,5 6	7,5 7	6,5 6	7,5 7	[3]При учете длины скалывания не более 5 толщин брутто элементов в направлении врезки и не более 10 глубин врезки
Скалывание вдоль волокон в щековых врубках[3]: в сопряжениях под углом $\alpha \leqslant 30°$	$[\tau]$	3,5 3	4,5 4	5,5 5	4,5 4	5,5 5	7 6,5	5,5 5	6,5 6	7,5 7	6,5 6	7,5 7	
то же, $\alpha > 30°$	$[\tau]$	3 2,5	3,5 3	4 3,5	3,5 3	4 3,5	5 4,5	4 3,5	4,5 4	5,5 5	4,5 4	5,5 5	
Перерезывание волокон	$[\tau_п]$	27 25	33 30	44 40	33 30	40 36	54 49	42 38	50 46	60 55	50 46	60 55	

Допускаемые напряжения смятия и скалывания силой, направленной к волокнам под углом α, определяются по формулам:

$$[\sigma_{см}]_\alpha = \frac{[\sigma_{см}]}{1 + \left(\frac{[\sigma_{см}]}{[\sigma_{см}]_{90°}} - 1\right)\sin^3\alpha};$$

$$[\tau]_\alpha = \frac{[\tau]}{1 + \left(\frac{[\tau]}{[\tau]_{90°}} - 1\right)\sin^2\alpha}, \qquad (8-1)$$

где $[\sigma_{см}]$ — допускаемое напряжение при смятии вдоль волокон;

$[\tau]$ — допускаемое напряжение при скалывании вдоль волокон;

$[\sigma_{см}]_{90°}$ — допускаемое напряжение при смятии поперек волокон;

$[\tau]_{90°}$ — допускаемое напряжение при скалывании поперек волокон.

При применении лесоматериалов 1 сорта допускаемые напряжения, приведенные в табл. 8—3, повышаются на 10%; при применении лесоматериалов 3 сорта они понижаются на 20%.

Для древесины различных пород, величины допускаемых напряжений, приведенные в табл. 8—3, должны быть умножены на коэффициенты табл. 8—4.

Таблица 8—4

Коэффициенты для вычисления допускаемых напряжений для древесины различных пород

Породы древесины	При расчете на		
	изгиб, сжатие, смятие и растяжение вдоль волокон	сжатие и смятие поперек волокон	скалывание и перерезывание
Сосна	1	1	1
Лиственница	1,2	1,2	1
Ель, сосна Якутии, пихта кавказская, кедр	0,9	0,9	0,9
Сосна и ель Кольского полуострова, пихта уральская и сибирская	0,8	0,8	0,8
Дуб	1,3	2	1,6
Бук	1	1,6	1,3

Для металлических частей, применяемых в деревянных конструкциях гидротехнических сооружений, допускаемые напряжения принимаются по табл. 8—5.

Таблица 8—5

Допускаемые напряжения для металлических частей в *кг/см²*

Вид напряжения	Прокатная сталь марок									
	Ст. 3					Ст. 2 и Ст. Ос				
	Классы сооружений									
	II, III			IV, V		II, III			IV, V	
	Воздействия									
	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные или основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные или основные, дополнительные и особые
Растяжение, сжатие и изгиб	1 400	1 700	1 950	1 600	1 950	1 200	1 450	1 700	1 400	1 700
Срез	1 050	1 250	1 450	1 200	1 450	900	1 100	1 250	1 050	1 250
Растяжение в болтах, одиночных тяжах и накладках	1 100	1 300	1 550	1 250	1 550	1 000	1 200	1 400	1 150	1 400
Растяжение в неодиночных тяжах, работающих совместно	900	1 100	1 250	1 050	1 250	800	950	1 100	950	1 100

8—4. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СОПРЯЖЕНИЙ

1. Центрально растянутые элементы

При расчете центрально растянутых элементов расчетная площадь (нетто) наиболее ослабленного поперечного сечения каждого элемента определяется путем вычета из общей площади сечения суммарной площади всех врубок и прочих ослаблений как рассматриваемого сечения, так и сечений, отстоящих от него на расстоянии менее 8-кратной глубины врубки или 8 диаметров отверстия.

Допускается производить расчет элементов конструкций в предположении возможности ступенчатого разрыва с учетом сопротивления древесины скалыванию между соседними ослаблениями.

При расчете центрально растянутых элементов напряжения проверяются по формуле:

$$\frac{N}{F_{нт}} \leqslant [\sigma_р], \qquad (8-2)$$

где N — растягивающая сила;

$F_{нт}$ — площадь сечения нетто, определяемая согласно предыдущему.

В несимметрично ослабленных растянутых элементах следует по возможности предотвращать возникновение изгибающего момента в ослабленном сечении посредством центрирования действующего в нем усилия или постановки связей. При соблюдении этих условий допускается не учитывать напряжения изгиба, возникающего от внецентренного действия растягивающего усилия.

2. Растяжение и изгиб

При одновременном действии растяжения и изгиба напряжения должны проверяться по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{F_{нт}} + \frac{M}{W_{нт}} \cdot \frac{[\sigma_р]}{[\sigma_{из}]} \leqslant [\sigma_р], \qquad (8-3)$$

где N — растягивающая сила;
M — изгибающий момент;
$F_{нт}$ — площадь сечения нетто, определяемая согласно п. 1;
$W_{нт}$ — момент сопротивления нетто наиболее ослабленного сечения;
$[\sigma_р]$ — допускаемое напряжение при растяжении;
$[\sigma_{из}]$ — допускаемое напряжение при изгибе.

3. Центрально сжатые цельные элементы

Центрально сжатые цельные элементы, помимо расчета на прочность по площади нетто по формуле:

$$\frac{N}{F_{нт}} \leqslant [\sigma_{сж}], \qquad (8-4)$$

должны проверяться на устойчивость при продольном изгибе по формуле:

$$\frac{N}{F\varphi} \leqslant [\sigma_{сж}]. \qquad (8-5)$$

При этом расчетная площадь F поперечного сечения элемента должна приниматься равной площади брутто, если площадь ослаблений не превышает 25% площади брутто. Если площадь ослабления превышает 25% площади поперечного сечения элемента брутто, то расчетная площадь поперечного сечения должна приниматься равной $^4/_3$ площади нетто.

При проверке на продольный изгиб коэффициент φ должен определяться в зависимости от наибольшей гибкости элемента $\lambda = \frac{l_0}{r_0}$, где l_0 — расчетная длина;

$r_0 = \sqrt{\frac{J_{бр}}{F_{бр}}}$ — радиус инерции поперечного сечения элемента, по приведенным ниже формулам:

при $\lambda \leqslant 75$

$$\varphi = 1 - 0{,}8\left(\frac{\lambda}{100}\right)^2; \qquad (8-6)$$

при $\lambda > 75$

$$\varphi = \frac{100}{\lambda^2}. \qquad (8-7)$$

Расчетная длина l_0 элемента при проверке на продольный изгиб должна приниматься согласно гл. 3 (п. 3—6).

4. Сжато-изогнутые цельные элементы

Сжато-изогнутые цельные элементы (несоставные) должны рассчитываться в плоскости изгиба по формуле:

$$\frac{N}{F_{нт}} + \frac{M}{\xi W_{нт}} \leqslant [\sigma_{сж}], \qquad (8-8)$$

где N — сжимающая сила;
M — изгибающий момент;
$F_{нт}$ — площадь сечения нетто;
$W_{нт}$ — момент сопротивления сечения нетто.
ξ — коэффициент (действителен в пределах от 1 до 0), учитывающий дополнительный момент от сжимающей силы при деформациях элемента:

$$\xi = 1 + \frac{\lambda^2}{3\,100} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{[\sigma_{сж}[}; \qquad (8-9)$$

$\sigma_{сж}$ — расчетное напряжение сжатия от сжимающей силы, вычисленное по площади брутто;
$[\sigma_{сж}]$ — допускаемое напряжение сжатия;
λ — наибольшая гибкость элемента.

Кроме указанного расчета, должна быть произведена проверка на устойчивость как в плоскости, так и из плоскости изгиба, без учета изгибающего момента.

Центрально сжатые и сжато-изогнутые составные элементы рассчитываются как цельные элементы, а проверка их на продольный изгиб производится согласно ГОСТ 2482-44 «Конструкции деревянные автодорожных мостов и труб. Нормы проектирования».

5. Врубки

Врубки должны рассчитываться на смятие и скалывание без учета работы металлических скреплений.

В лобовых врубках наименьшая допускаемая глубина врезки для брусьев и окантованных бревен — 2 *см*, для неокантованных бревен — 3 *см*. Наибольшая допустимая глубина врезки в опорном узле — $^1/_3$ толщины элемента, в промежуточных узлах сквозных ферм — $^1/_4$ толщины элемента. Наименьшая допустимая длина поверхности скалывания в лобовых врубках — 20 *см*.

Применение врубок с двойным зубом допускается только при условии точной пригонки гнезд.

Во врубках с двойным зубом глубина врезки второго от торца зуба должна быть больше глубины врезки первого зуба не менее чем на 2 *см*. Расчет на скалывание в этих случаях должен производиться:

а) для первого зуба — по усилию, воспринимаемому им, с понижением допускаемых напряжений на 20%;

б) для второго зуба — по полному усилию, действующему во врубке, без понижения допускаемых напряжений.

Учитываемая при расчете длина плоскости скалывания для каждого из зубьев не должна превышать 10-кратной глубины соответствующей врезки.

Во врубках, не обеспечивающих надежного прижатия скалываемого зуба (т. е. прижатия, автоматически возрастающего вместе с увеличением скалывающей силы) расчет на скалывание производится по допускаемым напряжениям для щековых врубок. Прижимающее усилие, создаваемое подтягиванием гаек болтов или хомутов, в работе сопряжений не учитывается.

6. Допускаемые прогибы

Прогибы деревянных конструкций от одновременного действия основных и дополнительных воздействий не должны превышать:

	Для сооружений II и III классов	Для сооружений IV и V классов
Для подвижных частей (затворов, шлюзных ворот и т. д.) ферм и составных прогонов	1/300 l	1/250 l;
Для простых прогонов	1/180 l	1/150 l,

где l—расчетный пролет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Близняк Е. В., Работа дерева в гидротехнических сооружениях, Стройиздат, 1936.
2. ГОСТ 3061-46 „Деревянные конструкции гидротехнических сооружений".
3. Лавринович Л. П., Работа дерева в гидротехнических сооружениях, Речиздат, 1947.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Данная глава составлена на основе ТУ и Н на проектирование металлических конструкций 1946 г., Указаний по проектированию стальных конструкций из стали марок НЛ1 и НЛ2 (У70-51), а также материалов проектирования затворов в конторе «Гидростальпроект» треста Гидромонтаж. Следует отметить, что впредь до введения в действие норм расчета стальных конструкций гидротехнических сооружений по расчетным предельным состояниям расчет их должен производиться по методу допускаемых напряжений, что и принято в данной главе.

9—1. МАТЕРИАЛЫ

Для металлических затворов применяются преимущественно мартеновские прокатные стали марки Ст. 3, которые должны удовлетворять требованиям группы А ГОСТ 380-50 с дополнительными гарантиями в отношении предела текучести и предельного содержания серы и фосфора, сталь для сварных конструкций — в отношении предельного содержания углерода, а также Ст. 3. мост, согласно ГОСТ 6713-53.

Примечания. 1. Сварные конструкции, подверженные воздействию динамических нагрузок и работающие при отрицательных температурах, должны изготовляться из мартеновской успокоенной стали.

2. Изготовление затворов из стали НЛ2 и других низколегированных сталей разрешается в случае специального обоснования.

Для вспомогательных нерасчетных элементов допускается применять немаркированную сталь, которую при использовании в сварных конструкциях необходимо предварительно испытать на свариваемость.

Для заклепок применяются стали марок Ст. 2 и Ст. 3, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 499-41, а в конструкциях из стали марки НЛ2 — заклепки изготовляются из стали марки НЛ1.

Стальное литье должно применяться из мартеновской стали (или электростали). Применение отливок из бессемеровских сталей допускается в случаях специального обоснования.

Для осей ходовых колес и других ответственных узлов затворов, испытывающих динамическую нагрузку, применяется Ст. 35у в соответствии с ГОСТ 1050-52. Для втулок ходовых колес и вкладышей шарнирных опор затворов с кратковременно работающими гнездами трения при непродолжительных циклах их работы и значительных паузах между циклами применяется лигнофоль[1]. В прочих случаях применяется бронза и баббит.

[1] Лигнофоль—слоистый древесный пластик пропитанный искусственной смолой, обладающий весьма малым коэффициентом трения при высоком сопротивлении сжатию

Для изготовления особо ответственных элементов (например, шаровых опорных шарниров сегментных затворов, бандажей и зубчатых реек вальцовых затворов и т. п.), работающих в тяжелых условиях и испытывающих высокие удельные давления, применяется легированная сталь марки 40Х, которая должна удовлетворять требованиям ГОСТ 4543-48.

Для уплотнений затворов применяется дерево, лигнофоль, резина специального профиля, армированная (брезентом) резина, прорезиненный брезент и др.

9—2. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Для металлических конструкций из прокатной стали допускаемые напряжения должны приниматься согласно табл. 9—1. Для механических деталей затворов из поковок или прокатной стали — согласно табл. 9—2.

Для штанг (тяг затворов) из прокатной стали допускаемые напряжения принимаются, как для механических деталей из поковок соответствующей марки стали согласно табл. 9—2.

Для отливок из углеродистой стали — согласно табл. 9—3.

Для сварных соединений — согласно табл. 9—4.

Для заклепочных и болтовых соединений — согласно табл. 9—5.

Величины допускаемых напряжений в таблицах (9—1) ÷ (9—5) даны для затворов II класса (классификация их по капитальности приведена в табл. 9—6). Коэффициент перехода от напряжений для II класса сооружений к напряжениям для сооружений I, III и IV классов — соответственно 0,85; 1,10 и 1,20, но допускаемое напряжение не должно превосходить 0,9 предела текучести.

Класс капитальности затвора устанавливается в зависимости от класса капитальности сооружения (см. табл. 7—5).

Допускаемые удельные давления для баббитов и бронзы устанавливаются специальными техническими условиями.

Допускаемое удельное давление для лигнофолевых втулок (вкладышей и пр.) при наличии водяной или густой минеральной смазки (сухое трение воспрещается) не должно превосходить 150 *кг/см*^{2}.

Допускаемые напряжения для деревянных элементов, входящих в состав металлических конструкций, см. гл. 8.

Ни в одном из расчетных случаев допускаемые на-

пряжения для металла не должны превосходить 0,9 от предела текучести применяемого материала, за исключением напряжений местного смятия. Эти напряжения принимаются равными пределу текучести материала для стали и половине наименьшего предела прочности при сжатии чугуна.

Таблица 9—1

Допускаемые напряжения в *кг/см²* для металлических конструкций из прокатной стали

Вид напряжения	Условные обозначения	Прокатная сталь марок					
		Ст. 3, Ст. 3 мост.			НЛ2		
		Воздействия					
		основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
Растяжение, сжатие и изгиб	$[\sigma_р]$ $[\sigma_{сж}]$ $[\sigma_{из}]$	1 600	1 800	2 100	2 250	2 500	2 900
Срез	$[\tau]$	1 000	1 100	1 300	1 350	1 550	1 800
Местное сжатие . . .	$[\sigma_{сж.м}]$	2 400	2 700	3 000	3 400	3 900	4 400

Примечания. 1. Для элементов, прикрепленных к косынкам только с одной стороны (например, для элемента, состоящего из одного уголка), приведенные величины допускаемых напряжений понижаются на 25%.

2. Местное сжатие относится к сжатию стенок балок от местной нагрузки.

Таблица 9—2

Допускаемые напряжения в *кг/см²* для механических деталей затворов из поковок или прокатной стали

Вид напряжения	Условные обозначения	Поковки или прокат из стали									Поковки или прокат из стали					
		Ст. 3			Ст. 5			НЛ2			Ст. 35у			Ст. 40Х		
		Воздействия														
		основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
Растяжение, сжатие и изгиб . .	$[\sigma_р]$ $[\sigma_{сж}]$ $[\sigma_{из}]$	1 000	1 100	1 250	1 200	1 350	1 500	1 400	1 600	1 800	1 300	1 450	1 700	3 500	3 900	4 400
Срез	$[\tau]$	650	700	800	750	850	950	900	1 000	1 150	850	950	1 100	2 250	2 500	2 800
Сжатие местное (см. примечание 1)	$[\sigma_{сж.м}]$	1 500	1 650	1 900	1 800	2 000	2 250	2 100	2 400	2 700	1 950	2 200	2 500	5 200	5 800	6 600
Смятие местное при плотном касании (см. примечание 2)	$\sigma_{см.м}]$	800	900	1 000	950	1 100	1 200	1 100	1 300	1 400	1 050	1 200	1 350	2 800	3 100	3 500
Растяжение проушин (см. примечание 3) . .	$[\sigma_п]$	1 200	1 400	1 800	1 450	1 700	2 200	1 800	2 100	2 700	1 500	1 750	2 300	4 200	4 700	5 300
Диаметральное сжатие катков при свободном касании . . .	$[\sigma_{д.с}]$	50	60	63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания. 1. Местное сжатие относится к сжатию стенок балок и малых участков поверхностей местной нагрузкой.

2. Смятие местное при плотном касании (удельное давление) относится к площади проекции поверхности касания малоподвижных шарниров.

3. Наибольшее допускаемое напряжение при расчете проушин на растяжение в неподвижных соединениях. В выдвижных осях (штанг и т. д.) или вращающихся цапфах допускаемые напряжения уменьшаются путем умножения на коэффициент 0,8.

Таблица 9—3

Допускаемые напряжения в *кг/см²* для отливок из углеродистой стали

Вид напряжения	Условные обозначения	Марки стали								
		35Л			25Л			55Л		
		Воздействия								
		основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
Растяжение, сжатие и изгиб	$[\sigma_р]$ $[\sigma_{сж}]$ $[\sigma_{из}]$	1 500	1 800	1 900	1 400	1 700	1 800	1 800	2 150	2 400
Срез	$[\tau]$	1 150	1 400	1 400	1 050	1 250	1 350	1 350	1 600	1 700
Сжатие местное (см. примечание 1)	$[\sigma_{сж.м}]$	2 250	2 700	2 800	2 100	2 500	2 600	2 700	3 250	3 400
Смятие местное при плотном касании (см. примечание 2)	$[\sigma_{см.м}]$	1 200	1 450	1 500	1 100	1 300	1 400	1 400	1 700	1 750
Растяжение проушин	$[\sigma_п]$	1 750	2 100	2 200	1 650	2 000	2 100	2 050	2 450	2 700
Диаметральное сжатие катков при свободном касании	$[\sigma_{д.с}]$	50	60	63						

Примечания. 1. Местное сжатие относится к сжатию стенок, балок и малых участков поверхностей местной нагрузкой.

2. Смятие местное при плотном касании (удельное давление) относится к площади проекции поверхности касания малоподвижных шарниров.

3. Наибольшее допускаемое напряжение при расчете проушин на растяжение в неподвижных соединениях. В выдвижных осях (штанг и т. д.) или вращающихся цапфах допускаемые напряжения уменьшаются путем умножения на коэффициент 0,8.

4. Допускаемые напряжения для механических деталей из стального литья должны быть понижены путем умножения на коэффициент 0,8.

Таблица 9—4

Допускаемые напряжения в *кг/см²* для сварных соединений при автоматической сварке под слоем флюса электродами Э-42

Вид напряжения	Условные обозначения	В конструкциях из сталей марок					
		Ст.3			НЛ2		
		основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
Сжатие	$[\sigma_{сж}]$	1 450	1 600	1 800	2 000	2 300	2 500
Растяжение	$[\sigma_р]$	1 300	1 450	1 600	1 800	2 050	2 250
Срез	$[\tau]$	1 100	1 250	1 500	1 550	1 800	1 950

Примечания. 1. Для монтажных швов и швов, выполняемых в полевых условиях, допускаемые напряжения понижаются на 10%.

2. Для потолочных швов допускаемые напряжения понижаются на 10% от соответствующих допускаемых напряжений для швов, указанных в настоящей таблице и примечании 1 к ней.

Допускаемые напряжения в *кг/см²* для заклепочных соединений из стали марок Ст. 2, Ст. 3 и НЛ1 и болтовых соединений из стали марок Ст. 3 и НЛ1 *Таблица 9—5*

Элементы соединения	Вид напряжений	Условные обозначения	В конструкциях из стали марок: Ст. 3 и Ст. 3 мост. — основные	Ст. 3 и Ст. 3 мост. — основные и дополнительные	Ст. 3 и Ст. 3 мост. — основные, дополнительные и особые	НЛ2 — основные	НЛ2 — основные и дополнительные	НЛ2 — основные, дополнительные и особые
Заклепки	Срез *B*	$[\tau_B]$	1 400	1 600	1 750	1 700	1 950	2 100
	Смятие *B*	$[\sigma_{см.B}]$	3 200	3 600	4 000	4 400	5 200	5 600
	Отрыв головок	$[\sigma_{отр}]$	900	1 100	1 100	1 200	1 450	1 450
Болты чистые точеные	Растяжение	$[\sigma_p]$	1 200	1 450	1 500	1 500	1 750	1 850
	Срез *B*	$[\tau_B]$	1 200	1 450	1 500	1 200	1 450	1 500
	Смятие *B*	$[\sigma_{см\cdot B}]$	3 200	3 600	4 000	4 400	5 200	5 600
Болты черные	Растяжение	$[\sigma_p]$	1 200	1 450	1 500	—	—	—
	Срез *B*	$[\tau_B]$	800	1 000	1 000	—	—	—
	Смятие *B*	$[\sigma_{см\cdot B}]$	2 000	2 200	2 500	—	—	—
Болты анкерные	Растяжение	$[\sigma_p]$	1 000	1 200	1 250	1 300	1 500	1 600

Примечания. 1. Для прочно-плотных швов приведенные в таблице напряжения должны быть понижены на 20%.

2. Срез и смятие В относятся к заклепкам и болтам, поставленным в отверстия:
   а) сверленные на проектный диаметр в собранных элементах;
   б) сверленные на проектный диаметр в отдельных деталях и элементах по кондукторам;
   в) сверленные или продавленные на меньший диаметр в отдельных деталях с последующей рассверловкой до проектного диаметра в собранных элементах.

3. Приведенные в таблице допускаемые напряжения смятия для заклепок соответствуют расстоянию вдоль усилия от последней заклепки до края элемента, равному 2 *d*, и шагу заклепки — 3 *d* (*d* — диаметр заклепки). В случае увеличения указанного расстояния и шага заклепок, допускаемые напряжения смятия увеличиваются пропорционально увеличению этого расстояния и шага заклепок, но не более чем на 25%.

4. Для заклепок с потайными и полупотайными головками допускаемые напряжения понижаются на 20%.

5. Для болтов из Ст. 5, из легированных сталей допускаемые напряжения устанавливаются специальными техническими условиями.

Таблица 9—6

Классы капитальности затворов

Назначение затворов	Классы капитальности сооружения: I	II	III	IV	V
	Классы капитальности затвора				
Основные (рабочие) затворы . .	I	II	II	III	IV
Аварийные затворы	II	III	III	IV	IV
Ремонтные и строительные затворы	III	III	IV	IV	IV

Примечание. Класс капитальности затвора может быть изменен согласно пп. 3, 9, 10, 11 ГОСТ 3315-46.

При расчете на изгиб от местной нагрузки за расчетную толщину стальной обшивки затворов должна приниматься конструктивная толщина, уменьшенная на 1 *мм* (износ, ржавление, неточность изготовления листовой стали). При наличии агрессивных вод или железных бактерий в воде величина запаса на износ и ржавление по толщине обшивки должна быть указана в специальных технических условиях.

В центрально сжатых элементах при проверке их на продольный изгиб величины допускаемых напряжений уменьшаются введением коэффициента φ, значения которого даны в табл. 9—11.

При расчете закладных частей допускаемые напряжения на осевое сжатие бетона (призменная прочность) принимаются согласно гл. 10. Из условия обеспечения сцепления растянутых анкерных болтов с бетоном длина заделываемого в бетон прямого участка анкерного болта должна быть не менее 20 его диаметров.

Превышение расчетных напряжений над допускаемыми во всех случаях не должно составлять более 5%.

9—3. РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Сварные соединения

Сварные соединения рассчитываются на соответствующие силы по формулам табл. 9—7, допускаемые напряжения принимаются согласно табл. 9—4.

Сварные соединения, работающие одновременно на нормальные силы и срез, в том числе косые швы центрально нагруженных элементов, проверяются на нормальные и срезывающие силы отдельно. Швы встык, работающие на изгиб, рассчитываются по формулам, установленным для целого сечения; допускаемые напряжения принимаются согласно табл. 9—4.

Сварные швы должны быть расположены таким образом, чтобы в конструкции при сварке возникали возможно меньшие усадочные напряжения и деформации. Типы конструкций и положение швов необходимо предусматривать такие, чтобы в процессе сварки приходилось как можно меньше кантовать конструкцию. Не следует применять рабочие швы толщиной менее 6 *мм*, уплотнительные швы — менее 4 *мм*, а также прерывистые швы. Механическая обработка торцов элементов (острожка, фрезерование) в сварных конструкциях не допускается и должна заменяться односкосными или двускосными сварными швами. Не следует допускать применения комбинированных соединений, в которых часть усилия воспринимается заклепками, а часть — сварными швами.

Таблица 9—7

Формулы для расчета напряжений в сварных соединениях

Вид напряжения	Расчетная формула
Растяжение швов встык	$\frac{N}{l_ш \delta} \leqslant [\sigma_р]$ (9—1)
Сжатие швов встык	$\frac{N}{l_ш \delta} \leqslant [\sigma_{сж}]$ (9—2)
Срез валиковых швов (независимо от направления силы)	$\frac{N}{0{,}7\, h_ш l_ш} \leqslant [\tau]$ (9—3)
Растяжение косых швов встык	$\frac{N}{l_ш \delta} \sin\alpha \leqslant [\sigma_р]$ (9—4)
Сжатие косых швов встык	$\frac{N}{l_ш \delta} \sin\alpha \leqslant [\sigma_{сж}]$ (9—5)
Срез косых швов встык	$\frac{N}{l_ш \delta} \cos\alpha \leqslant [\tau]$ (9—6)

Обозначения.
$l_ш$ — расчетная длина шва, равная проектной длине за вычетом 10 *мм*;
δ — наименьшая толщина соединяемых элементов;
$h_ш$ — толщина валикового шва (по катету);
α — угол между направлением действующей силы и косым швом;
N — расчетное усилие в элементе.

2. Заклепочные и болтовые соединения

Заклепочные и болтовые соединения рассчитываются на соответствующие силы по формулам табл. 9—8; допускаемые напряжения принимаются согласно табл. 9—5.

Таблица 9—8

Вид напряжения	Расчетная формула
Срез заклепок и болтов	$\frac{N}{mnF_{бр}} \leqslant [\tau_{ср}]$ (9—7)
Смятие заклепок и болтов	$\frac{N}{nd\Sigma\delta} \leqslant [\sigma_{см}]$ (9—8)
Отрыв головок заклепок	$\frac{N}{nF_{бр}} \leqslant [\sigma_{отр}]$ (9—9)
Растяжение болтов	$\frac{N}{nF_{нт}} \leqslant [\sigma_р]$ (9—10)

Обозначения.
d — диаметр заклепки или болта;
m — число рабочих срезов одной заклепки или болта;
n — число заклепок или болтов в соединении;
$F_{бр}$ — площадь отверстия для заклепки или площадь сечения стержня болта брутто;
$F_{нт}$ — площадь сечения стержня болта нетто (по нарезке);
$\Sigma\delta$ — наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении;
N — расчетное усилие в элементе.

Таблица 9—9

Разбивка заклепок и болтов

Нормируемый размер	Направление	Ряд	Вид усилия	Максимальные расстояния	Минимальные расстояния
Между центрами заклепок и болтов	В любом направлении	Крайний ряд при наличии окаймляющего уголка и средний ряд	Растяжение	$16d$ или 24δ	$3d$ для заклепок
			Сжатие	$12d$ или 18δ	
		Крайний ряд при отсутствии окаймляющего уголка	Растяжение и сжатие	$8d$ или 12δ	$3{,}5\,d$ для болтов
От центра заклепки или болта до края элемента	Вдоль усилия				$2d$
То же, при обрезных кромках	Поперек усилия	В любом ряду	Растяжение и сжатие	$4d$ или 8δ	$1{,}5\,d$
То же, при прокатных кромках	То же				$1{,}2\,d$

Обозначения. δ — толщина самого тонкого наружного элемента пакета;
d — диаметр отверстия для заклепки или болта.

Заклепки и болты, работающие одновременно на срез и растяжение, проверяются отдельно на срез и растяжение. Заклепки рассчитываются по диаметру отверстия. Болты рассчитываются на растяжение — по площади нетто (по нарезке), на срез и смятие — по диаметру болтов.

В креплениях одного элемента к другому через прокладки или иные промежуточные элементы, а также в прикреплениях с односторонней накладкой число заклепок (болтов) увеличивается против расчета на 10%. В рабочих элементах конструкций число заклепок, прикрепляющих элемент в узле или расположенных по одну сторону стыка, должно быть не менее двух. Толщина склепываемого пакета, как правило, не должна превосходить пяти диаметров заклепки. В пределах одного элемента необходимо применять по возможности заклепки одного диаметра, а в целой конструкции не более двух-трех диаметров.

Разбивка заклепок и болтов должна производиться согласно табл. 9—9. В стыках и узлах заклепки и болты надлежит размещать на минимальных расстояниях; соединительные заклепки и болты размещают, как правило, на максимальных расстояниях.

9—4. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1. Центральное растяжение и сжатие

Элементы конструкций, работающие на центральное растяжение и центральное сжатие, рассчитываются по формулам табл. 9—10.

Таблица 9—10

Расчетная формула	Область применения
$\frac{N}{F_{нт}} \leqslant [\sigma]$ (9—11)	Центральное растяжение и сжатие
$\frac{N}{\varphi F_{бр}} \leqslant [\sigma]$ (9—12)	Центральное сжатие

Обозначения.
N — нормальная сила в рассматриваемом сечении;
φ — наименьший коэффициент понижения допускаемых напряжений при продольном изгибе центрально сжатых элементов, определяемый по табл. 9—11.

Таблица 9—11

Гибкость элемента λ	Коэффициент φ			Гибкость элемента λ	Коэффициент φ		
	Ст. 0, Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4	Ст. 5. НЛ1	НЛ2		Ст. 0 Ст. 2 Ст. 3 Ст. 4	Ст. 5 НЛ1	НЛ2
0	1,00	1,00	1,00	110	0,52	0,43	0,39
10	0,99	0,98	0,98	120	0,45	0,38	0,33
20	0,97	0,95	0,95	130	0,40	0,32	0,29
30	0,95	0,93	0,93	140	0,36	0,28	0,26
40	0,92	0,90	0,90	150	0,32	0,27	0,23
50	0,89	0,84	0,83	160	0,29	0,24	0,21
60	0,86	0,80	0,78	170	0,26	0,21	0,19
70	0,81	0,74	0,71	180	0,23	0,19	0,17
80	0,75	0,66	0,63	190	0,21	0,17	0,15
90	0,69	0,59	0,54	200	0,19	0,16т	0,14
100	0,60	0,50	0,45				

2. Внецентренное растяжение и сжатие

Элементы конструкций, работающие на внецентренное растяжение и сжатие, рассчитываются по формулам табл. 9—12.

Таблица 9—12

Расчетная формула	Область применения
$\frac{N}{F_{нт}} \pm \frac{M}{W_{нт}} \leqslant [\sigma]$ (9—13)	Внецентренное растяжение и внецентренное сжатие
$\frac{N}{\varphi_м F_{бр}} + \frac{M}{W_{бр}} \leqslant [\sigma]$ (9—14)	Внецентренное сжатие. Проверка в плоскости действия момента
$\frac{N}{K\varphi F_{бр}} \leqslant [\sigma]$ (9—15)	Внецентренное сжатие. Проверка в плоскости, перпендикулярной плоскости действия момента
$\frac{N}{\varphi_{вн} F_{бр}} \leqslant [\sigma]$ (9—16)	Допускается при внецентренном сжатии наряду с формулой (9—14), дает более точное значение

Обозначения.

$\varphi_м$ — коэффициент понижения допускаемых напряжений при продольном изгибе в плоскости действия момента, определяемый по табл. 9—11;

φ — наименьший коэффициент понижения допускаемых напряжений при продольном изгибе, определяемый по табл. 9—11;

$\varphi_{вн}$ — коэффициент понижения допускаемых напряжений внецентренно сжатых элементов, определяемый по табл. 9—13;

K — коэффициент влияния момента на устойчивость внецентренно сжатых элементов, определяемый для симметричных двутавровых и швеллерных сечений по табл. 9—14, а для прочих сечений—по формулам (9—17) и (9—18);

M — расчетный момент;

$W_{нт}$ — момент сопротивления сечения элемента нетто;

$W_{бр}$ — момент сопротивления сечения элемента брутто.

При расчете на внецентренное растяжение и сжатие:
1) если изгиб происходит в плоскости наибольшей гибкости, проверка по формуле (9—15) не производится;
2) для несимметричных одностенчатых (двутавровых, тавровых) сечений, имеющих только одну ось симметрии, проходящую в плоскости стенки, коэффициент K определяется по формуле:

$$K = \frac{J_1}{J_1 + J_2}\left(\frac{J_2}{J_1}\alpha + \frac{1}{1 + \frac{M}{N}\cdot\frac{F_{бр}}{W_{бр}}}\right), \quad (9—17)$$

где α — коэффициент, значения которого даны в табл. 9—14.

Таблица 9—13

Коэффициенты $\varphi_{вн}$ понижения допускаемых напряжений при расчете внецентренно сжатых элементов по формуле (9—16)

m	λ													
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
0	0,96	0,94	0,92	0,89	0,86	0,81	0,75	0,69	0,60	0,45	0,36	0,29	0,23	0,19
0,2	0,79	0,78	0,76	0,73	0,70	0,66	0,61	0,57	0,51	0,41	0,33	0,27	0,22	0,18
0,4	0,68	0,67	0,65	0,63	0,60	0,56	0,53	0,49	0,45	0,37	0,31	0,25	0,21	0,17
0,6	0,60	0,59	0,57	0,55	0,53	0,50	0,47	0,44	0,40	0,34	0,28	0,24	0,20	0,17
0,8	0,53	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45	0,42	0,40	0,37	0,31	0,27	0,22	0,19	0,16
1,0	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,41	0,38	0,36	0,34	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16
1,2	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34	0,31	0,28	0,24	0,20	0,17	0,15
1,4	0,40	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,33	0,31	0,29	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15
1,6	0,37	0,37	0,36	0,35	0,34	0,32	0,31	0,30	0,28	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14
1,8	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14
2,0	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,24	0,22	0,20	0,17	0,15	0,13
2,5	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12
3,0	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12
3,5	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,18	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11
4,0	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10
5	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
7	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08
10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06
20	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Обозначения. λ — гибкость стержня в плоскости изгиба: $\lambda = \frac{l_0}{r_0}$, где l_0 — расчетная длина стержня; r_0 — радиус инерции $r_0 = \sqrt{\frac{J_{бр}}{F_{бр}}}$; $J_{бр}$ — момент инерции сечения брутто; $F_{бр}$ — площадь сечения стержня брутто; $m = \frac{M}{N} \cdot \frac{F_{бр}}{W_{бр}}$ — относительный эксцентриситет в плоскости изгиба.

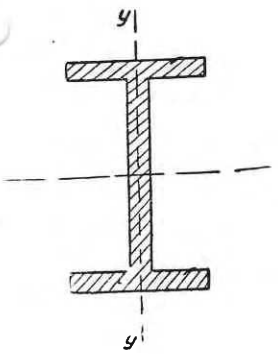
Примечание. При значениях $m > 20$ проверка внецентренно сжатых элементов производится по формулам (9—13) —(9—15).

Таблица 9—14

Таблица значений коэффициентов α и K

$\frac{M_{max}}{Nh}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5 и более
α — для любых сечений	1,0	0,90	0,75	0,61	0,51	0,44	0,39	0,34	0,31	0,27	0,24	0,21
K — для симметричных двутавровых и швеллерных сечений	1,0	0,78	0,62	0,51	0,42	0,36	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,17

Обозначение. h — высота сечения.



Фиг. 9—1

J_1 — момент инерции наиболее сжатой полки относительно оси наименьшей жесткости сечения стержня (оси y—y, см. фиг. 9—1);

J_2 — то же, для другой полки;

$W_{бр}$ — момент сопротивления брутто всего сечения для наиболее сжатого волокна;

3) для коробчатых, трубчатых и аналогичных замкнутых и двухстенчатых сечений с решетками и планками коэффициент K определяется по формуле:

$$K = 0{,}5\left(1 + \frac{1}{1 + \frac{M}{N} \cdot \frac{F_{бр}}{W_{бр}}}\right). \qquad (9—18)$$

3. Изгиб

Элементы конструкций, работающие на изгиб, рассчитываются по формулам табл 9—15.

Таблица 9—15

Расчетная формула	Область применения
$\frac{M}{W_{нт}} \leqslant [\sigma]$ (9—19) $\frac{QS_{бр}}{J_{бр}\delta} \leqslant [\tau]$ (9—20)	При проверке на прочность

Для клепаных двутавровых балок разрешается принимать $W_{нт} = 0{,}85\, W_{бр}$.

4. Допускаемая гибкость

Таблица 9—16

Наименование конструкций	Элементы конструкций	Допускаемое значение гибкости элементов λ не более
Фермы	Стойки, передающие опорные реакции, пояса, опорные раскосы	120
	Прочие элементы	150
Связи	Все элементы	200

Таблица 9—17

Наименование конструкций	Элементы конструкций	Допускаемое значение гибкости λ для	
		элементов, подвергающихся непосредственному действию динамической нагрузки	элементов, подвергающихся действию статической нагрузки
Фермы	Пояса и опорные раскосы	250	400
	Прочие элементы	350	400
Связи	Все элементы (кроме тяжей)	400	400

Гибкости сжатых элементов конструкций не должны превышать значений, приведенных в табл. 9—16.

Значения гибкости растянутых элементов конструкций принимаются не более значений, приведенных в табл. 9—17.

При расчете на основные нагрузки разрезных балок из прокатных профилей (двутавров, швеллеров), предохраненных от потери общей устойчивости и несущих статическую нагрузку, момент сопротивления W в формуле (9—19) табл. 9—15 принимается увеличенным на 15%.

В расчетах конструкций модуль продольной упругости в $кг/см^2$ принимается:
для прокатной стали и стального литья всех марок . . . . . $E = 2{,}1 \cdot 10^6$
» модифицированного чугунного литья . $E = 1 \cdot 10^6$
» чугунного литья марок СЧ 12-28 и СЧ 15-32 . . . . . $E = 0{,}85 \cdot 10^6$

Модуль сдвига для прокатной стали $G = 0{,}84 \cdot 10^6$ $кг/см^2$.

Коэффициенты линейного расширения металла принимаются:

для прокатной стали . . . . . $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$
» стального литья . . . . . $\alpha = 10{,}6 \cdot 10^{-6}$
» чугунного » . . . . . $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ[1]

10—1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Общие указания составлены на основе следующих материалов:

ГОСТ 4286-48 «Конструкции бетонные и железобетонные гидротехнических сооружений. Нормы и технические условия проектирования»; «Инструкция по проектированию железобетонных конструкций с несущими арматурными каркасами» (И 16-51); «Технические условия на изготовление и установку арматуры и армоконструкций в гидротехнических сооружениях» (ТУ 19-51); решение совещания по проектированию железобетонных гидротехнических сооружений, организованное Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом строителей (ВНИТО) в 1952 г.

Приводимые ниже данные распространяются на бетонные, малоармированные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений.

Требования к материалам для приготовления гидротехнических бетонов и к гидротехническим бетонам устанавливаются в соответствии с ГОСТ 4795-53.

Надводные конструкции гидротехнических сооружений, не подверженные агрессивному воздействию воды, проектируются по нормам, применяемым для промышленного и гражданского строительства (см. СНиП, гл. II-Б.3). Гидротехнические бетонные, армобетонные и железобетонные сооружения I класса капитальности при наличии особых требований могут проектироваться по специальным нормам и техническим условиям. Классификация сооружений производится согласно СНиП (см. гл. седьмую Справочника).

Расчетные пределы прочности бетона принимаются согласно табл. 10—1.

Таблица 10—1

Расчетные пределы прочности бетона в *кг/см²*

Род усилий	Марка бетона								
	90	110	140	170	200	250	300	400	500
Сжатие осевое (призменная прочность) $\sigma_{пр}$ . . .	72	88	108	125	145	175	200	260	310
Сжатие при изгибе $\sigma_{и}$	90	110	135	155	180	220	250	325	390
Растяжение осевое $\sigma_{р}$	10	11,5	13,5	15,5	17	20	22,5	27	31
Растяжение при изгибе $\sigma_{р.и}$	17	19	22	26	28	33	37	44	52

Примечание. Для бетонных и малоармированных конструкций применяются бетоны следующих марок (по прочности): 90, 110, 140, 170, 200 и 250.

Объемный вес бетона и малоармированного бетона принимается (при отсутствии экспериментальных данных) по табл. 10—2. При рабочем проектировании сооружений I и II классов, устойчивость которых обеспечивается весом бетона, его объемный вес надлежит определять опытным путем.

Таблица 10—2

Объемный вес бетона и малоармированного бетона в *кг/м³*

Характеристика крупного заполнителя	Бетон не вибрированный	Бетон вибрированный
Щебень известняковый или гравий	2 200	2 300
Щебень из песчаника . .	2 300	2 400
„ „ изверженных пород	2 400	2 500

Объемный вес железобетона определяется путем увеличения объемного веса бетона на $^2/_3$ веса арматуры в 1 $м^3$ бетона.

Модули упругости бетона принимаются по табл. 10—3.

[1] В данной главе расчет приводится по действующему ГОСТ 4286-48, так как нормы проектирования гидротехнических бетонных и железобетонных конструкций, подлежащие разработке на основе СНиП еще не составлены.

Таблица 10—3

Модули упругости бетона в *кг/см²*

Наименование конструкций	Марка бетона								
	90	110	140	170	200	250	300	400	500
Бетонные и сжатые железобетонные конструкции	180 000	200 000	230 000	260 000	290 000	320 000	340 000	380 000	410 000
Изгибаемые и растянутые железобетонные конструкции	—	125 000	140 000	160 000	180 000	200 000	210 000	240 000	260 000

Постоянные величины физических характеристик бетонных и железобетонных конструкций:

коэффициент бокового расширения . . 1/6
„ линейного расширения . . 0,00001
„ укорочения от усадки для бетонных конструкций 0,0002
коэффициент укорочения от усадки для железобетонных конструкций . . 0,00015

Гибкая и жесткая арматура применяется из сталей марок Ст. 3 и Ст. 0с, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 380-50 и ГОСТ 535-52.

Для арматуры допускается применять обезличенную сталь, если по данным испытаний механические свойства такой стали не ниже, чем для стали марки Ст. 0с.

Расчетный предел текучести арматуры принимается равным 2 500 *кг/см²*.

Модуль упругости арматуры принимается 2 100 000 *кг/см²*.

При проектировании арматурных конструкций и арматуры в железобетонных сооружениях следует широко применять горячекатанную арматуру периодического профиля в качестве растянутой и сжатой арматуры взамен обычной гладкой круглой арматуры из сталей Ст. 0с. и Ст. 3 в тех случаях, когда по расчету полностью используется расчетный предел текучести.

В первую очередь рекомендуется применять горячекатанную арматуру периодического профиля в более сильно армированных конструкциях, где переход на такую арматуру дает наибольший эффект.

Примечание. Данное указание относится и к тем конструкциям, которые рассчитываются на предупреждение появления трещин, поскольку, как правило, количество арматуры в таких конструкциях определяется из расчета по стадии разрушения в предположении полного использования ее расчетного предела текучести.

Горячекатанная арматура периодического профиля не должна применяться в следующих случаях:

а) когда арматура является конструктивной, т. е. не используется полностью ее расчетный предел текучести;

б) для монтажной (нерабочей) арматуры;

в) при бетоне марки 90 и ниже (в малоармированных конструкциях).

Взамен горячекатанной арматуры периодического профиля допускается применение холодносплющенной арматуры при условии, если стыки этой арматуры несварные.

При применении в железобетонных конструкциях арматуры из стали марки Ст. 3 рекомендуется для сжатых и внецентренно сжатых (по второму случаю) элементов из бетона марки 140 и для всех конструкций из бетона марки 170 и выше расчетный предел текучести стали марки Ст. 3 принимать 2 850 вместо 2 500 *кг/см²*.

Арматуру сборных конструкций рекомендуется проектировать струнной, а также учитывать целесообразность изготовления ее предварительно напряженной.

Арматуру малоармированного бетона следует применять с пониженными коэффициентами запаса.

10—2. БЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1. Общие указания

Бетонными называются конструкции без арматуры или с содержанием ее менее 0,05% площади расчетного сечения бетона, относя это содержание:

а) к арматуре растянутой зоны элементов, сечение которых определяется по прочности растянутой зоны;

б) ко всей арматуре элементов, сечение которых определяется по прочности сжатой зоны бетона.

При определении деформаций и перемещений в расчет вводятся площади и моменты инерции сечений полностью с учетом сжатого и растянутого бетона.

Расчет сечений бетонных конструкций на прочность (кроме конструкций, для расчета которых необходимо определение напряжений, см. ниже) производится по стадии разрушения с учетом сопротивления растянутой зоны бетона.

Расчет бетонных конструкций на предупреждение появления трещин производится дополнительно к расчету на прочность только для того случая внецентренного сжатия, когда в растянутой зоне бетона возможно появление трещин до достижения предела прочности в сжатой зоне.

Бетонные конструкции, для расчета которых необходимо определение напряжений, возникающих от действия расчетных нагрузок (например, массивные конструкции гравитационного типа, туннельные облицовки и т. д.), рассчитываются по допускаемым напряжениям.

Величины допускаемых напряжений определяются путем деления пределов прочности бетона, указанных в табл. 10—1, на соответствующие коэффициенты запаса, указанные в табл. 10—4.

При расчете бетонных конструкций, имеющих горизонтальные или ступенчатые швы бетонирования, должно учитываться давление воды в шве.

Таблица 10—4

Коэффициенты запаса k для бетонных конструкций

Предупреждаемые причины разрушения бетона	Классы капитальности сооружений											
	I			II			III			IV, V		
	Комбинации сил и нагрузок											
	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
1. Достижение предела прочности при сжатии	2,5	2,3	2,0	2,3	2,1	1,8	2,1	1,9	1,7	2,0	1,8	1,7
2. Достижение предела прочности при растяжении . . .	4,4	4,0	3,3	4,0	3,6	3,0	3,6	3,3	2,8	3,3	3,0	2,8

Примечание. При расчете сооружений V класса учет особых сил и нагрузок не производится.

2. Центральное сжатие

Расчет центрально сжатых элементов на прочность производится по формуле:

$$kN = N_p = \varphi \sigma_{пр} F, \qquad (10—1)$$

где N — допускаемая продольная сжимающая сила;
N_p — разрушающая продольная сжимающая сила;
F — площадь поперечного сечения элемента.

Коэффициент запаса k принимается по табл. 10—4, п. 1; коэффициент продольного изгиба φ принимается по табл. 10—5.

Таблица 10—5

Коэффициенты продольного изгиба для бетонных конструкций

$\frac{l_0}{b}$	$\frac{l_0}{r}$	φ	$\frac{l_0}{b}$	$\frac{l_0}{r}$	φ	$\frac{l_0}{b}$	$\frac{l_0}{r}$	φ
4	14	0,98	14	49	0,77	24	83	0,55
6	21	0,96	16	56	0,72	26	90	0,51
8	28	0,91	18	63	0,68	28	97	0,47
10	35	0,86	20	70	0,63	30	104	0,44
12	42	0,82	22	76	0,59	32	111	0,41

Обозначения. b — ширина прямоугольного сечения; r — радиус инерции сечения,

Расчетная длина элемента l_0 определяется умножением его действительной длины на коэффициент ψ, зависящий от степени защемления и подвижности концов элементов.

Значения коэффициента ψ для стен и колонн принимаются равными:

при полном защемлении обоих концов . .	0,5
„ „ „ одного конца и шарнирно-неподвижном закреплении другого	0,7
при шарнирно-неподвижном закреплении обоих концов	1,0
при полном защемлении одного конца и свободном другом	2,0

3. Изгиб

Расчет изгибаемых элементов на прочность производится по формуле:

$$kM = M_p = \sigma_{р.и} W, \qquad (10—2)$$

где M — допускаемый изгибающий момент;
M_p — разрушающий изгибающий момент;
W — момент сопротивления полного поперечного сечения бетона для крайнего растянутого волокна рассчитываемого элемента.

Коэффициент запаса k принимается по табл. 10—4, п. 2.

4. Внецентренное сжатие

Расчет внецентренно сжатых элементов на прочность сжатой зоны сечения производится по формуле:

$$0{,}8\frac{M}{W_1} + \frac{N}{F} = \varphi \frac{\sigma_{пр}}{k}, \qquad (10—3)$$

где W_1 — момент сопротивления полного поперечного сечения бетона для крайнего сжатого волокна.

Коэффициент запаса k принимается по табл. 10—4, п. 1, коэффициент φ продольного изгиба принимается по табл. 10—5.

Расчет внецентренно сжатых элементов на прочность растянутой зоны сечения производится:

при $\frac{e_ц}{h} \leqslant 1$ по формуле

$$\frac{M}{W} - \frac{N}{F} = \frac{\sigma_{р.и}}{k}; \qquad (10—4)$$

при $\frac{e_ц}{h} > 1$ по формуле

$$\frac{M}{W} - 1{,}67\frac{N}{F} = \frac{\sigma_{р.и}}{k}. \qquad (10—5)$$

k—коэффициент запаса, принимается по табл. 10—4, п. 2;

$e_ц$ — эксцентриситет точки приложения продольной силы N относительно центра тяжести сечения.

Примечание. Вследствие наличия двух различных формул (10—4) и (10—5) для расчета внецентренно сжатых бетонных конструкций (при различных эксцентриситетах нормальной силы) при их применении получаются противоречивые результаты.

Формула (10—4) дает, повидимому, излишние запасы прочности в сечениях и менее обоснована (см. [1]).

5. Указания по конструированию

Проектом должна предусматриваться разрезка кладки бетона швами и порядок бетонирования.

Швы бетонных конструкций подразделяются на:

а) постоянные (осадочные и усадочно-температурные швы), предназначаемые для обеспечения возможности взаимных перемещений частей сооружения как во время строительства, так и во время эксплуатации;

б) временные строительные швы, устраиваемые для разрезки бетонной кладки на блоки либо для временного обеспечения возможности взаимных перемещений частей сооружения вследствие усадки, тепловыделения при твердении бетона и температурных воздействий, либо вследствие невозможности бетонирования сооружения без перерыва (швы бетонирования). Постоянные швы должны иметь уплотнение, доступное для ремонта.

Расстояние между постоянными швами должно приниматься в зависимости от размеров сооружения, марки бетона, климатических условий, необходимой степени свободы взаимных перемещений, характера основания сооружения и пр.

Временные швы следует снабжать с напорной стороны уплотнениями упрощенного типа. В конструкциях, в которых имеет место работа бетона на растяжение, временные швы бетонирования следует располагать в наименее напряженных сечениях. В случае устройства их в напряженных сечениях бетон, примыкающий к шву, следует усиливать арматурой.

10—3. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1. Общие указания

К железобетонным относятся конструкции с содержанием арматуры:

а) В растянутой зоне элементов изгибаемых, внецентренно растянутых, а также внецентренно сжатых, рассчитываемых по случаю I (см. п. 5) — не менее количества арматуры, указанного в табл. 10—6.

Таблица 10—6

Содержание арматуры в железобетонных конструкциях

Марка бетона	110 140	170 200	250	300	400	500
Сечение арматуры в % (от площади расчетного сечения бетона)	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45

Если расчетная марка бетона (по прочности) фактически заменяется более высокой маркой (например, по требованию водонепроницаемости, морозостойкости и т. д.), наименьшее содержание арматуры должно соответствовать расчетной марке бетона по прочности.

б) В элементах центрально сжатых, а также внецентренно сжатых, рассчитываемых по случаю II (см. п. 5) — суммарно не менее 0,5% площади расчетного сечения бетона независимо от его марки.

При определении деформаций и перемещений площади и моменты инерции сечений вводятся в расчет полностью с учетом сжатого и растянутого бетона (без учета арматуры). Усилия, возникающие в элементах железобетонных конструкций, определяются как для однородного упругого тела.

Расчет сечений на прочность, как правило, производится по стадии разрушения без учета сопротивления растянутой зоны бетона.

Лишь железобетонные конструкции, для расчета которых необходимо определение напряжений (например, контрфорсы плотин, туннельные облицовки и т. д.), рассчитываются по допускаемым напряжениям. Величины последних определяются делением пределов прочности бетона (табл. 10—1) и предела текучести арматуры (п. 10—1) на коэффициенты запаса, указанные в табл. 10—7.

Расчет на прочность следует производить для всех железобетонных конструкций.

Для тех конструкций, в которых образование трещин недопустимо по условиям водонепроницаемости и долговечности, должен производиться расчет на предупреждение появления трещин.

Примечание. Совещание при ВНИТО строителей в 1952 г. /1] по данному вопросу постановило:

а) вследствие того что трещиноустойчивость является основным условием долговечности ответственных бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений, необходимо дальнейшее срочное развитие работ научно-исследовательских институтов по изучению вопросов образования и раскрытия трещин в гидротехническом бетоне и железобетоне и, в частности, по определению прочности при растяжении бетонов в воде и при наличии фильтрации;

б) целесообразно разработать классификацию железобетонных гидротехнических сооружений по условиям их работы и по опасности появления трещин, учитывая размеры возможных трещин, опасных и неопасных для долговечности бетона и железобетона.

При расчете конструкций на предупреждение появления трещин величина отношения модуля упругости арматуры к модулю упругости бетона n принимается по табл. 10—8.

Поверка жесткости производится для конструкций, подверженных вибрации, а также когда величина деформации (прогиба) имеет существенное значение для эксплуатации сооружения.

При расчете конструкций, имеющих горизонтальные или ступенчатые швы бетонирования, необходимо учитывать давление воды в швах, а в конструкциях, не

Таблица 10—7

Коэффициенты запаса k в железобетонных конструкциях

Предупреждаемые причины разрушения железобетона	Классы капитальности сооружений											
	I			II			III			IV, V		
	Комбинации сил и нагрузок											
	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые	основные	основные и дополнительные	основные, дополнительные и особые
1. Достижение бетоном предела прочности при сжатии или арматурой предела текучести:												
а) в сжатых элементах (бычках, колоннах, арках)	2,2	2,0	1,8	2,0	1,8	1,6	1,8	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6
б) в остальных элементах	2,0	1,8	1,6	1,8	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
2. Достижение бетоном предела прочности при растяжении	1,35	1,3	1,25	1,3	1,25	1,2	1,25	1,2	1,2	1,25	1,2	1,2
3. Достижение бетоном предела прочности при растяжении (главные напряжения):												
а) при отсутствии косых стержней и хомутов . .	3,3	3,0	2,7	3,0	2,7	2,4	2,8	2,5	2,2	2,6	2,3	2,0
б) при наличии косых стержней и хомутов . .	1,35	1,3	1,25	1,3	1,25	1,2	1,25	1,2	1,2	1,25	1,2	1,2

Примечание. При расчете сооружений V класса учет особых сил и нагрузок не производится.

рассчитываемых на предупреждение появления трещин, — давление воды в трещинах (если в данной конструкции вообще возможна фильтрация воды по рассматриваемым швам или трещинам).

Таблица 10—8

Отношения n модуля упругости арматуры к модулю упругости бетона

Бетоны марок	110	140	170	200	250	300	400	500
Отношение модуля упругости арматуры к модулю упругости бетона n	17	15	13	12	11	10	9	8

При расчете железобетонных конструкций коэффициенты запаса должны приниматься по табл. 10—7.

2. Центральное сжатие

Центрально сжатые элементы рассчитываются на прочность по формуле:

$$kN = N_p = \varphi (\sigma_{пр} F_б + \sigma_т F_а), \qquad (10—6)$$

где N — допускаемая продольная сила;

N_p — разрушающая продольная сила;
$F_б$ — площадь сечения бетона;
$F_а$ — площадь сечения продольной арматуры;
$\sigma_{пр}$ — призменная прочность бетона (табл. 10—1);
$\sigma_т$ — предел текучести арматуры (см. п. 10—1);
k — коэффициент запаса, принимаемый по табл. 10—7 п. 1«а»;
φ — коэффициент продольного изгиба, принимаемый по табл. 10—9.

Таблица 10—9

Коэффициенты продольного изгиба для железобетонных конструкций

$\frac{l_0}{b}$	$\frac{l_0}{d}$	$\frac{l_0}{r}$	φ	$\frac{l_0}{b}$	$\frac{l_0}{d}$	$\frac{l_0}{r}$	φ
14	12,1	50	1	24	20,8	83,0	0,62
16	13,9	55,4	0,88	26	23,5	90,0	0,57
18	15,6	62,2	0,80	28	24,3	97,0	0,53
20	17,3	69,0	0,73	30	26,4	104,0	0,50
22	19,1	76,0	0,67				

Здесь b — ширина прямоугольного сечения;
d — диаметр круглого сечения или круга, вписанного в многоугольное сечение;
r — радиус инерции сечения.

Расчетная длина элемента l_0 определяется умножением его действительной длины на коэффициент ψ, зависящий от степени защемления и подвижности концов элемента. Значение ψ для колонн принимается, как для бетонных конструкций (см. выше).

При упруго заделанных колоннах ψ назначается в зависимости от степени защемления и подвижности их концов.

3. Центральное растяжение

Центрально растянутые элементы рассчитываются на прочность по формуле:

$$kN = N_р = \sigma_т F_а; \qquad (10—7)$$

коэффициент запаса k принимается по табл. 10—7, п. 1 «б».

Центрально растянутые элементы рассчитываются на предупреждение появления трещин по формуле:

$$kN = N_т = \sigma_р F_б + 200 F_а, \qquad (10—8)$$

$N_т$ — продольная сила при появлении трещин;
$\sigma_р$ — предел прочности бетона при центральном растяжении по табл. 10—1; остальные обозначения прежние.

Коэффициент запаса k принимается по табл. 10—7, п. 2.

4. Изгиб

Изгибаемые элементы прямоугольного сечения с одиночной арматурой рассчитываются на прочность по формуле:

$$kM = M_р = \sigma_и b h_0^2 \alpha(1—0{,}53\alpha), \qquad (10—9)$$

где b — ширина сечения;
h_0 — полезная высота сечения;
$\sigma_и$ — по табл. 10—1;

$\alpha = \dfrac{F_а \sigma_т}{b h_0 \sigma_и}$ — характеристика сечения; остальные обозначения прежние;

k принимается по табл. 10—7, п. 1 «б».

Сечение растянутой арматуры (в процентах от площади расчетного сечения бетона) должно быть не менее указанного в табл. 10—6 и не более:

$$F_а = \frac{b h_0}{2} \cdot \frac{\sigma_и}{\sigma_т}, \qquad (10—10)$$

что соответствует $\alpha \leqslant 0{,}5$.

Изгибаемые элементы прямоугольного сечения с двойной арматурой рассчитываются на прочность по формуле:

$$kM = M_р = \sigma_и b h_0^2 [\beta(1 - 0{,}53\beta) + \alpha'(1—\delta')], \qquad (10—11)$$

где $\alpha' = \dfrac{F'_а \sigma_т}{b h_0 \sigma_и}$ — характеристика сечения;

$F'_а$ — сечение сжатой арматуры;

$$\beta = \alpha — \alpha';$$

$\delta' = \dfrac{a'}{h_0}$ (причем a' — расстояние от ближайшего края сечения до центра тяжести сжатой арматуры), k принимается по табл. 10—7, п. 1 «б».

Сечение растянутой и сжатой арматуры должно удовлетворять условию $\beta \leqslant 0{,}5$. Кроме того, необходимо, чтобы сечение сжатой арматуры удовлетворяло условию $\alpha' \leqslant \alpha — 2\delta'$ и сечение растянутой арматуры удовлетворяло условию $\alpha \leqslant 0{,}7$.

Изгибаемые элементы на предупреждение появления трещин рассчитываются по формуле:

$$kM = M_т = \sigma_{р.и} \frac{J_{пр}}{h — x_ц}, \qquad (10—12)$$

где $J_{пр}$ — момент инерции полного приведенного сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести этого сечения;
h — высота сечения;
$x_ц$ — расстояние центра тяжести полного приведенного сечения от крайнего сжатого волокна;
$\sigma_{р.и}$ — по табл. 10—1.

При прямоугольном сечении формула (10—12) получает вид:

$$kM = M_т = \sigma_{р.и} \frac{\dfrac{b}{3}\left[x_ц^3 + (h — x_ц)^3\right] + n F_а (h_0 — x_ц)^2 + n F'_а (x_ц — a')^2}{h — x_ц}; \qquad (10—13)$$

$$x_ц = \frac{0{,}5 b h^2 + n\left(F_а h_0 + F'_а a\right)}{b h + n\left(F_а + F'_а\right)}. \qquad (10—14)$$

Коэффициент k принимается по табл. 10—7, п. 2, а значение n — по табл. 10—8.

Главные растягивающие напряжения в изгибаемых элементах определяются по формуле:

$$\sigma_{гл} = \frac{Q}{bz}, \qquad (10—15)$$

где Q — поперечная сила (допускаемая);
z — плечо внутренней пары сил.

В элементах переменной высоты $\sigma_{гл}$ допускается определять по формуле:

$$\sigma_{гл} = \frac{Q}{bz} \pm \frac{M \operatorname{tg}\theta}{h_0 bz}, \qquad (10—16)$$

где θ — угол наклона грани элемента к его оси.

Знак «минус» принимается, когда в направлении возрастания изгибающего момента M высота элемента увеличивается, а знак «плюс» — когда она уменьшается.

Величина z принимается:

а) для конструкций, рассчитываемых только на прочность при прямоугольном сечении с одиночной арматурой

$$z = h_0(1 — 0{,}5\alpha); \qquad (10—17)$$

при прямоугольном сечении с двойной арматурой

$$z = h_0(1 — 0{,}5\beta), \qquad (10—18)$$

но в обоих случаях не более 7/8 h_0;

б) для конструкций прямоугольного сечения, рассчитываемых на предупреждение появления трещин:

$$z = \frac{2}{3} h.$$

В любом сечении изгибаемых элементов величина $\sigma_{гл}$ не должна превышать:

$$\sigma_{гл} = \frac{\sigma_р}{k'}. \qquad (10—19)$$

На участках, в пределах которых

$$\sigma_{гл} = \frac{\sigma_р}{k''}, \qquad (10—20)$$

главные растягивающие напряжения могут быть полностью восприняты бетоном (отогнутые стержни и хомуты ставятся по конструктивным соображениям).

На участках, где

$$\frac{\sigma_р}{k''} < \sigma_{гл} < \frac{\sigma_р}{k'}, \qquad (10—21)$$

отогнутые стержни и хомуты ставятся по расчету.

Коэффициенты k' и k'' принимаются по табл. 10—7 соответственно случаям 3б и 3а.

Диаметр хомутов в балках независимо от расчета — не менее 6 *мм*.

В изгибаемых элементах, воспринимающих сосредоточенные нагрузки, а также при сплошных нагрузках у крайних опор, где концы растянутой арматуры заканчиваются крюками на расстоянии $l_к$ от 15 до 30 диаметров за гранью опоры, не менее 80% равнодействующей главных растягивающих напряжений $\sigma_{гл}$ должно быть воспринято отгибами и хомутами (остальные 20% воспринимаются продольной арматурой); у крайних же опор с $l_к$ более 30 диаметров и у всех средних опор неразрезных конструкций не менее 60% (при сплошных нагрузках) равнодействующей главных растягивающих напряжений должно быть воспринято отгибами и хомутами.

Расстояние между отгибами (по длине изгибаемого элемента) должно быть не более высоты элемента.

5. Внецентренное сжатие

Расчет внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения на прочность производится следующим образом.

Случай I. При разрушении элемента растянутая арматура $F_а$ течет.

При $n_р + \leqslant 0{,}575$ расчет производится по формуле:

$$n_р c = (\beta + n_р)[1 - 0{,}53(\beta + n_р)] + \alpha'(1 - \delta'), \qquad (10—22)$$

причем сечение арматуры $F'_а$, учитываемое в расчете, должно удовлетворять условию:

$$\alpha' \leqslant \alpha + n_р - 2\delta'. \qquad (10—23)$$

Случай II. При разрушении элемента арматура $F_а$ сжата или растянута, но не течет.

При $n_р + \beta > 0{,}575$ расчет производится по формуле:

$$n_р c = 0{,}4 + \alpha'(1 - \delta'), \qquad (10—24)$$

причем если равнодействующая внешних сил проходит между центрами тяжести арматуры, то сечение арматуры должно удовлетворять условию:

$$\alpha \geqslant \frac{n_р(1 - c - \delta') - 0{,}4}{1 - \delta'}. \qquad (10—25)$$

В формулах (10—22), (10—23), (10—24) и (10—25)

$$n_р = \frac{kN}{\sigma_и b h_0} = \frac{N_р}{\sigma_и b h_0}; \qquad (10—26)$$

$c = \frac{e}{h_0}$ — относительный эксцентриситет;

e — расстояние от силы N до центра тяжести сечения арматуры $F_а$; остальные обозначения прежние;

$\sigma_и$ — принимается по табл. 10—1;

k — по табл. 10—7, п. 1.

Влияние гибкости внецентренно сжатых элементов в плоскости действия момента учитывается в расчете: для прямоугольных сечений при $\frac{l_0}{h} > 10$, а для иных поперечных сечений — при $\frac{l_0}{r} > 35$.

Гибкость учитывается умножением эксцентриситета продольной силы на коэффициент m, определяемый по формуле (для прямоугольного сечения):

$$m = \frac{1}{1 - \frac{n_1}{400}\left(\frac{l_0}{h}\right)^2}, \qquad (10—27)$$

где $n_1 = \frac{kN}{\sigma_и F_б}$;

l_0 — принимается так же, как и при центрально сжатых элементах (см. выше).

Если m окажется отрицательным, то необходимо увеличить размеры сечения или принять более высокую марку бетона.

Расчет внецентренно сжатых элементов на предупреждение появления трещин производится:

при $\frac{e_ц}{h} \leqslant 1$ по формуле

$$\frac{M(h - x_ц)}{J_{пр}} - \frac{N}{F_{пр}} = \frac{\sigma_{р.и}}{k}; \qquad (10—28)$$

при $\frac{e_ц}{h} > 1$ по формуле

$$\frac{M(h - x_ц)}{J_{пр}} - 1{,}67\frac{N}{F_{пр}} = \frac{\sigma_{р.и}}{k}, \qquad (10—29)$$

где $F_{пр}$ — площадь полного приведенного сечения;

$e_ц$ — расстояние от силы N до центра тяжести полного приведенного сечения; остальные обозначения прежние;

k — принимается по табл. 10—7, п. 2.

Примечание. Относительно формулы (10—28) следует сделать то же замечание, что и относительно формулы (10—4)—см. выше.

6. Внецентренное растяжение

Расчет внецентренно растянутых элементов прямоугольного сечения на прочность производится следующим образом.

Случай I. Продольная сила приложена между центрами тяжести арматур F_a и F'_a.

В этом случае сечения арматур

$$F_a = \frac{kNe'}{\sigma_т (h_0 - a')} = \frac{N_р e'}{\sigma_т (h_0 - a')}; \quad (10—30)$$

$$F'_a = \frac{kNe}{\sigma_т (h_0 - a)} = \frac{N_р e}{\sigma_т (h_0 - a)}. \quad 10—31)$$

Случай II. Продольная сила приложена вне части сечения, ограниченной центрами тяжести арматур F_a и F'_a.

Расчет производится по формуле:

$$n_р c = (\beta - n_р)[1 - 0{,}53(\beta - n_р)] + \alpha'(1 - \delta'), \quad (10—32)$$

причем учитываемое в расчете сечение арматуры F'_a должно удовлетворять условию:

$$\alpha' \leqslant \alpha - n_р - 2\delta'. \quad (10—33)$$

В формулах (10—30) — (10—33)

$$n_р = \frac{kN}{\sigma_и bh_0} = \frac{N_р}{\sigma_и bh_0}; \quad (10—34)$$

e' — расстояние от силы N до центра тяжести сечения арматуры F'_a;

a, a' — расстояния от ближайшего края сечения до центра тяжести арматур F_a и F'_a; остальные обозначения прежние.

Коэффициент запаса k принимается по табл. 10—7 п. 1, «б».

Расчет внецентренно растянутых элементов на предупреждение появления трещин производится по формуле:

$$\frac{M(h - x_ц)}{J_{пр}} + 1{,}67\frac{N}{F_{пр}} = \frac{\sigma_{р.и}}{k}, \quad (10—35)$$

где обозначения прежние, а k принимается по табл. 10—7, п. 2.

7. Малоармированные конструкции

Малоармированными (армобетонными) называются конструкции с содержанием арматуры меньшим, чем для железобетонных конструкций (см. выше п. 10—3, 1), но бо́льшим или равным 0,05% площади расчетного сечения бетона.

Расчет таких конструкций — изгибаемых, внецентренно растянутых, а также тех внецентренно сжатых элементов, прочность которых определяется прочностью растянутой зоны, можно производить (в соответствии с ГОСТ 4286-48) согласно следующим указаниям[1].

1. При содержании растянутой арматуры менее 50% величин, указанных в табл. 10—6, размеры сечения определяются так же, как для бетонных элементов, но коэффициенты запаса (табл. 10—4) уменьшаются на 25%, но не ниже чем до 2,4. Содержание арматуры определяется, как и для железобетонных элементов, но коэффициенты запаса (табл. 10—7 п. 1) уменьшаются на 25%, но не ниже чем до 1,25.

2. При содержании растянутой арматуры более 50% величин, указанных в табл. 10—6, расчет производится так же, как и для железобетонных элементов.

Расчет малоармированных центрально сжатых элементов и тех внецентренно сжатых, прочность которых определяется прочностью сжатой зоны, можно[1] производить так же, как и железобетонных элементов, но принимая коэффициенты запаса по табл. 10—4, а коэффициенты продольного изгиба — по табл. 10—5.

8. Указания по конструированию[2]

Проектирование железобетонных конструкций должно вестись с максимально возможным применением сборных элементов.

Постоянные швы, делящие сооружения на независимо работающие части, должны обеспечивать уменьшение температурных и усадочных усилий, а также усилий, возникающих в результате осадки основания, до величин, не опасных для сооружений.

Толщина защитного слоя должна приниматься: для рабочей арматуры балок, колонн и плит с размером сечения до 1 *м* — не менее 3 *см*; для хомутов — не менее 2 *см*, для рабочей и распределительной арматуры массивных конструкций — не менее 6 *см*.

Содержание арматуры в центрально сжатых железобетонных элементах должно быть не более 2% площади расчетного сечения бетона, во внецентренно сжатых — должно удовлетворять требованиям, приведенным выше, п. 1, и, кроме того, содержание арматуры на любой стороне сечения элементов должно быть не менее 0,2% площади расчетного сечения бетона.

Сечение распределительной и монтажной арматуры в балочных плитах не должно быть менее 10% сечения рабочей арматуры.

Расстояние между стержнями арматуры (в свету) в центрально и внецентренно сжатых элементах должно быть не менее 5 *см*, в балках — не менее 3,5 *см* и не менее диаметра стержней. В плитах расстояние между рабочими стержнями должно быть не менее 7 *см* и не более: для плит толщиной до 20 *см* — 25 *см*, толщиной от 20 *см* до 1,5 *м* — 33 *см*, толщиной более 1,5 *м* — 50 *см*.

Расстояние между фермами, каркасами или пакетами (в свету) должно устанавливаться с учетом способа транспортирования и укладки бетонной смеси. Рекомендуемые предельные значения этого расстояния: наименьшее — 0,5 *м*, наибольшее — $^1/_3$ толщины элемента, но не более 1 *м*.

В соответствии с инструкцией И 16-51 МЭС СССР по проектированию железобетонных конструкций с несущими арматурными каркасами, для каркасов можно применять:

а) прокат круглого сечения из стали марки Ст. 3;

б) прокат из горячекатанного периодического профиля из стали марки Ст. 5 (ГОСТ 5781-51);

---

[1] Вопрос о расчете малоармированных (армобетонных) конструкций в последние годы усиленно разрабатывается (см., например, [5], [1], [9], [7], [6]), причем в Гидроэнергопроекте проведена большая работа по составлению проекта норм и технических условий проектирования армобетонных конструкций гидротехнических сооружений на основе теории, разработанной д-ром техн. наук П. П. Лаупманом [5]. Однако согласованных окончательных взглядов по вопросу о расчете малоармированных конструкций в настоящее время еще не имеется (см., например, [1], [8]).

[1] См. примечание к формулам (10—4) и (10—28).

[2] Подробнее см. ГОСТ 4286-48.

в) прокат круглого сечения, подвергнутый силовой калибровке или сплющенный периодического профиля из стали марки Ст. 3 (допускается только для дополнительной арматуры, необходимой для второй указанной ниже стадии, при присоединении к каркасу контактной точечной сваркой или вязальной проволокой);

г) профильный прокат из стали марки Ст. 3.

В отдельных случаях при отсутствии стали марки Ст. 3 допускается применение стали марки Ст. 0с.

Для массивных конструкций, сечения которых превышают требуемые по расчету прочности, применяется бетон марки 110.

Для остальных конструкций с несущими каркасами применяется бетон марки не ниже 170.

Каркасы рассчитывают по двум стадиям работы: по первой стадии — при свежеуложенном незатвердевшем бетоне, когда они работают как металлические конструкции, и по второй стадии — при затвердевшем бетоне.

Расчет каркасов по первой стадии производится по нормам проектирования металлических конструкций. Расчет каркасов по второй стадии — по нормам проектирования железобетонных конструкций.

При расчете каркасов по первой стадии принимаются следующие нагрузки:

а) вес бетона, армированного каркасами,—2 600 *кг/м*^{3};

б) вес дощатой опалубки на 1 *м*^{2} перекрытия (включая балки и ригели) — 50 *кг*;

в) монтажная нагрузка при производстве работ:

для расчета балок перекрытия — 200 *кг* на 1 *м*^{2} перекрытия;

для расчета ригелей и колонн—100 *кг* на 1 *м*^{2} перекрытия;

для отдельных балок, не связанных с перекрытием,— 100 *кг* на 1 *пог. м* балки;

г) ветровая нагрузка на боковую поверхность опалубки — по действующим нормам.

Допускаемые напряжения на сталь при расчете каркасов по первой стадии принимаются для случая основных и дополнительных воздействий по табл. 10—10.

Таблица 10—10

Допускаемые напряжения для стали при расчете каркасов в *кг/см*^{2}

Вид напряжения	Прокатная сталь марок	
	Ст. 3	Ст. 0с
Растяжение, сжатие и изгиб	1 800	1 600
Срез	1 100	1 000
Смятие местное	1 450	1 300

Коэффициенты запаса и насыщение железобетонных сечений арматурой при расчете каркасов по второй стадии должны приниматься согласно действующим нормам на проектирование железобетонных конструкций.

При использовании в каркасах сталей разных марок, расчет сечений по второй стадии следует производить с учетом разных пределов текучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВНИТО строителей, Совещание по проектированию железобетонных гидротехнических сооружений, Москва, 1952.

2. ГОСТ 4286-48, Конструкции бетонные и железобетонные гидротехнических сооружений. Нормы и технические условия проектирования.

3. Инструкция по проектированию железобетонных конструкций с несущими арматурными каркасами (И 16-51).

4. Кожевников А. С., К вопросу расчета железобетонных элементов гидротехнических сооружений, журнал „Гидротехническое строительство" № 10, 1948.

5. Лаупман П. П., Метод расчета гидротехнических сооружений из армобетона, Госэнергоиздат, 1948.

6. Лаупман П. П., О методе расчета армобетонных гидротехнических сооружений, журнал „Гидротехническое строительство" № 10, 1948.

7. Петров И. Е., О проценте армирования железобетонных и малоармированных гидротехнических конструкций, журнал „Гидротехническое строительство" № 3, 1952.

8. Петров И. Е., О запасах прочности и расчетах сечений гидротехнических конструкций из армированного бетона, журнал „Гидротехническое строительство, № 10, 1948.

9. Тайчер С. И., Совещание по проектированию железобетонных гидротехнических конструкций, журнал „Гидротехническое строительство" № 4, 1952.

10. Технические условия на изготовление и установку арматуры и армоконструкций в гидротехнических сооружениях (ТУ 19-51).

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ, ИЗЫСКАНИЯ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

(Общие данные)[1]

11—1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ. СОСТАВ РАБОТ

1. Классификация

По объектам различают изыскания и исследования рек, озер, водохранилищ, болот, ледников, подземных вод, морей, водоразделов.

По цели различают изыскания и исследования комплексные, водно-энергетические, судоходные, лесосплавные, ирригационные, осушительные, рыбохозяйственные, водоснабжения, по борьбе с наводнениями, затоплением и др.

По степени подробности, в связи со стадиями проектирования (постановление СНК СССР от 26/II 1938 г. об улучшении проектного и сметного дела и об упорядочении финансирования) установлены соответствующие стадии изысканий (см. табл. 11—1).

Таблица 11—1

Стадии проектирования и изысканий

Стадии проектирования	Технико-экономический доклад (ТЭД)*	Проектное задание	Технический проект	Рабочие чертежи
Стадии изысканий	Рекогносцировочные	Предварительные (облегченные)	Подробные	Строительные (предпостроечные)

* Эта стадия проектирования в различных министерствах и ведомствах имеет разные названия; она не предусмотрена в указанном постановлении СНК СССР и применяется при проектировании особо сложных объектов. Необходимо по возможности уменьшать число стадий проектирования и изысканий.

Кроме изысканий технических, производятся изыскания экономические; необходимо обеспечить тесную связь между техническими и экономическими изысканиями.

2. Состав работ

Работы подразделяются на: 1) камеральные предварительные (сбор материалов); 2) организационные; 3) полевые; 4) камеральные окончательные (обработка материалов); 5) лабораторные (на моделях гидроузлов и сооружений в гидротехнических лабораториях).

Состав полевых работ (по исследованиям рек)

1) Геодезические и топографические:
а) проложение опорной сети (триангуляция, полигонометрия, астрономические определения);
б) нивелирование;
в) съемка.
2) Промерные:
а) промеры глубин;
б) траление.
3) Гидрологические:
а) наблюдения над уровнями;
б) приведение полевых работ к срезочному (условному) уровню;
в) измерение скоростей течения и расходов воды;
г) наблюдения над наносами и формированием русла;
д) определение уклонов и коэффициентов шероховатости;
е) изучение температурного режима, замерзания, зимнего состояния и вскрытия;
ж) определение прозрачности и цвета воды.
4) Метеорологические и климатические.
5) Геологические, геоморфологические, гидрогеологические и геотехнические.
6) Исследования бассейна, долины и поймы реки. Исследования притоков.
7) Почвенные.
8) Геоботанические.
9) Гидрохимические.
10) Гидробиологические (флоры и фауны вод), в частности, ихтиологические.
11) Разные (фотографические, изучение памятников старины в целях их защиты или переноса и др.).
12) Специальные (в зависимости от требований проекта и задания).

[1] **Гидрологические (гидрометрические) работы—см. гл. 12, инженерно-геологические изыскания—см. гл. 14.**

Таблица 11—2

Данные о нивелировании I—V классов

Класс	Длина хода в *км*	Цена деления уровня в секундах	Увеличение трубы	Расстояние от нивелира до рейки в *м*	Способ установки рейки	Система реек: длина в *м*	Система реек: деления в *см*	Ошибки на 1 *км* в *мм*: случайные средние	случайные предельные	систематические
	Применяется для специальных научных целей, при производстве гидротехнических изысканий не имеет применения									
I	600—1 200	3—5	40×	75—100	На башмаках, по уровню	3	Инварные штриховые, 0,5 *см*	± 1	± 2	±0,2
II	500—600	4—8	35—40×	75—100	На башмаках, по уровню	3	Двусторонние 0,5 *см*, штриховые	± 2	± 4	±0,4
III	200	10—15	30—40×	75—100	На башмаках или костылях, по уровню	3	Двусторонние 1 *см*, с приставным метром	± 4	± 8	±0,8
IV	100	20—25	30×	100—150	На башмаках, костылях, кольях	3	Двусторонние с приставным метром	±10	±20	±2,0
V (для нивелирования рельефа)	15—25	25	30×	100—200	На башмаках, костылях, кольях	4	Двусторонние, односторонние	±20	±40	±4,0

11—2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ И ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

1. Нивелирование (см. табл. 11—2)

2. Съемка

1) Виды съемки: а) мензульная; б) тахеометрическая; в) нивелирная (по поперечным профилям); г) фототеодолитная (наземная); д) аэрофотосъемка.

Основным видом съемки значительных площадей является аэрофотосъемка. Во всех случаях использование имеющихся материалов аэрофотосъемки, произведенной для картографических и других целей, является обязательным.

2) Масштабы съемки. При выборе масштаба съемки необходимо учитывать характер, объем съемки, стадию проектирования и изысканий, требования проекта, физико-географические условия и т. п.

При исследованиях водохранилищ, проектируемых на средних и больших реках, применяются масштабы 1 : 25 000 и 1 : 50 000 в зависимости от площади водохранилища и стадии проектирования; в ряде случаев можно применять съемку водохранилищ в масштабе 1 : 100 000; борта водохранилища и отдельные участки снимаются в масштабе 1 : 10 000 и 1 : 5 000 (например, застроенные участки, ценные угодия и т. п.). Места сооружений снимаются в масштабах 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500.

При исследованиях рек, используемых для судоходства в свободном состоянии, применяются масштабы 1 : 25 000 (большие реки), 1 : 10 000 (средние реки), 1 : 5 000 (малые реки); при наличии широкой поймы общая съемка производится в более мелком масштабе, например, 1 : 25 000, а русло в более крупном — 1 : 10 000, 1 : 5 000 (русловая съемка).

Таблица 11—3

Номенклатура карт

Масштаб	Размеры рамки: по широте	Размеры рамки: по долготе	Число листов в одном листе карты 1:1 000 000	Номенклатура (примеры)
1:1 000 000	4°	6°	—	N-37
1: 500 000	2°	3°	4	N-37-Г
1: 200 000	40′	1°	36	N-37-XXXVI
1: 100 000	20′	30′	144	N-37-144
			Число листов в одном листе предыдущего масштаба	
1: 50 000	10′	15′	4	N-37-144-Г
1: 25 000	5′	7′30″	4	N-37-144-Г-г
1: 10 000	2′30″	3′45″	4	N-37-144-Г-г-4
			Число листов в одном листе 1:100 000	
1: 5 000	1′15″	1′52,5″	256	N-37-144-(213)
			Число листов в одном листе 1:5 000	
1: 2 000	25″	37,5″	9	N-37-144-(213-з)

Примечание. На листе карты N-37 помещается Москва.

11—3. ПРОМЕРНЫЕ РАБОТЫ

1. Приборы

При промерных работах используются наметка, ручной лот, рыбалот (при скоростях течения больше 1,0 *м/сек*); эхолот — советский РЭЛ-1 и РЭЛ-2, спроектированные и изготовленные Государственным институтом проектирования и изысканий на речном транспорте, с точностью промеров глубин 0,05—0,20 *м*; глубины измеряются до 20 *м*.

2. Расположение промерных профилей

Промеры производятся по профилям (галсам): поперечным, косым, продольным.

Эхолотирование совместно с аэрофотосъемкой является весьма эффективным методом гидротехнических изысканий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Близняк Е. В., Водные исследования, Речиздат, 1952.

Геодезические и топографические работы

2. Близняк Е. В., Руководство к барометрическому нивелированию, изд. ГУГК, 1939.
3. Бонч-Бруевич М. Д. (ред.), Геодезическое справочное руководство, т. I—VIII, изд. Наркомхоза РСФСР, 1939—1947.
4. Волков Н. М., Принципы и методы картометрии, изд. Академии наук СССР, 1950.
5. Глотов Г. Ф., Геодезические работы при крупном гидротехническом строительстве, изд. ГУГК, 1939.
6. Дитц О. Г., Геодезия для гидротехнических специальностей, Геодезиздат, 1950.
7. Инструкция по нивелированию II класса, Геодезиздат, 1949.
8. Коншин М. В., Аэрофототопография, Геодезиздат, 1949.
9. Леонтович В. Г., Техническое нивелирование, изд. Наркомхоза РСФСР, 1938.
10. Леонтович В. Г., Уход за геодезическими инструментами, изд. Академии архитектуры УССР, 1950.
11. Наставление по нивелированию III и IV классов и по высотным теодолитным ходам, Геодезиздат, 1952.
12. Наставление по съемкам в крупных масштабах 1:5 000, 1:200, 1:1 000, изд. ГУГК, 1938.
13. Наставление по топографической съемке в масштабе 1:25 000. ч. I и II, Геодезиздат, 1946—1948.
14. Орлов П. М., Курс геодезии, Сельхозгиз, 1953.
15. Правила по технике безопасности на топографо-геодезических работах, Геодезиздат, 1950.
16. Чеботарев А. С., Геодезия, ч. I и II, Геодезиздат, 1948 и 1949.
17. Шилов П. И., Геодезия, Геодезиздат, 1953.

Промерные работы

1. Правила гидрографической службы № 5. Промер на реках (ПГС № 5), Управление гидрографии ВМФ СССР, 1945.
2. Федоров И. И., Навигационные эхолоты, Мориздат, 1948.
3. Шейкин П. А., Гидрографические работы на реках, изд. ВМС, 1949.

Метеорологические и климатологические исследования

1. Кедроливанский В. Н. и Стерзат М. С., Метеорологические приборы, Гидрометеоиздат, 1953.
2. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, ГУГМС, вып. 3, Метеорологические наблюдения на станциях, Гидрометеоиздат, 1946.

Облегченные и рекогносцировочные исследования рек

1. Близняк Е. В., Исследования и изыскания для использования водных ресурсов малых бассейнов, Академия наук СССР, Секция по научной разработке проблем водного хозяйства, Принципы и методы комплексного использования водных ресурсов малых бассейнов, ч. I, изд. Академии наук СССР, 1949.
2. Военно-топографическое управление генерального штаба Красной Армии, Простейшие способы определения истинного меридиана 1941.
3. Наставление по гидрографическому рекогносцированию рек, озер и болот, Гидрометеоиздат, М. 1942.
4. Справочник путешественника и краеведа, под редакцией С. В. Обручева, Географиздат, 1949.

Исследования озер и водохранилищ

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам вып. 7, Гидрологические наблюдения на озерных станциях, Гидрометеоиздат, 1948.

Исследования болот

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 8, Гидрологические наблюдения на болотных станциях, Гидрометеоиздат, 1948.
2. Панидиади А. Д., Инженерно-мелиоративные изыскания для целей осушения, Сельхозгиз, 1948.
3. Тюремнов С. Н., Торфяные месторождения и их разведка, Госэнергоиздат, 1949.

Почвенные исследования

1. Вильямс В. Р., Почвоведение, Сельхозгиз. 1947.
2. Красюк А. А., Почвы и их исследование в природе, Сельхозгиз, 1931.
3. Розов Л. П., Мелиоративное почвоведение, Сельхозгиз, 1936.

Геоботанические исследования

1. Ботанический институт Академии наук СССР, Методика полевых геоботанических исследований, изд. Академии наук СССР, 1938.
2. Гаваман А. В., Аэрофотосъемка и исследования природных ресурсов, изд. Академии наук СССР, 1937.

Гидрохимические исследования

1. Алекин О. А., Основы гидрохимии, Гидрометеоиздат, 1953.
2. Эттингер М. (ред.), Стандартные методы химического и бактериологического исследования воды, Медгиз, 1940.

Гидробиологические исследования

1. Жадин В. Н., Фауна рек и водохранилищ, изд. Академии наук СССР, 1946.
2. Зернов С. А., Общая гидробиология, изд. Академии наук СССР, 1949.
3. Липин А. Н., Пресные воды и их жизнь, Учпедгиз, 1950.
4. Правдин И. Ф., Руководство по изучению рыб, изд. Ленинградского государственного университета, 1939.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ (ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ) РАБОТЫ

12—1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Для изучения гидрологического режима рек (озер) используются наблюдения на гидрологических станциях и постах, входящих в гидрометеорологическую сеть и находящихся в ведении Главного управления гидрометеорологической службы (ГУГМС), а также других ведомств; кроме того, организуются дополнительные станции и посты, действующие в течение всего периода изысканий (частично и во время постройки), но не менее 1 года.

Наблюдения на этих станциях и постах производятся по наставлениям и инструкциям ГУГМС с дополнениями и уточнениями, учитывающими требования соответствующих проектов.

Для получения однородной степени точности полевых данных рекомендуются следующие измерители и округления величин (табл. 12—1).

Таблица 12—1

Измерители и округления

Элементы вычисления	Измерители и округления
Время	1 сек.
Высота уровня воды	1 *см*
Глубина	1 „
Толщина снега, льда, шуги	1 „
Уклон	До шестого десятичного знака
Скорость течения	*м/сек* — три значащие цифры при $v \geqslant 1$ *м/сек* и две значащие цифры, при $v < 1$ *м/сек*
Площади	$м^2$—три значащие цифры, но не менее 0,01 $м^2$
Расход воды	$м^3/сек$ — три значащие цифры при $Q > 1{,}0$ $м^3/сек$ и две значащие цифры при $Q < 1{,}0$ $м^3/сек$
Расход наносов	*кг/сек* — три значащие цифры, если расход больше 1,0 *кг/сек*

12—2. НАБЛЮДЕНИЯ НАД УРОВНЯМИ

Водомерные посты применяются: 1) реечные; 2) свайные; 3) смешанные; 4) самопишущие (лимниграфные). Наблюдения производятся в 8 час. и в 20 час; при малых колебаниях уровней в течение суток ограничиваются наблюдениями в 8 час., при значительных (во время паводков и пр.) — число наблюдений увеличивается.

Необходимо обеспечить определение наивысших уровней путем устройства простейших максимальных реек (например, системы Е. В. Близняка и др.).

Для наблюдений приливов и отливов, сгонных и нагонных явлений, частых паводков и т. п. желательна установка самописцев уровня.

На каждом водомерном посту для надежного закрепления нуля графика устанавливаются прочные реперы (не менее двух).

Если расположение водомерного поста сети Гидрометеослужбы не совпадает со створом плотины, то в последнем необходимы параллельные наблюдения на весь период изысканий и строительства, на основании которых переносятся в створ плотины характерные отметки уровней (ледостава, ледохода, максимального уровня и т. д.).

12—3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ

Измерения расходов производятся:

а) посредством вертушек, батометров — тахиметров, гидрометрических трубок, поплавков;

б) объемным способом, смешением, гидравлическим способом[1].

1. Вертушечный способ

Основным способом является вертушечный. Расход воды определяется по формуле:

$$Q = v_{ср}\,\Omega, \qquad (12—1)$$

где Q — расход воды в $м^3/сек$, $v_{ср}$ — средняя скорость течения в живом сечении в *м/сек;*

Ω — площадь живого сечения в $м^2$; площадь сечения потока Ω определяется на основании промеров глубин (см. гл. 11).

Средняя скорость на вертикали в открытом русле $v_{ср}$ вычисляется следующим образом.

При измерении скоростей в 5 точках по вертикали

$$v_{ср} = 0{,}1\,(v_{пов} + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{дон}) \qquad (12—2)$$

[1] См. гл. 2, п. 2—15.

(индексы у v обозначают положение точек по глубине в долях от полной глубины вертикали).

При измерении скоростей по вертикали в 3 точках

$$v_{ср} = 0,25\,(v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}). \qquad (12—3)$$

При измерении скоростей в 2 точках

$$v_{ср} = 0,5\,(v_{0,2} + v_{0,8}). \qquad (12—4)$$

При измерении скорости в 1 точке

$$v_{ср} = v_{0,6}\,(\text{приближенно}). \qquad (12—5)$$

При измерении скоростей под ледяным покровом в 6 точках по вертикали, причем глубина вертикали равна расстоянию от нижней поверхности льда до дна,

$$v_{ср} = 0,1\,(v_{пов} + 2v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{дон}). \qquad (12—6)$$

При измерении скоростей в 2 точках

$$v_{ср} = 0,5\,(v_{0,2} + v_{0,8}). \qquad (12—7)$$

Расход вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{2}{3} v_1 \omega_0 + \frac{v_1 + v_2}{2} \omega_1 + \cdots + \frac{v_{n-1} + v_n}{2} \omega_{n-1} + \frac{2}{3} v_n \omega_n, \qquad (12—8)$$

где $v_1, v_2, \ldots, v_n$ — средние скорости на вертикалях;

$\omega_0, \omega_1, \ldots, \omega_n$ — площади живого сечения между скоростными вертикалями.

Предпочтительнее применять графомеханический метод с измерением площадей посредством планиметра.

2. Поплавковый способ

Поплавками измеряются поверхностные скорости в различных точках створа: v_1', v_2'', затем вычисляют «фиктивный расход» $Q_ф$ по формуле (12—8) с заменой средних скоростей на вертикалях поверхностными скоростями (лучше применять графомеханический способ).

Расход воды Q вычисляется по формуле:

$$Q = kQ_ф. \qquad (12—9)$$

Коэффициент k вычисляется по формуле Г. В. Железнякова:

$$k = 1 - 5,8\,\frac{\Omega}{Q_ф}\sqrt{h_{ср} i}, \qquad (12—10)$$

где Ω — площадь живого сечения;

$h_{ср}$ — средняя глубина живого сечения; $h_{ср} = \frac{\Omega}{B}$ (B — ширина реки);

i — уклон.

В приближенных подсчетах принимают k=0,8—0,95 или определяют расход по формуле:

$$Q = 1,5\,Q_ф - 0,5\,v_{max}\,\Omega, \qquad (12—11)$$

где v_{max} — наибольшая поверхностная скорость в сечении.

3. Объемный способ

Объемный способ применяется для малых водотоков. Расход воды

$$Q = \frac{W}{t}, \qquad (12—12)$$

где W — объем сосуда (ведро, бочка и т. п.) в $м^3$;

t — время наполнения сосуда в секундах.

4. Способ смешения

Способ смешения применяется для определения расходов водотоков с бурным течением [4]:

$$Q = \frac{k_1 - k_2}{k_2 - k_0} q, \qquad (12—13)$$

где k_0 — концентрация соли в естественном потоке в $г/м^3$;

k_1 — концентрация соли, искусственно вводимой в поток, в $г/м^3$;

k_2 — концентрация соли в потоке после смешения в $г/м^3$;

q — расход раствора соли с концентрацией k_1 в $м^3/сек$.

В качестве соли обычно применяется NaCl. Определение концентраций может выполняться электрометрическим или химическим способами (титрованием).

12—4. КРИВАЯ РАСХОДОВ

На основании измеренных расходов $Q_1, Q_2, \ldots, Q_i$ и соответствующих им уровней $H_1, H_2, \ldots, H_i$ строят кривую расходов:

$$Q = f(H).$$

1. Случай неустойчивого или заросшего русла

В случаях неустойчивого русла или зарастания его связь Q и H может нарушиться. В этих случаях применяются соответствующие поправки, строятся изолинии расходов, семейство кривых и пр. [4].

2. Верхняя часть кривой

Для экстраполяции кривой расходов в верхней ее части применяются следующие способы:

а) перенос кривой расходов со смежных гидрометрических створов (для бесприточных участков рек) [4];

б) метод Б. В. Полякова [9];

в) способ логарифмической анаморфозы;

г) способ с применением формулы Шези [4].

3. Кривая расходов зимнего времени

Для зимних расходов кривая $Q=f(H)$ получается сравнительно редко. Для нешугоносных рек на основании сопоставлений летних и зимних измеренных расходов для одних и тех же уровней устанавливают переходные коэффициенты от летних расходов к зимним

$$k = \frac{Q_{зим}}{Q_{лет}}. \qquad (12—14)$$

Для подсчетов зимних расходов иногда полезно пользоваться вспомогательной кривой $k=f(\alpha)$, выражающей изменение переходного коэффициента от степени погружения льда [8].

Значение коэффициента k для различных рек и режимов зим различно и колеблется от 1 до 0; обычно $k\approx 0{,}3 \div 0{,}4$.

12—5. СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ И СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЕ РАСХОДЫ. СТОК

1. Среднесуточные и среднемесячные расходы

Пользуясь данными таблицы среднесуточных уровней и кривыми расходов, определяют соответствующие среднесуточные расходы $Q_с$. Среднедекадные или среднемесячные расходы $Q_м$ подсчитываются по $Q_с$:

$$Q_м = \frac{\Sigma Q_с}{t_д}, \qquad (12—15)$$

где $t_д$ — число дней в месяце или в декаде.

Среднегодовые расходы $Q_г$ подсчитываются аналогичным образом или как средние из декадных и месячных расходов.

2. Сток

Сток водотока за месяц и за год подсчитывается по среднемесячным и среднегодовым расходам:

$$W_м = Q_м T_м \text{ и } W_г = Q_г T_г, \qquad (12—16)$$

где $T_г$ и $T_м$ — число секунд: в году ($T_г \approx 31{,}6$ **млн. сек.**) или в месяце ($T_м \approx 2{,}59$ млн. сек. для 30 дней и 2,68 млн. сек. для 31 дня).

Годовой сток может быть также определен как сумма объемов месячных стоков или планиметрированием графика расходов за данный год $Q=f(t)$.

Аналогичным образом могут быть определены сезонные расходы и сток за весенние, летние, осенние, зимние периоды года.

12—6. РАСХОДЫ НАНОСОВ

Наносы подразделяются на: 1) взвешенные; 2) донные (влекомые); 3) полувзвешенные (придонные); 4) растворенные.

1. Определение расхода взвешенных наносов

Расход взвешенных наносов — количество наносов, проходящее через данное живое сечение в единицу времени (*кг/сек*).

Мутность ρ — вес взвешенных наносов в единице объема воды (*г/м*^{3}):

$$\rho = \frac{G_{пр} \cdot 10^6}{V_{пр}}, \qquad (12—17)$$

где $G_{пр}$ — вес наносов в пробе в *г*;
$V_{пр}$ — объем пробы в *см*^{3}.

Наносность K — количество взвешенных наносов, проходящее через 1 *м*^{2} площади живого сечения в единицу времени (*г/сек м*^{2}):

$$K = \rho v, \qquad (12—18)$$

где v — скорость в точке в *м/сек*;
ρ — мутность в точке в *г/м*^{3}.

Средняя наносность на вертикали определяется по формуле:

$$K_{ср} = 0{,}1(K_{пов} + 3K_{0{,}2} + 3K_{0{,}6} + 2K_{0{,}8} + K_{дон}), \qquad (12—19)$$

где $K_{пов}$, $K_{0{,}2}$, ... — наносность в точках измерения мутности и скорости на поверхности, на 0,2 глубины вертикали и т. д.

Сток взвешенных наносов (за год или другой период) обычно выражается в тоннах (тыс. тонн). Нередко определяют твердый сток в объемных единицах — в кубических метрах (например, при расчете заиления водохранилищ).

Объемный вес наносов ($\gamma_н$) может быть вычислен по формуле:

$$\gamma_н = \gamma_у (1 - n), \qquad (12—20)$$

где $\gamma_у$ — удельный вес наносов; $\gamma_у = 2{,}5—2{,}7$;
n — пористость; $n = 0{,}3—0{,}8$.

Для отбора проб воды и определения мутности применяются батометры различных систем: мгновенного и длительного наполнения.

Пробы берутся в тех же указанных выше точках, в которых измеряются скорости течения, согласно формуле (12—19).

Элементарный расход взвешенных наносов $s_в$ определяется по формуле:

$$s_в = hK_{ср}, \qquad (12—21)$$

где h — глубина на вертикали.

Расход взвешенных наносов $S_в$ (*кг/сек*) через живое сечение вычисляется по формуле, аналогичной формуле (12—8) для расхода воды:

$$S_в = 0{,}001 \left(\frac{2}{3} K_1 \omega_0 + \frac{K_1 + K_2}{2} \omega_1 + \cdots + \frac{K_{n-1} + K_n}{2} \omega_{n-1} + \frac{2}{3} K_n \omega_n \right). \qquad (12—22)$$

Определение мутности производится пропуском проб воды через фильтры, высушиванием и взвешиванием осадка.

2. Определение расхода донных наносов

Для измерения расхода донных наносов применяются донные батометры (Полякова, Аполлова, ГГИ — батометр «Дон» и др.).

Расход донных наносов в *г/сек* на 1 *пог. м* ширины живого сечения определяется по формуле:

$$S_д = \frac{100\, G_б}{tb}, \qquad (12—23)$$

где $G_б$ — вес наносов в батометре в *г*;
t — продолжительность наполнения батометра в секундах;
b — ширина входного отверстия батометра в *см*.

Определив величины $s_д$ в разных точках, вычисляют величину расхода донных наносов $S_д$ (*кг/сек*) по формуле:

$$S_д = \frac{s_{д1}}{2} B_1 + \frac{s_{д1} + s_{д2}}{2} B_2 + \cdots + \frac{s_{д\,(n-2)} + s_{д\,(n-1)}}{2} B_{n-1} + \frac{s_д}{2} B_n, \qquad (12-24)$$

где $s_{д1}$, $s_{д2}$ — расходы на 1 *пог. м*;
B_1, B_2 — расстояния между точками измерений батометром.

Примечание. При измерении расходов донных наносов горных рек необходимо определять „действующую ширину", на которой происходит влечение наносов, а также начальный (критический) расход, при котором начинается движение донных наносов.

3. Определение расхода растворенных наносов

Этот расход определяется на основании результатов химических анализов воды, произведенных в полевой или стационарной лаборатории. За единицу принимается вес «сухого» остатка солей в единице объема, так называемая минерализация (насыщенность):

$$\alpha = \frac{G_c \cdot 10^6}{V} \; г/м^3, \qquad (12-25)$$

где G_c — вес сухого остатка в *г*;
V — объем взятой пробы воды в *см*³.

Определив величину α в ряде проб из точек по поперечному сечению (не менее 3—5 по ширине реки), находят среднюю взвешенную из них и расход растворенных веществ в *кг/сек* по формуле:

$$S_р = \frac{\alpha Q}{10^3}, \qquad (12-26)$$

где α — минерализация воды в *г/м*³;
Q — расход воды в день взятия пробы в *м*³/*сек*.

12—7. ОСНОВНЫЕ ОТЧЁТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Основными отчетными документами гидрометрических работ являются:

1) технические списки гидрометрических пунктов;
2) полевые книжки — записи наблюдений на водомерных постах;
3) таблицы ежедневных среднесуточных уровней (обработка документов, указанных в п. 2);
4) журналы измерений расходов воды и наносов;
5) таблицы измеренных расходов воды и наносов (обработка документов, указанных в п. 4);
6) таблицы ежедневных среднесуточных расходов (обработка документов, указанных в пп. 3, 5 и 7);
7) кривые связи $Q=f(H)$ строятся по данным документов, указанных в п. 3 и 4;
8) графики расходов воды (гидрографы);
9) таблицы толщин ледяного покрова (по данным документов, указанных в п. 2);
10) таблицы ежесуточных расходов наносов (по данным документов, указанных в п. 4);
11) гидрографы взвешенных наносов;
12) гидрографы донных наносов;
13) гидрографы растворенных наносов;
14) кривые связи расходов наносов и расходов воды (по данным документов, указанных в пп. 3 и 7);
15) анализы гранулометрического и петрографического состава наносов;
16) анализы химического состава воды;
17) кривые связи расхода воды и химического состава (по данным документов, указанных в пп. 5 и 16);
18) таблицы измерений температуры воды и воздуха (по данным документов, указанных в п. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристовский В. В., Гидрометрические сооружения и конструкции, Гидрометеоиздат, 1949.
2. Близняк Е. В. и Никольский В. М., Гидрология и водные исследования, Речиздат, 1946.
3. Близняк Е. В., Водные исследования, Речиздат, 1952.
4. Быков В. Д., Гидрометрия, Гидрометеоиздат, 1950.
5. Бочков Н. М., Гидрометрическая вертушка, Госстройиздат, 1934.
6. Железняков Г. В. Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии, изд. Академии наук СССР, 1950.
7. Железняков Г. В., Исследование работы гидрометрических приборов, изд. Академии наук СССР, 1952.
8. Ковалев Л. М., Расчеты зимнего стока с ледяным покровом, Госэнергоиздат, 1950.
9. Лучшева А. А., Практическая гидрометрия, Гидрометеоиздат, 1951.
10. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 1, Основные положения о гидрометеорологических станциях и постах Гидрометеослужбы СССР, вып. 6, ч. 1. Наблюдения на больших реках, вып. 6, ч. 2, Наблюдения на малых реках, Гидрометеоиздат, 1952.
11. Поляков Б. В., Гидрологический анализ и расчеты, Гидрометеоиздат, 1946.
12. Поляков Б. В., Исследование стока взвешенных и донных наносов, изд. ГГИ, 1935.
13. Соломенцев Н. А. Гидрометрия, Гидрометеоиздат, 1951.
14. Шамов Г. И., Сток взвешенных наносов рек СССР, Труды ГГИ № 20 (74), Гидрометеоиздат, 1949.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

13—1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Гидрологические расчеты имеют целью получение данных для характеристики гидрологического режима водного объекта (реки, озера) в связи с его водохозяйственным использованием.

В состав гидрологической записки обычно входят следующие разделы: 1) введение; 2) орогидрография; 3) климат; 4) гидрологическая изученность; 5) общая характеристика режима реки; 6) сток за период фактических наблюдений; 7) параметры годового стока; 8) внутригодовое распределение стока; 9) максимальные расходы; 10) минимальные расходы; 11) зимний режим; 12) наносы и твердый сток; 13) химический состав воды; 14) список использованных материалов и литературы.

Основными исходными материалами для производства гидрологических расчетов являются:

1) сведения об уровне воды с 1881 г. по 1935 г.;
2) водный кадастр; материалы по режиму рек СССР с 1881 по 1935 г.;
3) гидрологические ежегодники ГУГМС с 1936 г.;
4) ведомственные отчеты по экспедиционным работам.

13—2. ВОДНЫЙ БАЛАНС

Уравнение водного баланса в бассейне реки:

для отдельного года

$$(x + k) - (y + z + f) = \pm \Delta w; \qquad (13—1)$$

для многолетнего периода

$$x_0 = y_0 + z_0, \qquad (13—2)$$

где x — осадки за годовой период;
k — конденсация за годовой период;
y — сток за годовой период;
z — испарение за годовой период;
f — фильтрация за годовой период;
Δw — избыток или поглощение влаги;

} в *мм* слоя

$$x_0 = \frac{\Sigma x}{n} \text{ — норма осадков;} \qquad (13—3)$$

$$y_0 = \frac{\Sigma y}{n} \text{ — норма стока;} \qquad (13—4)$$

$$z_0 = \frac{\Sigma z}{n} \text{ — норма испарения;} \qquad (13—5)$$

n — число членов ряда.

Примечание. Норма рассматривается, как среднеарифметическая величина за соответствующий многолетний период.

Уравнение водного баланса озера и водохранилища

$$\underbrace{(x + k + Q_{пр} + f_{пр})}_{\text{приход}} - \underbrace{(z + Q_{ст} + f_{ст} + U)}_{\text{расход}} = \pm \underbrace{\Delta V}_{\substack{\text{накопление} - \\ \text{убыль}}}, \qquad (13—6)$$

где x — осадки на зеркало озера в *мм*;
k — конденсация на зеркало озера в *мм*;
$Q_{пр}$ — поверхностный приток в озеро с его водосборного бассейна в *мм*;
$f_{пр}$ — подземный приток в озеро в *мм*;
z — испарение с зеркала озера в *мм*;
$Q_{ст}$ — поверхностный сток из озера в *мм*;
$f_{ст}$ — подземный сток из озера в *мм*;
U — потребление воды промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, а также сбросы воды через гидротехнические сооружения в *мм*;
ΔV — изменение объема воды в озере в *мм*.

13—3. ОСАДКИ И ИСПАРЕНИЕ

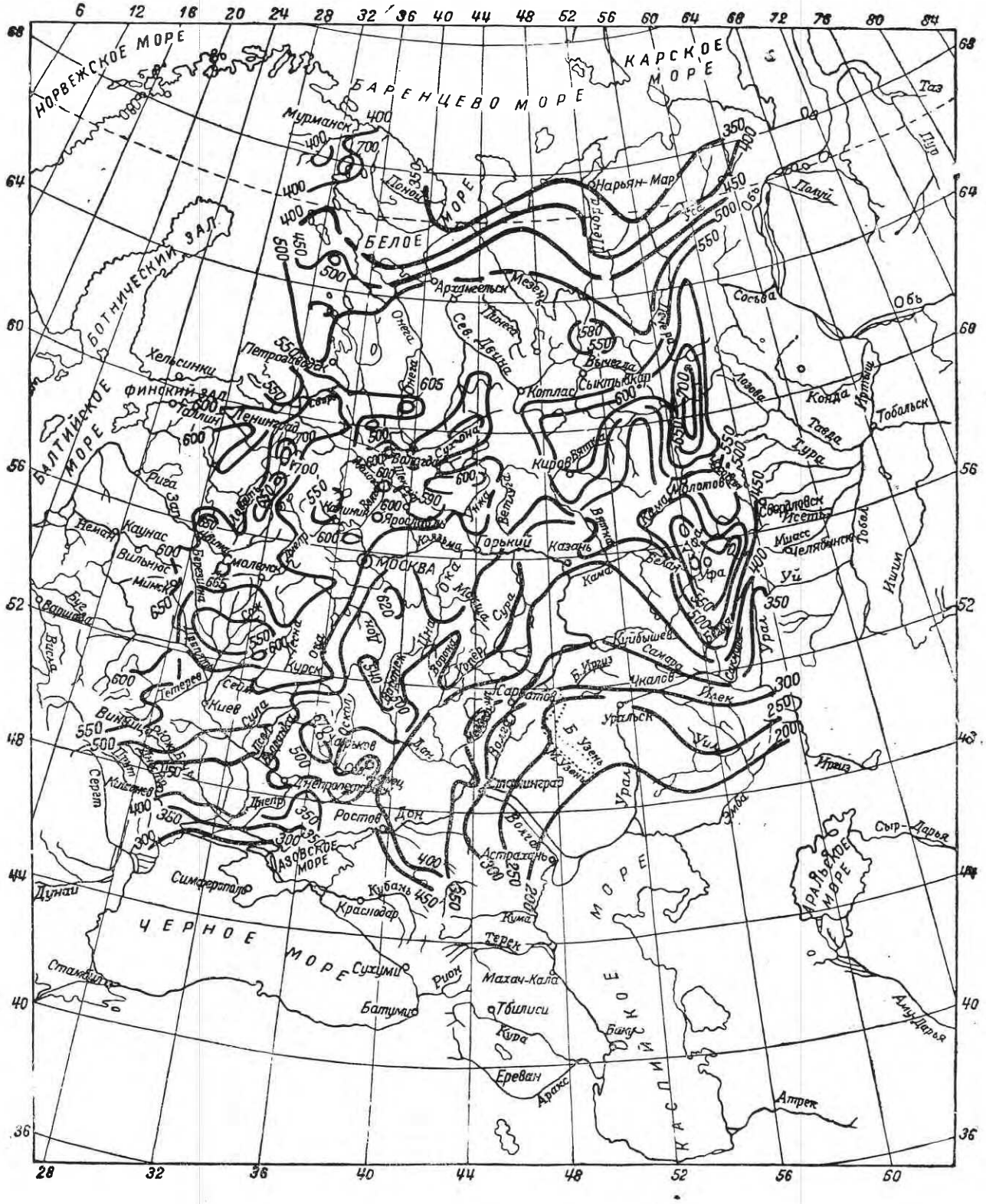
1. Осадки

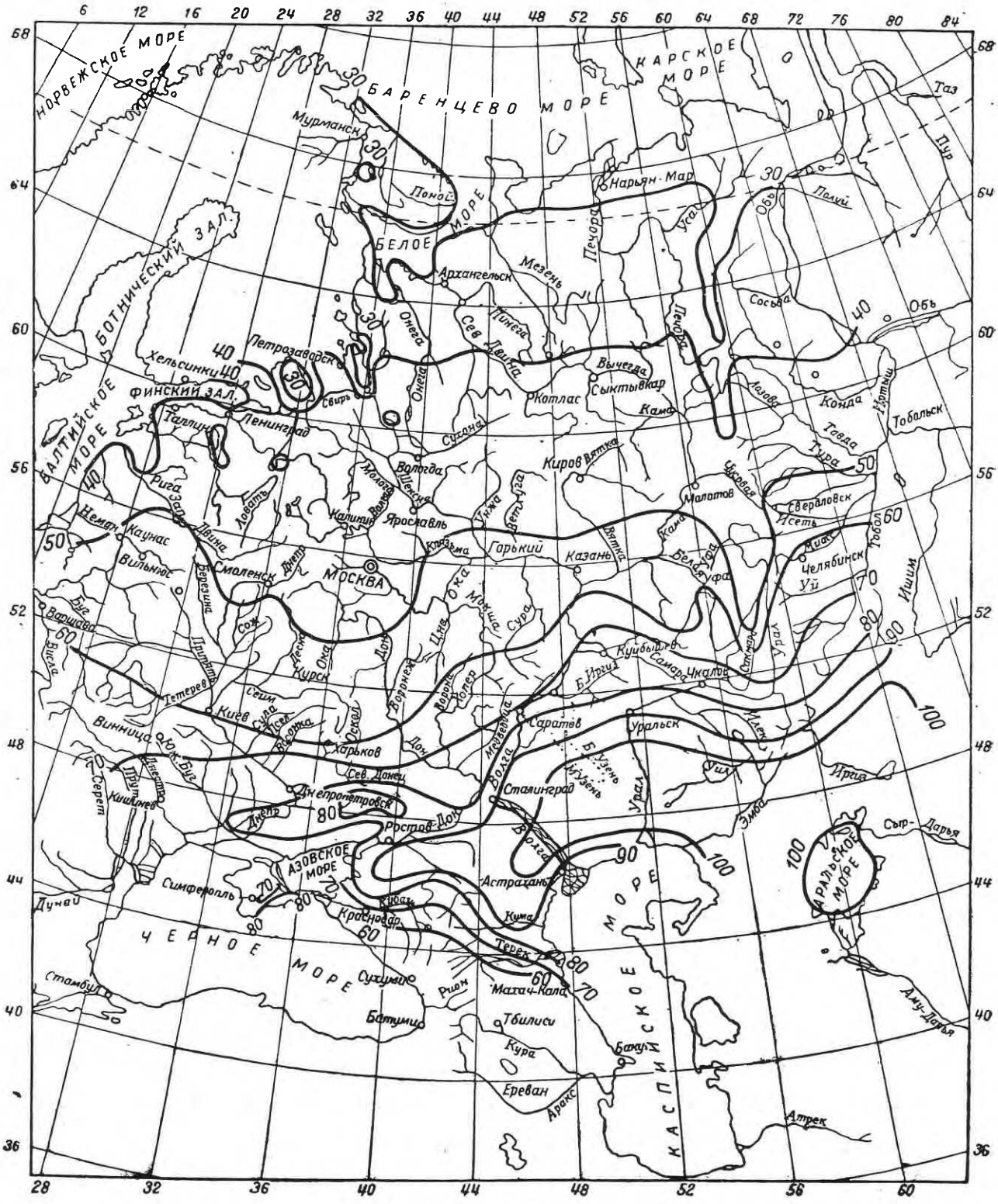
Распределение осадков по территории СССР изображается на картах в виде изогиет (фиг. 13—1), которые могут быть использованы лишь в предварительных расчетах.

Для определения среднего многолетнего количества осадков (нормы) в данном бассейне наносятся границы бассейна на карте изогиет и вычисляются площади, ограниченные смежными изогиетами $(F_{1-2}; F_{2-3})$; затем, умножая каждую из площадей на полусумму значений изогиеты $\left[\frac{x_1 + x_2}{2}\right]$, получают объем осадков на площади между изогиетами *1* и *2* по формуле:

$$W_{1-2} = F_{1-2}\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right). \qquad (13—7)$$

Все значения выражаются в метрах.


НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦЕВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
БОТНИЧЕСКИЙ ЗАЛ.
ФИНСКИЙ ЗАЛ.
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
АЗОВСКОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Мурманск
Архангельск
Нарьян-Мар
Хельсинки
Таллин
Ленинград
Петрозаводск
Вологда
Котлас
Вычегда
Сыктывкар
Киров
Горький
Казань
Ижевск
Свердловск
Челябинск
Тобольск
Рига
Каунас
Вильнюс
Минск
Варшава
Смоленск
Тула
Курск
Воронеж
Тетерев
Киев
Винница
Харьков
Днепропетровск
Ростов
Краснодар
Симферополь
Одесса
Сухуми
Батуми
Махач-Кала
Тбилиси
Баку
Ереван
Астрахань
Волгоград
Саратов
Куйбышев
Самара
Оренбург
Уральск
Актюбинск
Гурьев
Красноводск
Ашхабад
Атрек
Чкалов
Ижевск
Уфа
Пермь
Сосьва
Обь
Таз
Пур
Полуй
Конда
Тавда
Тура
Исеть
Мисасс
Тобол
Ишим
Иртыш
Омск
Барнаул
Кокчетав
Целиноград
Семипалатинск
Павлодар
Карталы
Троицк
Челкар
Кзыл-Орда
Чимкент
Ташкент
Фрунзе
Джамбул
Сыр-Дарья
Амударья
Дунай
Стамбул
Терек
Кума
Рион
Кура
Араке
Волга
Дон
Ока
Днепр
Десна
Сейм
Сула
Псел
Ворскла
Северский Донец
Оскол
Хопер
Медведица
Цна
Мокша
Сура
Вятка
Кама
Белая
Ай
Урал
Илек
Тобол
Ишим
Иртыш
Обь
Таз
Пур
Полуй
Сосьва
Лозьва
Конда
Тавда
Тура
Исеть
Мисасс
Челябинск
Уй
Ишим
Урал
Эмба
Сыр-Дарья
Амударья
Урица
Кубань


НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦЕВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
БОТНИЧЕСКИЙ ЗАЛ.
ФИНСКИЙ ЗАЛ.
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
АЗОВСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Мурманск
Архангельск
Нарьян-Мар
Петрозаводск
Хельсинки
Таллин
Ленинград
Вологда
Кировград
Ярославль
Горький
Казань
Малатов
Свердловск
Челябинск
Рига
Каунас
Вильнюс
Смоленск
Минск
Варшава
Брест
Киев
Харьков
Винница
Днепропетровск
Сев. Донец
Ростов-Дон
Саратов
Уральск
Сталинград
Астрахань
Симферополь
Краснодар
Сухуми
Батуми
Стамбул
Махач-Кала
Тбилиси
Ереван
Баку
Атрек
Сыктывкар
Котлас
Вычегда
Онега
Мезень
Печора
Обь
Тобольск
Тюмень
Курган
Уфа
Оренбург
Самара
Куйбышев
Пенза
Тамбов
Воронеж
Курск
Орел
Тула
Рязань
Владимир
Иваново
Кострома
Вятка
Пермь
Ижевск
Ишим
Омск
Целиноград
Актюбинск
Гурьев
Кушка
Термез
Чарджоу
Ташкент
Фрунзе
Алма-Ата
Семипалатинск
Барнаул
Новосибирск
Томск
Красноярск
Иркутск
Чита
Якутск
Тикси
Диксон
Игарка
Енисей
Лена
Колыма
Анадырь
Камчатка
Сахалин
Владивосток
Хабаровск
Амур
Сунгари
Харбин
Чанчунь
Мукден
Пекин
Тяньцзин
Шанхай
Нанкин
Ханькоу
Чунцин
Сиань
Ланьчжоу
Урумчи
Кашгар
Хотан
Лхаса
Гималаи
Индия
Пакистан
Иран
Ирак
Турция
Сирия
Египет
Ливия
Алжир
Марокко
Испания
Португалия
Франция
Англия
Ирландия
Исландия
Гренландия
Канада
Аляска
США
Мексика
Куба
Ямайка
Гаити
Пуэрто-Рико
Багамские о-ва
Бермудские о-ва
Азорские о-ва
Канарские о-ва
Мадейра
Зеленого Мыса о-ва
Гвинея
Либерия
Сьерра-Леоне
Нигерия
Камерун
Конго
Габон
Ангола
Замбия
Родезия
Мозамбик
Мадагаскар
Танганьика
Кения
Эфиопия
Сомали
Судан
Чад
Нигер
Мали
Сенегал
Мавритания
Гана
Того
Дагомея
Верхняя Вольта
Бенин
Экваториальная Африка
Намибия
Ботсвана
Трансвааль
Наталь
Капская провинция
Оранжевая республика
Свазиленд
Лесото
Австралия
Новая Зеландия
Тасмания
Новая Гвинея
Филиппинские о-ва
Малайский п-ов
Суматра
Ява
Борнео
Целебес
Молуккские о-ва
Новая Каледония
Фиджи
Самоа
Гавайские о-ва
Таити
Маркизские о-ва
Пасхи о-в
Чили
Аргентина
Уругвай
Парагвай
Боливия
Перу
Эквадор
Колумбия
Венесуэла
Гвиана
Бразилия
Карибское море
Мексиканский зал.
Калифорнийский зал.
Панамский канал
Суэцкий канал
Красное море
Персидский зал.
Аравийское море
Бенгальский зал.
Индийский океан
Тихий океан
Атлантический океан
Северный Ледовитый океан
Средиземное море
Северное море
Ла-Манш
Ирландское море
Балтийское море
Белое море
Баренцево море
Карское море
Охотское море
Японское море
Желтое море
Восточно-Китайское море
Южно-Китайское море
Филиппинское море
Коралловое море
Тасманово море
Арафурское море
Саргассово море
Карибское море
Мексиканский зал.
Гудзонов зал.
Баффинова земля
Гренландия
Исландия
Шпицберген
Земля Франца-Иосифа
Новая Земля
Северная Земля
Новосибирские о-ва
Земля Врангеля
Чукотский п-ов
Камчатка
Сахалин
Курильские о-ва
Японские о-ва
Филиппинские о-ва
Малайский п-ов
Суматра
Ява
Борнео
Целебес
Молуккские о-ва
Новая Гвинея
Австралия
Тасмания
Новая Зеландия
Новая Каледония
Фиджи
Самоа
Гавайские о-ва
Таити
Маркизские о-ва
Пасхи о-в
Чили
Аргентина
Уругвай
Парагвай
Боливия
Перу
Эквадор
Колумбия
Венесуэла
Гвиана
Бразилия

Средняя взвешенная норма осадков

$$x_0 = \frac{\Sigma W_i}{F} k \text{ мм}, \qquad (13—8)$$

где ΣW_i — сумма объемов осадков между изогиетами;
F — площадь бассейна;
k — численный множитель в зависимости от размерности величин F, W_i и x.

Если наблюдения над осадками имеют различную продолжительность, то необходимо привести их к одному (длинному) периоду наблюдений.

При наличии многолетнего ряда наблюдений над осадками он может быть подвергнут обработке статистическим методом, на основании которого устанавливают характерные параметры — норму, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии.

2. Испарение

Различают: испарение суммарное — z_0, испарение с поверхности суши на водосборе — $z_п$, испарение с водной поверхности — $z_в$.

Суммарное среднемноголетнее испарение приводится на карте (фиг. 13—2) и определяется по формуле водного баланса:

$$z_0 = x_0 - y_0, \qquad (13—9)$$

где x_0 — норма осадков, определяемая по карте изогиет (см. фиг. 13—1);
y_0 — норма стока (в слое стока), определяемая по карте изолиний среднего многолетнего стока (см. фиг. 13—4 и 13—5).

Испарение с водной поверхности обычно определяется по формулам Давыдова, Зайкова, Крицкого—Менкеля [11], [13], [15].

а) Формула В. К. Давыдова:

$$e = 0,55 d^{0,8} (1 + 0,125 w), \qquad (13—10)$$

где e — среднесуточное испарение в *мм*;
d — среднесуточный дефицит влажности в *мм*;
w — среднесуточная скорость ветра в *м/сек*.

При площади зеркала более 1 *га* в формулу вводится коэффициент 0,9.

б) Формула Б. Д. Зайкова [13] для малых водохранилищ (до F=100 *га*):

$$E = 0,2 n (e_0 - e_{200}) (1 + 0,85 w_{100}) \text{ мм}, \qquad (13—11)$$

где E — слой испарения в *мм* за месяц;
e_0 — средняя месячная упругость насыщенного водяного пара в *мм*, рассчитанная по температуре поверхности воды;
e_{200} — упругость водяного пара в воздухе в *мм* на высоте 200 *см* от поверхности воды;
w_{100} — средняя месячная скорость ветра в *м/сек* на высоте 100 *см* над поверхностью земли;
n — число дней в месяце.

Если e_0 и e_{200} выражены не в миллиметрах, а в миллибарах[1], то множитель перед скобкой равен 0,15.

[1] Миллибор—единица измерения давления, равная 0,75 *мм* ртутного столба (принята в метеорологии).

В преобразованном виде (в случае если исключена возможность иметь данные о температуре воды) формула Б. Д. Зайкова имеет следующий вид:

$$E = 0,2 n C D_{200}^{0,78} (1 + 0,85 w_{100}), \qquad (13—12)$$

где C — параметр, зависящий от средних соотношений между температурой воды в прудах и воздуха и изменяющийся в пределах 1,4—2,2 для отдельных районов[1];
D_{200} — дефицит влажности воздуха в *мм* на высоте 200 *см* над поверхностью земли.

Потери на испарение с водной поверхности проектируемого водохранилища определяются как разность испарения с водной поверхности и испарения с суши площади чаши, заливаемой при образовании водохранилища.

в) Формула С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля и К. И. Россинского [15], [16] для определения испарения с поверхности больших водохранилищ (площадью от нескольких квадратных километров и более):

$$E = 9 (e_0 - e_{200}) \sqrt{1 + 0,15 w_{900}^2}, \qquad (13—13)$$

где E — слой испарения за месяц (30 дней) в *мм*;
e_0 — средняя за месяц упругость водяных паров, насыщающих воздух при температуре поверхности воды, в *мм* рт. ст.;
e_{200} — среднемесячная абсолютная влажность воздуха в *мм* рт. ст. на высоте 200 *см* над поверхностью земли;
w_{900} — скорость ветра в *м/сек* на высоте 900 *см*.

Величины e_{200} и w_{900} определяются по данным ближайшей метеорологической станции.

г) Внутригодовое распределение испарения (в долях от годовой суммы) может быть принято порайонно, согласно делению на карте (фиг. 13—3), в соответствии с табл. 13—1 [13].

Таблица 13—1

Распределение испарения по районам (в долях от годовой суммы)

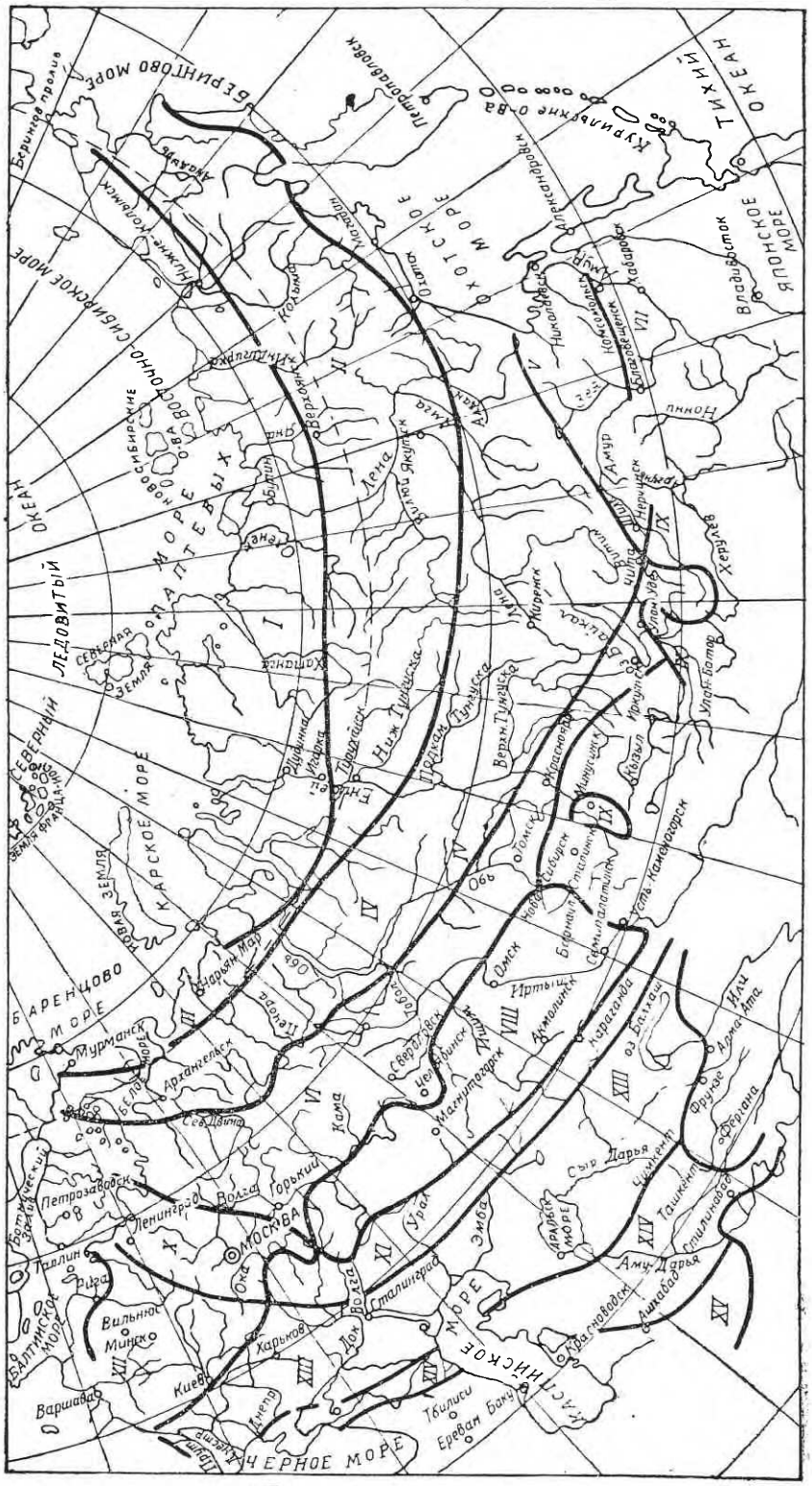
№ районов на карте	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	—	—	—	—	—	0,28	0,34	0,25	0,13	—	—	—
II	—	—	—	—	0,16	0,26	0,27	0,19	0,12	—	—	—
III	—	—	—	—	0,12	0,22	0,28	0,20	0,12	0,06	—	—
IV	—	—	—	—	0,18	0,24	0,23	0,17	0,11	0,07	—	—
V	—	—	—	—	0,21	0,22	0,20	0,16	0,12	0,09	—	—
VI	—	—	—	0,10	0,18	0,20	0,20	0,16	0,10	0,06	—	—
VII	—	—	—	0,13	0,18	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	—	—
VIII	—	—	—	0,08	0,17	0,19	0,20	0,17	0,12	0,07	—	—
IX	—	—	—	0,11	0,19	0,21	0,18	0,14	0,10	0,07	—	—
X	—	—	—	0,10	0,18	0,19	0,18	0,15	0,10	0,07	0,03	—
XI	—	—	—	0,07	0,15	0,18	0,20	0,18	0,12	0,07	0,03	—
XII	—	—	0,05	0,09	0,17	0,17	0,16	0,15	0,11	0,07	0,03	—
XIII	—	—	0,04	0,09	0,15	0,15	0,18	0,17	0,12	0,07	0,03	—
XIV	—	—	0,05	0,09	0,13	0,14	0,17	0,16	0,12	0,08	0,04	0,02
XV	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15	0,16	0,15	0,11	0,07	0,03	0,03

Коэффициент вариации ежегодных сумм испарения (по Б. Д. Зайкову):

для всей территории СССР C_{v_z}=0,10;

для района южной половины Западной Сибири (между 56° и 48° с. ш. и 60° и 70° в. д.) C_{v_z}=0,15.

[1] В работе Б. Д. Зайкова имеется специальная карта параметра C по территории СССР.


ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН
ТИХИЙ ОКЕАН
БЕРИНГОВО МОРЕ
ЯПОНСКОЕ МОРЕ
ОХОТСКОЕ МОРЕ
МОРЕ ЛАПТЕВЫХ
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦОВО МОРЕ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Ленинград
Мурманск
Архангельск
Петрозаводск
Рига
Вильнюс
Минск
Варшава
Киев
Харьков
Сталинград
Горький
Свердловск
Челябинск
Магнитогорск
Омск
Новосибирск
Томск
Красноярск
Иркутск
Якутск
Хабаровск
Владивосток
Благовещенск
Комсомольск
Тбилиси
Ереван
Баку
Ашхабад
Ташкент
Фрунзе
Алма-Ата
Караганда
Петропавловск
Берингов пролив
Обь
Енисей
Лена
Амур
Волга
Дон
Днепр
Урал
Кама
Иртыш
Ока
Сыр Дарья
Аму Дарья
Северная Земля
Новая Земля
Земля Франца-Иосифа
Курильские о-ва
Командорские о-ва
Сахалин
Камчатка
Чукотский п-ов
Таймыр
Полуостров Ямал
Полуостров Канин
Полуостров Рыбачий
Полуостров Гыданский
Полуостров Ямал
Полуостров Таймыр
Полуостров Чукотский
Полуостров Камчатка
Полуостров Сахал

Для определения испарения различной обеспеченности (в долях от нормы) при указанных C_{v_z} можно пользоваться табл. 13—2.

Таблица 13—2

Значения модульных коэффициентов испарения

Обеспеченность в %	1	3	5	10	25	50	75	90	95	97	99
При $C_{v_z}=0,10$	1,23	1,19	1,16	1,13	1,07	1,00	0,93	0,87	0,84	0,81	0,77
При $C_{v_z}=0,15$	1,35	1,28	1,25	1,19	1,10	1,00	0,90	0,81	0,75	0,72	0,65

13—4. СТОК

1. Средний многолетний сток

При наличии данных наблюдений определение годовых величин стока за многолетний период W_1, W_2, ..., W_n производится, как указано в п. 12—5 гл. 12.

На основе этих данных определяется среднемноголетний сток:

$$W_0 = \frac{\Sigma W_i}{n} = Q_0 \cdot 31{,}6 \cdot 10^6 \ м^3, \qquad (13—14)$$

где Q_0 — среднемноголетний расход в $м^3/сек$.

Выражая W_0 в кубических метрах и площадь водосбора $F_в$ в квадратных метрах, получают высоту слоя стока в миллиметрах:

$$y_0 = \frac{W_0}{F \cdot 1\,000}. \qquad (13—15)$$

Среднемноголетний модуль стока с 1 $км^2$

$$M_0 = \frac{Q_0}{F} 1\,000 \ л/сек\ км^2. \qquad (13—16)$$

Коэффициент стока

$$\eta = \frac{y_0}{x_0}, \qquad (13—17)$$

где x_0 — норма осадков в $мм$.

При отсутствии данных наблюдений среднемноголетний сток определяется косвенным способом, в частности по картам изолиний стока, составленным Б. Д. Зайковым для территории СССР (фиг. 13—4 и 13—5).

Аналогичные карты изолиний стока в более крупных масштабах имеются и для отдельных районов СССР: ЦЧО, УССР, Средней Азии, Урала, Кавказа и т. д. ([14], [18], [22] и др.).

Приведенные на картах величины M_0 относятся не к точке, а к площади водосбора, и представляют равномерно распределенный сток по территории, отнесенный к условному центру (центру тяжести) бассейна. Карта дает достаточно точные результаты для бассейнов рек средних размеров.

Для малых бассейнов ошибка в определении M_0 по карте изолиний может достигать $\pm 20 \div 40\%$ и даже более. При определении величины среднемноголетнего стока необходимо учитывать влияние деятельности человека на сток [19].

2. Кривые обеспеченности

1) Кривая обеспеченности характеризуется тремя параметрами:

средняя арифметическая ряда

$$y_0 = \frac{\Sigma y_i}{n}, \qquad (13—18)$$

где y_i — значения отдельных величин;
n — число членов ряда;

коэффициент вариации

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum\left(\frac{y_i}{y_0} - 1\right)^2}{n-1}} \qquad (13—19)$$

или

$$C_v = \sqrt{\frac{\Sigma (k_i - 1)^2}{n-1}}, \qquad (13—20)$$

где $k_i = \frac{y_i}{y_0}$ — модульный коэффициент; (13—21)

коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{\Sigma (k_i - 1)^3}{n\, C_v^3}, \qquad (13—22)$$

2) Среднеквадратическая ошибка среднего арифметического значения ряда определяется в долях от y_0 по формуле:

$$m_{y_0} = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}}. \qquad (13—23)$$

Вероятную ошибку обеспеченности — 50% в долях от y_0 — находят по формуле:

$$m_{y_0 50} = 0{,}674 \frac{C_v}{\sqrt{n}}. \qquad (13—24)$$

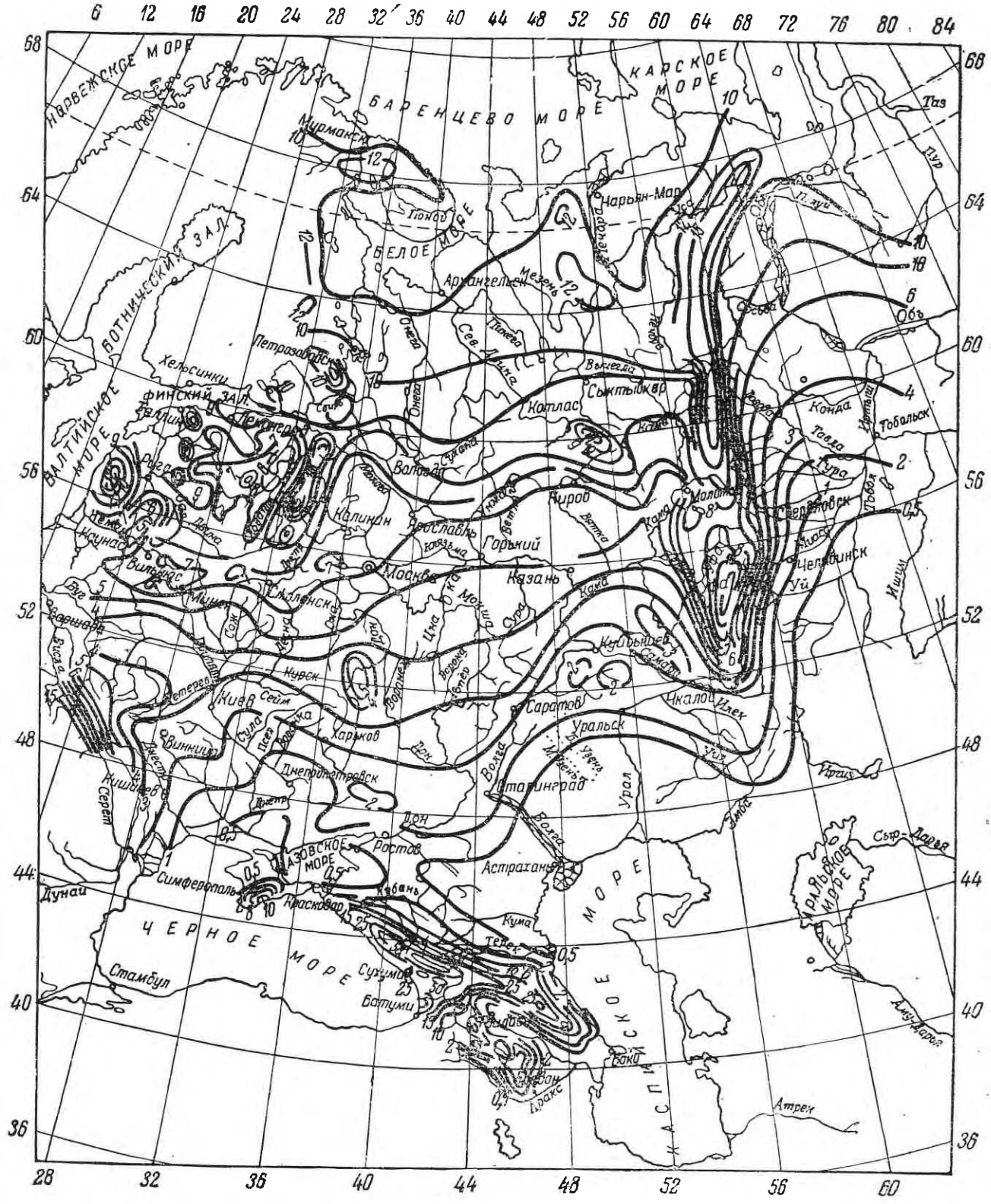
Вероятная ошибка в определении C_v в долях от C_v

$$m_{Cv50} = \pm \frac{0{,}674}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_v^2}. \qquad (13—25)$$

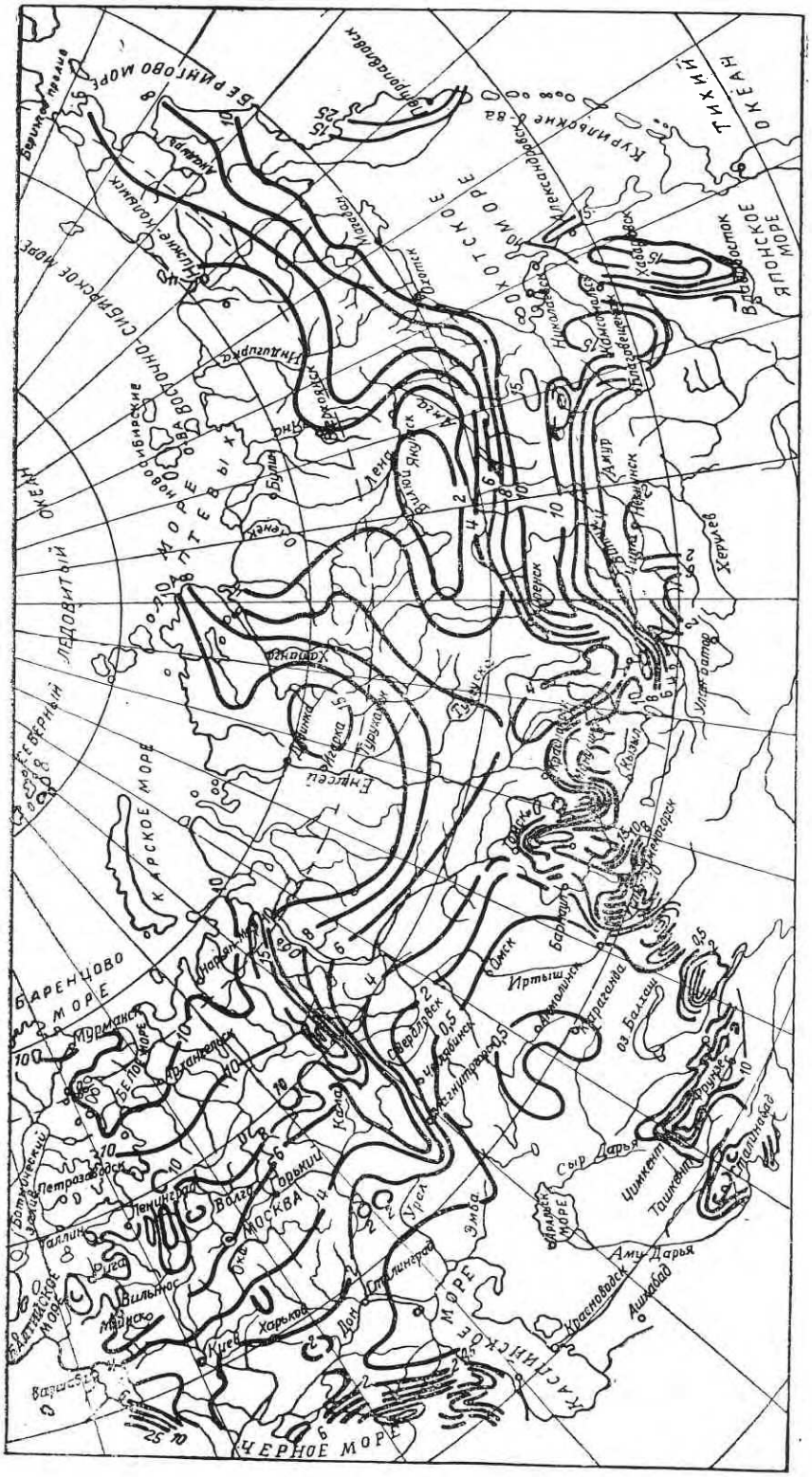
Среднеквадратическая ошибка в определении C_s приближенно равна:

$$m_{C_s} \approx \sqrt{\frac{6}{n}}. \qquad (13—26)$$

Большое распространение имеет значение $C_s = 2C_v$



Фиг. 13—4. Карта среднемноголетних модулей стока в л/сек км²



Фиг. 13—5. Карта среднемноголетних модулей стока в л/сек км² на территории Азиатской части СССР

3) Минимальное число лет наблюдений (n_{min}), необходимое для вывода нормы (среднеарифметического значения) с заданной точностью определяется по формуле (13—27) и табл. 13—3:

$$n_{min} = \left(\frac{C_v}{m_{y_0}}\right)^2 10^4. \qquad (13—27)$$

4) Построение кривой обеспеченности. Для построения кривой обеспеченности вычисляют ординаты кривой, пользуясь табл. 13—4, в которой даются величины отклонений ординат кривых от середины (Φ_l) для различных значений обеспеченности p % при $y=1$ и $C_v = 1$:

$$y_{p\%} = (\Phi_{p\%}\, C_v + 1)\, y_0. \qquad (13—28)$$

Для графического построения кривых обеспеченности рекомендуется пользоваться специальной клетчаткой вероятности.

5) Контроль построения кривой обеспеченности. Для суждения, в какой мере построенная кривая обеспеченности согласуется с точками, полученными по данным наблюдений, эти точки наносятся на тот же график, причем их обеспеченность p % определяется по формуле:

$$p = \frac{m}{n+1}\,100, \qquad (13—29)$$

где n — число членов ряда;
m — порядковый номер члена ряда.

Таблица 13—3

Минимальное число лет наблюдений

C_v	Число лет наблюдений при точности в %							
	±4	±5	±6	±7	±8	±9	±10	±20
0,15	14	9	6	5	4	3	2	1
0,20	25	16	11	8	6	5	4	1
0,25	39	25	17	13	10	8	6	2
0,30	56	36	25	19	14	11	9	2
0,35	76	49	33	25	19	15	12	3
0,40	100	64	44	33	25	20	16	4
0,45	126	81	55	42	32	25	20	5
0,50	156	100	69	50	39	31	25	6
0,65	264	169	118	86	66	52	42	10
0,70	306	196	136	100	77	61	49	12

Таблица 13—4

Отклонения ординат (Φ_p) биномиальной кривой обеспеченности от середины при $C_v = 1$ (по С. И. Рыбкину)

Коэффициент асимметрии	Значение обеспеченности в %												
	0,01	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	1,0	3	5	10	20	25	30
0,0	3,72	3,43	3,29	3,09	2,75	2,58	2,33	1,88	1,64	1,28	0,84	0,67	0,52
0,1	3,94	3,62	3,46	3,23	2,85	2,67	2,40	1,92	1,67	1,29	0,84	0,66	0,51
0,2	4,16	3,80	3,62	3,38	2,86	2,76	2,47	1,96	1,70	1,30	0,83	0,65	0,50
0,3	4,38	3,98	3,79	3,52	3,07	2,86	2,54	2,00	1,72	1,31	0,82	0,64	0,48
0,4	4,61	4,17	3,96	3,66	3,18	2,95	2,61	2,04	1,75	1,32	0,82	0,63	0,47
0,5	4,83	4,35	4,12	3,81	3,29	3,04	2,68	2,08	1,77	1,32	0,81	0,62	0,46
0,6	5,05	4,54	4,29	3,96	3,40	3,13	2,75	2,12	1,80	1,33	0,80	0,61	0,44
0,7	5,28	4,72	4,46	4,10	3,50	3,22	2,82	2,15	1,82	1,33	0,79	0,59	0,43
0,8	5,50	4,91	4,63	4,24	3,61	3,31	2,89	2,18	1,84	1,34	0,78	0,58	0,41
0,9	5,73	5,10	4,80	4,38	3,72	3,40	2,96	2,22	1,86	1,34	0,77	0,57	0,40
1,0	5,96	5,28	4,97	4,53	3,82	3,49	3,02	2,25	1,88	1,34	0,76	0,55	0,38
1,1	6,18	5,47	5,13	4,67	3,92	3,58	3,09	2,28	1,89	1,34	0,74	0,54	0,36
1,2	6,41	5,66	5,30	4,81	4,03	3,66	3,15	2,31	1,91	1,34	0,73	0,52	0,35
1,3	6,64	5,84	5,46	4,95	4,13	3,74	3,21	2,34	1,92	1,34	0,72	0,51	0,33
1,4	6,87	6,03	5,63	5,09	4,23	3,83	3,27	2,37	1,94	1,34	0,71	0,49	0,31
1,5	7,09	6,21	5,80	5,23	4,33	3,91	3,33	2,39	1,95	1,33	0,69	0,47	0,30
1,6	7,31	6,39	5,96	5,37	4,42	3,99	3,39	2,42	1,96	1,33	0,68	0,46	0,28
1,7	7,54	6,57	6,12	5,50	4,52	4,07	3,44	2,44	1,97	1,32	0,66	0,44	0,26
1,8	7,76	6,75	6,28	5,64	4,62	4,15	3,50	2,46	1,98	1,32	0,64	0,42	0,24
1,9	7,98	6,93	6,44	5,77	4,71	4,23	3,55	2,49	1,99	1,31	0,63	0,40	0,22
2,0	8,21	7,11	6,60	5,91	4,81	4,30	3,60	2,51	2,00	1,30	0,61	0,39	0,20

Продолжение табл. 13—4

Коэффициент асимметрии	Значение обеспеченности в %												
	40	50	60	70	75	80	90	95	97	99	99,5	99,7	99,9
0,0	0,25	0,00	−0,25	−0,52	−0,67	−0,84	−1,23	−1,64	−1,88	−2,33	−2,58	−2,75	−3,09
0,1	0,24	−0,02	0,27	0,53	0,68	0,85	1,27	1,61	1,84	2,25	2,48	2,64	2,95
0,2	0,22	0,03	0,28	0,55	0,69	0,85	1,26	1,58	1,79	2,18	2,39	2,53	2,81
0,3	0,20	0,05	0,30	0,56	0,70	0,85	1,24	1,55	1,75	2,10	2,29	2,42	2,67
0,4	0,19	0,07	0,31	0,57	0,71	0,85	1,23	1,52	1,70	2,03	2,20	2,31	2,54
0,5	0,17	0,08	0,33	0,58	0,71	0,85	1,22	1,49	1,66	1,96	2,11	2,21	2,40
0,6	0,16	0,10	0,34	0,59	0,72	0,85	1,20	1,45	1,61	1,88	2,02	2,10	2,27
0,7	0,14	0,12	0,36	0,60	0,72	0,85	1,18	1,42	1,57	1,81	1,93	2,00	2,14
0,8	0,12	0,13	0,37	0,60	0,73	0,85	1,17	1,38	1,52	1,74	1,84	1,90	2,02
0,9	0,11	0,15	0,38	0,61	0,73	0,85	1,15	1,35	1,47	1,66	1,75	1,80	1,90
1,0	0,09	0,16	0,39	0,62	0,73	0,85	1,13	1,32	1,42	1,59	1,66	1,71	1,79
1,1	0,07	0,18	0,41	0,62	0,74	0,85	1,10	1,23	1,33	1,52	1,58	1,62	1,68
1,2	0,05	0,19	0,42	0,63	0,74	0,84	1,08	1,24	1,33	1,45	1,50	1,53	1,58
1,3	0,04	0,21	0,43	0,63	0,74	0,84	1,06	1,20	1,23	1,38	1,42	1,45	1,48
1,4	0,02	0,22	0,44	0,64	0,73	0,83	1,04	1,17	1,23	1,32	1,35	1,37	1,39
1,5	0,00	0,24	0,45	0,64	0,73	0,82	1,02	1,13	1,19	1,25	1,28	1,30	1,31
1,6	−0,02	0,25	0,46	0,64	0,73	0,81	0,99	1,10	1,14	1,20	1,22	1,23	1,24
1,7	0,03	0,27	6,47	0,64	0,72	0,81	0,97	1,06	1,10	1,14	1,15	1,16	1,17
1,8	0,05	0,28	0,48	0,64	0,72	0,80	0,94	1,02	1,06	1,09	1,10	1,10	1,11
1,9	0,07	0,29	0,48	0,64	0,72	0,79	0,92	0,98	1,01	1,04	1,04	1,05	1,05
2,0	−0,08	−0,31	−0,49	−0,64	−0,71	−0,78	−0,90	−0,95	−0,97	−0,99	−0,995	−0,997	−0,999

Примечание. Числа, помещенные в правой части, обведенной жирными линиями, имеют знак минус.

3. Колебания годового стока

При наличии данных наблюдений колебания годового стока характеризуются фактическими величинами стока W_i (M_i, Q_i, y_i) за каждый год, а также модульными коэффициентами:

$$k_i = \frac{W_i}{W_0}\left(= \frac{M_i}{M_0} = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{y_i}{y_0}\right). \qquad (13—30)$$

Кроме того, как указано в п. 13—4,2, подсчитывают коэффициент вариации годового стока C_v и строят кривую обеспеченности $W=f(p)$, по ней определяют характерные величины стока, отвечающие различной обеспеченности p (1—10—50—90—99% и др.). В случае отсутствия непосредственных данных коэффициент вариации определяется на основе соответствующих карт изолиний Д. Л. Соколовского и по эмпирическим формулам: Крицкого — Менкеля, Шевелева — Соколовского и др.

Коэффициент асимметрии C_s обычно принимается равным $2C_v$.

Не следует переоценивать значения применения методов математической статистики в гидрологических расчетах. Во всех случаях следует учитывать физико-географические условия данного района (бассейна) и устанавливать расчетные величины расходов, стока и т. п. на основании углубленного анализа комплекса физико-географических и гидрологических условий; рекомендуется также производить параллельные расчеты по различным методам.

13—5. ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА

Внутригодовое распределение стока зависит от физико-географических условий, влияющих на режим уровней и расходов воды.

При наличии фактических наблюдений распределение стока внутри года устанавливается на основе этих наблюдений и выражается графиками и таблицами ежедневных, декадных или месячных расходов воды за характерные годы (в числе которых маловодный, средний и многоводный год).

При отсутствии или недостаточности данных наблюдений наряду с последними используют данные по рекам-аналогам.

Типовое распределение стока в различных зонах СССР может быть принято по таблицам Б. Д. Зайкова [12], Д. Л. Соколовского [21], С. Н. Никитина [14].

Согласно общей классификации гидрологического режима рек СССР (Б. Д. Зайкова) обычно различают следующие группы: а) реки с весенним половодьем (преобладает снеговое питание); б) реки с половодьем в теплую часть года (питают дожди и талые воды высокогорных снегов и ледников); в) реки с паводочным режимом (дождевые осадки и талые воды высокогорных снегов). Группы эти делятся на типы (10 типов), названия которых и характеристики по внутригодовому распределению стока приводятся в табл. 13—5.

Таблица 13—5

Типовое внутригодовое распределение стока

Группа	Тип	Название реки (типовой)	Распределение стока в % от годового по месяцам												Всего за год
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Реки с весенним половодьем	Казахстанский	Кура	>0	>0	>0	75	14	4	2	2	1	1	1	>0	100
	Восточно-Европейский	Волга	3	2	5	31	15	7	6	5	6	8	7	5	100
		Вятка	3	2	2	14	38	11	5	4	5	6	6	4	
		Дон	3	3	11	48	14	4	3	3	2	3	3	3	
	Западно-Сибирский	Кеть	3	2	2	4	22	32	12	5	5	5	4	4	100
		Васюган	3	3	3	3	20	29	12	6	6	6	5	4	
		Конда	2	2	2	6	18	20	17	12	8	6	4	3	
		Пур	3	3	3	2	7	33	14	10	9	7	5	4	
	Восточно-Сибирский	Н. Тунгуска	>0	>0	>0	>0	21	43	14	9	9	3	1	>0	100
		Алдан	1	1	1	1	25	30	11	11	9	5	3	2	
		Колыма	>0	>0	>0	>0	14	34	18	20	10	3	1	>0	
	Алтайский	Арагви	4	3	6	10	18	17	12	7	6	7	5	5	100
		Томь	1	1	1	8	34	20	9	5	8	8	3	2	
		Тымь (Алтай)	2	2	1	4	32	22	7	6	7	10	5	2	
Реки с половодьем в теплую часть года	Дальневосточный	Витим	1	>0	>0	>0	6	25	22	18	19	6	2	1	100
		Ока (Енисей)	1	1	1	2	9	21	22	22	14	5	1	1	
		Зея	>0	>0	>0	>0	16	21	20	19	16	5	2	1	
	Тянь-Шанский	Камчатка	5	4	4	4	8	19	17	11	9	8	6	5	100
		Вахш	2	2	3	5	9	16	24	20	9	4	3	3	
		Терек	3	3	3	5	11	18	19	15	10	6	4	3	
Реки с паводочным режимом	Причерноморский	Сочи	6	7	12	17	14	7	6	6	4	6	7	8	100
	Крымский	Салгир	10	10	18	15	11	6	7	3	2	3	5	10	100
		Сюдаш-Арю	11	11	18	10	4	2	>0	1	5	12	13	13	
	Северо-Кавказский	Камбилеевка (Терек)	5	5	7	11	12	18	10	9	7	6	5	5	100

13—6. МАКСИМАЛЬНЫЕ РАСХОДЫ

1. Основные положения

Различают максимальные расходы воды:

а) половодные, образующиеся главным образом от таяния снегов и ледников;

б) дождевые, образующиеся от дождей;

в) смешанные, образующиеся как от таяния снегов и ледников, так и от дождей.

Половодные и дождевые максимумы рассчитываются самостоятельно.

Смешанные максимумы относят к тому или иному виду в зависимости от того, какой из факторов формирования максимального расхода является преобладающим.

Выявление максимальных расходов ведется в соответствии с требованиями расчетной вероятности их, согласно СНиП (ч. II, глава II-Д. 2, § 6, пп. 6 и 7) в зависимости от категории и класса капитальности гидротехнических сооружений и условий их эксплуатации (табл. 13—6).

Таблица 13—6

Расчетная вероятность максимальных расходов

Классы капитальности сооружений	Условия эксплуатации	
	нормальные	чрезвычайные
	Расчетная вероятность максимальных расходов в %	
Постоянные сооружения:		
I класс	0,1	0,01
II класс	1,0	0,1
III „	2,0	0,5
IV „	5,0	1,0
Временные сооружения:		
III класс	2,0	1,0
IV „	5,0	—
V „	10,0	—

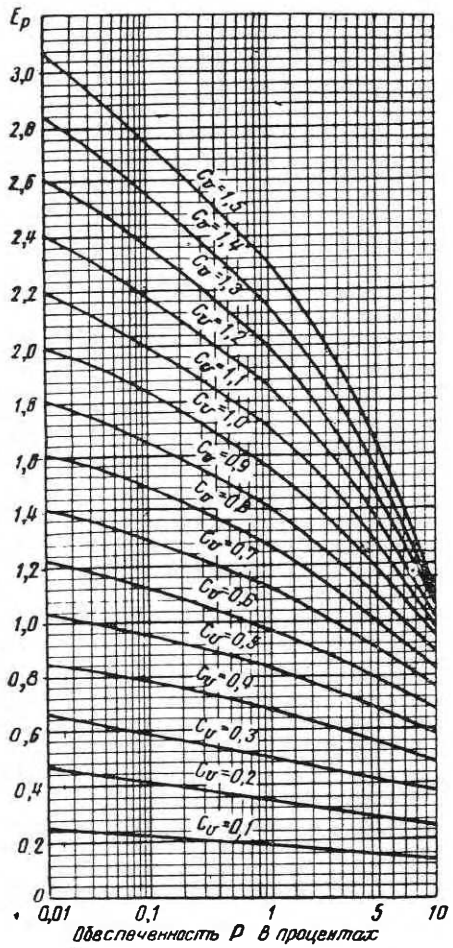
Расчеты максимальных расходов ведутся согласно ГОСТ 3999-48*.

При наличии длительного ряда данных (наблюденных или восстановленных по аналогу и пр.) кривая обеспеченности максимальных расходов строится на основе этих данных.

При недостаточности или отсутствии данных наблюдений применяются косвенные приемы с использованием карт изолиний и эмпирических формул.

Для построения кривой обеспеченности максимумов вычисляются обычными приемами среднемноголетний максимум и коэффициент C_v. Коэффициент асимметрии C_s принимается равным $2C_v$ для половодных максимумов и $4C_v$ для дождевых максимумов.

Для чрезвычайных условий эксплуатации сооружений расчетные максимумы определяют с учетом гарантийной поправки, исчисляемой по формуле:



Фиг. 13—6. График для определения поправки E_p при значениях коэффициента вариации годового стока $C_v=0,1\div1,5$

$$\Delta Q = + \frac{aE_p}{\sqrt{n}} Q'_p , \qquad (13—31)$$

где a — коэффициент запаса (принимается $a=1$ для рек с хорошей гидрологической изученностью и $a=2$ для рек, слабо изученных);

Q'_p — расход заданной обеспеченности (определяется по кривой обеспеченности);

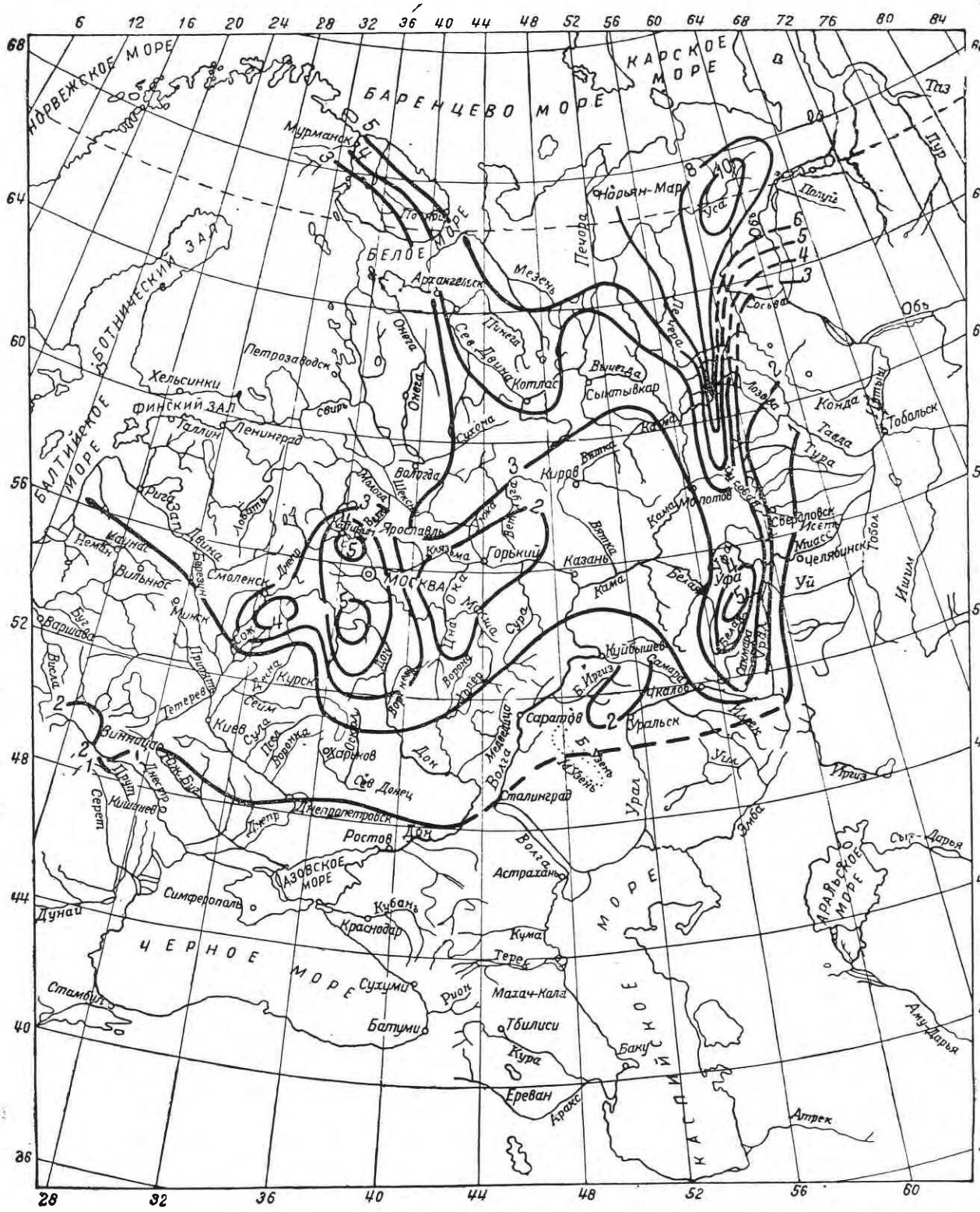
E_p — средняя квадратическая ошибка расчетного расхода, выраженная в долях Q'_p; определяется по графику (фиг. 13—6);

n — число лет наблюдений.

Согласно ГОСТ 3999-48, наблюдения признаются достаточными для надежной оценки Q_{max}, если при их длительности не менее 15 лет гарантийная поправка ΔQ не превышает 20% от величины расчетного расхода.

Во всех случаях необходимо сопоставлять теоретические кривые с данными наблюдений [см. формулу (13—29)], а также с имеющимися данными исторических паводков на соседних реках, находящихся в сходных физико-географических условиях.

* ГОСТ 3999-48 пересматривается.


НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦЕВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
БОТНИЧЕСКИЙ ЗАЛ
ФИНСКИЙ ЗАЛ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
АЗОВСКОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Мурманск
Архангельск
Нарьян-Мар
Салехард
Игарка
Туруханск
Дудинка
Норильск
Хатанга
Тикси
Якутск
Тобольск
Ханты-Мансийск
Сургут
Нижневартовск
Сыктывкар
Ухта
Воркута
Печора
Обь
Енисей
Лена
Хельсинки
Таллин
Ленинград
Петрозаводск
Рига
Вильнюс
Минск
Варшава
Смоленск
Калининград
Гданьск
Познань
Берлин
Прага
Вена
Будапешт
Братислава
Львов
Тернополь
Ивано-Франковск
Черновцы
Кишинев
Одесса
Николаев
Херсон
Запорожье
Днепропетровск
Харьков
Белгород
Курск
Орел
Тула
Рязань
Калуга
Тверь
Ярославль
Иваново
Владимир
Горький
Киров
Вятка
Пермь
Молотов
Свердловск
Челябинск
Магнитогорск
Оренбург
Уфа
Казань
Куйбышев
Самара
Саратов
Сталинград
Волгоград
Ростов
Краснодар
Сочи
Новороссийск
Керчь
Симферополь
Севастополь
Ялта
Феодосия
Мариуполь
Таганрог
Луганск
Донецк
Сумы
Чернигов
Гомель
Могилев
Брест
Гродно
Каунас
Клайпеда
Рига
Псков
Новгород
Вологда
Череповец
Архангельск
Мезень
Онега
Котлас
Киров
Пермь
Челябинск
Курган
Тюмень
Тобольск
Ханты-Мансийск
Сургут
Нижневартовск
Салехард
Игарка
Туруханск
Дудинка
Норильск
Хатанга
Тикси
Якутск
Мирный
Ленск
Усть-Кут
Братск
Иркутск
Чита
Улан-Удэ
Улан-Батор
Пекин
Тяньцзинь
Шанхай
Нанкин
Ухань
Чунцин
Чэнду
Сиань
Ланьчжоу
Урумчи
Алма-Ата
Фрунзе
Ташкент
Самарканд
Бухара
Ашхабад
Красноводск
Мары
Чарджоу
Нукус
Кзыл-Орда
Актюбинск
Гурьев
Форт-Шевченко
Баку
Тбилиси
Ереван
Батуми
Сухуми
Махач-Кала
Астрахань
Волгоград
Саратов
Пенза
Тамбов
Воронеж
Липецк
Курск
Белгород
Харьков
Полтава
Кременчуг
Днепропетровск
Запорожье
Херсон
Николаев
Одесса
Кишинев
Бухарест
Будапешт
Вена
Прага
Берлин
Варшава
Минск
Смоленск
Рига
Таллин
Хельсинки
Ленинград
Петрозаводск
Архангельск
Мурманск
Нарьян-Мар

2. Вычисление максимальных половодных расходов

При наличии данных наблюдений максимальные расходы определяются, как указано выше (принимая $C_s = 2C_v$ или $C_s = 4C_v$).

При отсутствии и недостаточности данных максимальные расходы вычисляются по эмпирическим формулам Д. Л. Соколовского, Л. Т. Федорова, А. В. Огиевского и др. ([7], [15], [18], [19], [23]).

а) Формула Д. Л. Соколовского:

$$Q_{max} = \frac{kA_pF}{\sqrt[4]{F}}\varepsilon\lambda, \qquad (13-32)$$

где $k=0{,}278$ — коэффициент перехода от стока, выраженного в *мм/час*, к максимальному расходу в *м³/сек*;

F — площадь бассейна в *км²*;

A_p — переменный параметр, определяемый по специальным таблицам [21]* или по картам для различных значений обеспеченности (фиг. 13—7, 13—8, 13—9, 13—10);

ε — коэффициент, учитывающий озерность ($f_{оз}$ — площадь озер) и заболоченность ($f_{бол}$ — площадь болот); если коэффициент озерности $\delta = f_{оз}\frac{100}{F} > 2\%$ и коэффициент заболоченности $\beta = f_{бол}\frac{100}{F} > 10\%$, то вводится коэффициент

$$\varepsilon = 1 - 0{,}60\lg(\delta + 0{,}20\beta + 1); \qquad (13-33)$$

λ — коэффициент редукции, учитывающий лесистость бассейна:

$$\lambda = 1 - \nu(\gamma - \gamma_1); \qquad (13-34)$$

γ — отношение площади бассейна, покрытой лесом, ко всей площади бассейна;

γ_1 — средняя лесистость всего района (отношение площади района, покрытой лесом, ко всей площади района);

ν — коэффициент, равный для лиственных лесов и лесостепной зоны 0,3, а для хвойных лесов севера — 0,6.

Для средних условий бассейнов ε и λ равны 1.

Формула применима для бассейнов площадью $F \geqslant 100$ *км²*.

Для бассейнов площадью водосбора F от 100 до 50 *км²* применяется формула:

$$Q_{max} = \frac{kA_pF}{\sqrt[6]{F+1}}. \qquad (13-35)$$

Для бассейнов с площадью $F \leqslant 50$ *км²* применяется формула:

$$Q_{max} = kA_pF. \qquad (13-36)$$

б) Формула Л. Т. Федорова ([15], [19], [23]):

$$q = \frac{2{,}5ABC}{\sqrt[8]{F}\sqrt{f_1 f_2}}, \qquad (13-37)$$

где q — средний модуль максимальных расходов в *л/сек км²*;

F — площадь водосбора в *км²*;

f_1 и f_2 — параметры, учитывающие влияние залесенности и заболоченности на основе обработки фактических материалов (даются в таблице, разработанной автором [23]);

A, B, C — физико-географические характеристики, определяемые посредством соответствующих картограмм ([23] — табл. 24, 26, 27).

Формула применима только для района Европейской части СССР — для безозерных и незарегулированных рек.

в) Формула А. В. Огиевского ([18], [19]):

$$Q_m = 0{,}0116\frac{A}{t_c}F_д k_2 k_3 \beta\varphi\tau\lambda, \qquad (13-38)$$

где Q_m — расчетный максимальный расход в *м³/сек*;

A — суммарный весенний сток в *мм*;

t_c — продолжительность отдачи снеготаяния в сутках;

$F_д$ — действующая площадь, с которой формируется максимальный расход, в *км²*;

k_2, k_3, β, φ, τ — коэффициенты, учитывающие неравномерность суточной отдачи стекания (k_2), неравномерность внутрисуточной отдачи (k_3), залесенность (β), заболоченность (φ), регулирующее влияние прудов и озер (τ);

λ — коэффициент повторяемости;

0,0116 — коэффициент размерности.

Формула применима для районов Украинской ССР; автором разработаны таблицы коэффициентов и карты для определения значений отдельных параметров (A, t_c, k_2, k_3 и т. д.).

3. Вычисление максимальных дождевых расходов

а) При отсутствии и недостаточности данных наблюдений пользуются обычно формулой Д. Л. Соколовского [21], [22]:

$$Q_{max} = \frac{0{,}28\,H_т\eta F}{t}\varphi\delta\mu + Q_{гр}, \qquad (13-39)$$

где $H_т$ — количество осадков в *мм* за расчетную продолжительность времени T, определяемое по формуле:

$$H_т = S(60T)^{1/3}; \qquad (13-40)$$

S — расчетная интенсивность осадков в *мм/мин* для различной обеспеченности; определяется по картам изолиний (фиг. 13—11, 13—12 и 13—13);

T — расчетная продолжительность осадков; определяется по формуле:

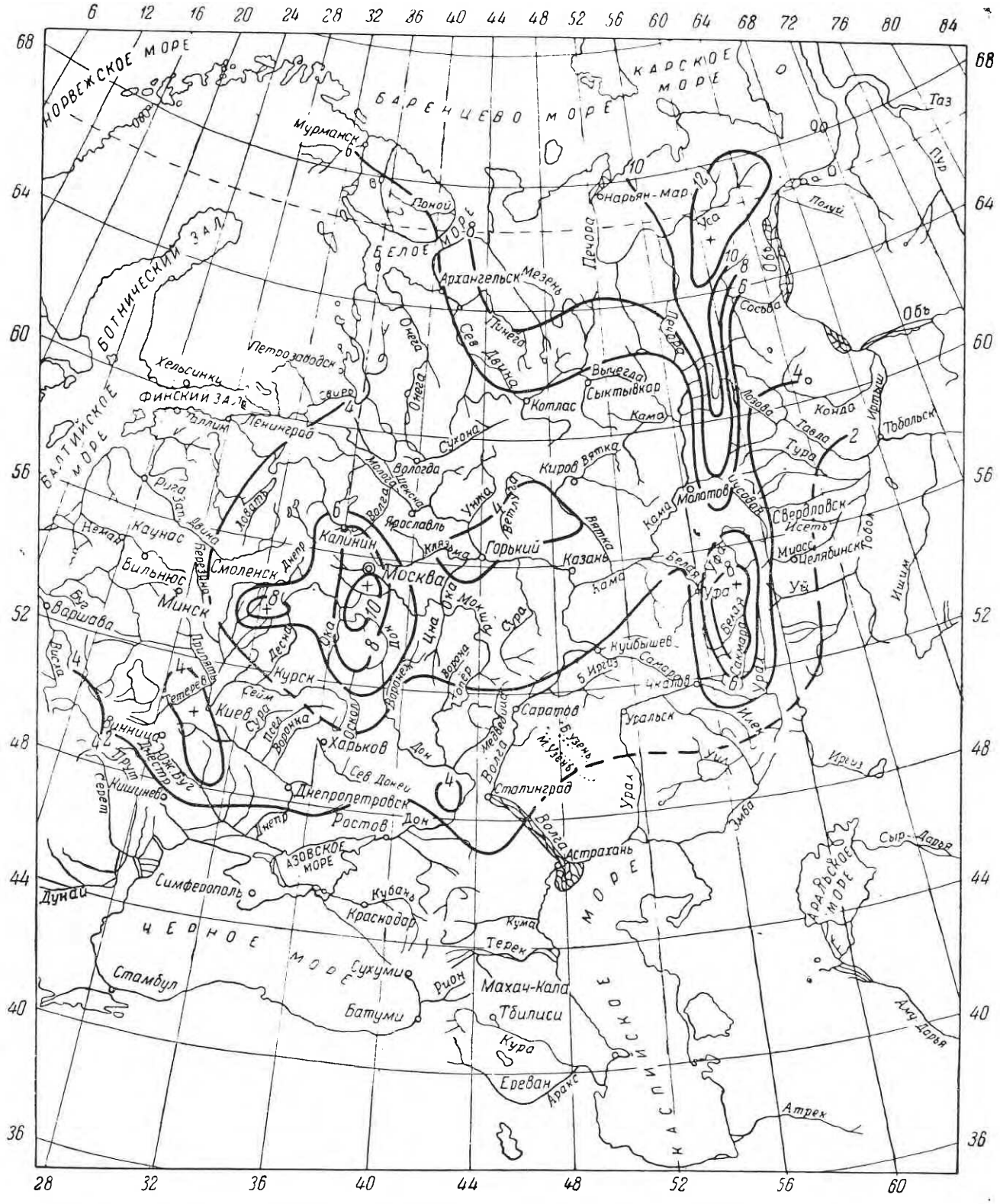
$$T = \vartheta t; \qquad (13-41)$$

ϑ — коэффициент замедления стока:

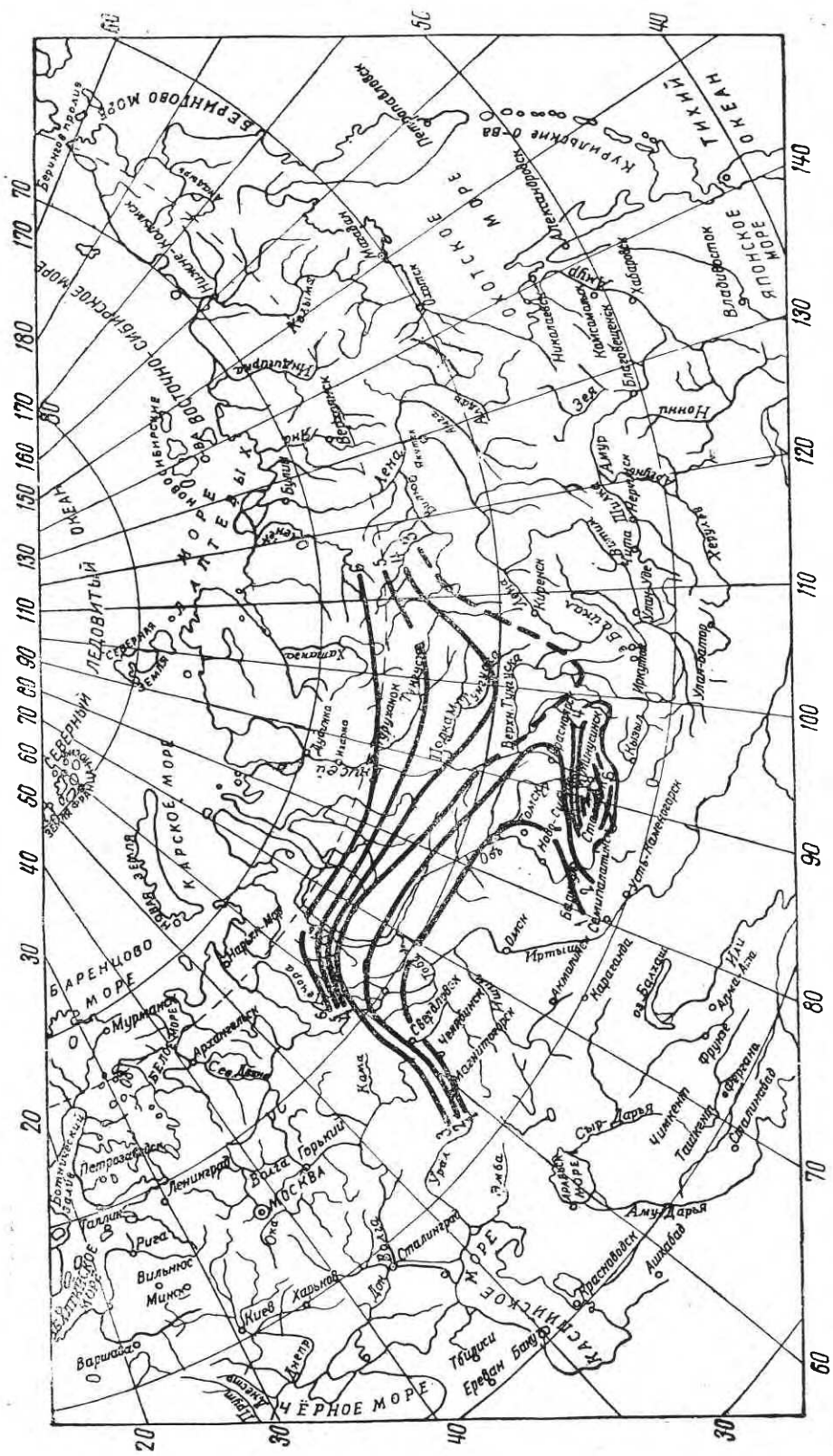
$$\vartheta = (t+1)^{-0{,}20}; \qquad (13-42)$$

* При пользовании таблицами Соколовского следует принимать $k = 1$.

НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦОВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
БОТНИЧЕСКИЙ ЗАЛ.
ФИНСКИЙ ЗАЛ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
АЗОВСКОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Мурманск
Архангельск
Нарьян-Мар
Хельсинки
Таллин
Ленинград
Петрозаводск
Рига
Вильнюс
Каунас
Минск
Смоленск
Калинин
Ярославль
Горький
Киров
Вятка
Казань
Молотов
Свердловск
Челябинск
Уфа
Куйбышев
Самара
Саратов
Сталинград
Астрахань
Ростов
Харьков
Киев
Одесса
Днепропетровск
Симферополь
Краснодар
Сухуми
Батуми
Мазач-Кала
Тбилиси
Баку
Ереван
Стамбул
Дунай
Днестр
Прут
Серет
Буг
Висла
Неман
Двина
Волга
Дон
Урал
Обь
Таз
Пур
Енисей
Иртыш
Тобольск
Сыктывкар
Вычегда
Печора
Мезень
Онега
Северная Двина
Сосьва
Полуй
Конда
Тавда
Тура
Исеть
Миасс
Тобол
Ишим
Уй
Белая
Кама
Вятка
Ока
Москва
Клязьма
Волга
Шексна
Молога
Сухона
Вага
Пинега
Мезень
Десна
Сож
Припять
Сейм
Курск
Воронеж
Цна
Хопёр
Медведица
Иловля
Бузулук
Большой Иргиз
Самарская Лука
Оренбург
Орск
Илек
Уральск
Чкалов
Актюбинск
Иртыш
Сыр-Дарья
Амударья
Эмба
Кума
Терек
Кура
Араке
Ингури
Рион
Южный Буг
Днестр
Сев. Донец
Оскол
Псел
Ворскла
Десна
Снов
Беседь
Сож
Ипуть
Проня
Ока
Мокша
Сура
Цна
Хопёр
Медведица
Иловля



Фиг. 13—9. Карта изолиний параметра A_p в мм/час к формуле Д. Л. Соколовского для определения максимальных расходов талых вод (5% обеспеченности)


ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН
ТИХИЙ ОКЕАН
ЧЕРНОЕ МОРЕ
БАРЕНЦОВО МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
ОХОТСКОЕ МОРЕ
ЯПОНСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Ленинград
Архангельск
Мурманск
Петрозаводск
Рига
Вильнюс
Минск
Киев
Харьков
Варшава
Сталинград
Горький
Казань
Свердловск
Челябинск
Магнитогорск
Омск
Новосибирск
Красноярск
Иркутск
Якутск
Хабаровск
Владивосток
Ташкент
Фрунзе
Алма-Ата
Ашхабад
Баку
Тбилиси
Ереван
Улан-Батор
Чита
Благовещенск
Комсомольск
Николаевск
Петропавловск
Берингов пролив
Северная Земля
Новая Земля
Земля Франца-Иосифа
Обь
Енисей
Лена
Амур
Волга
Дон
Кама
Урал
Сыр-Дарья
Аму-Дарья
Иртыш
Ангара
Нижняя Тунгуска
Подкаменная Тунгуска
Верхняя Тунгуска
Вилюй
Алдан
Индигирка
Колыма
Яна
Оленек
Хатанга
Печора
Онега
Северная Двина
Западная Двина
Неман
Висла
Днепр
Днестр
Дунай
Рейн
Темза
Сена
Луара
Гаронна
Эльба
Одер
Шпрее
Везер
Эмс
Рона
Тибр
Эбро
Тежу
Дору
Гвадиана
Гвадалквивир
Гвадалквивир
Сена
Луара
Гаронна
Рона
Эбро
Тежу
Дору
Гвадиана
Гвадалквивир
Тибр
Эльба
Одер
Шпрее
Везер
Эмс
Рейн
Темза
Висла
Днепр
Днестр
Дунай
Неман
Западная Двина
Северная Двина
Печора
Онега
Хатанга
Оленек
Яна
Индигирка
Колыма
Алдан
Вилюй
Нижняя Тунгуска
Подкаменная Тунгуска
Верхняя Тунгуска
Ангара
Иртыш
Обь
Енисей
Лена
Амур
Зея
Бурея
Уссури
Сунгари
Хуанхэ
Янцзы
Хуанхэ
Меконг
Инд
Ганг
Брахмапутра
Салуин
Иравади
Тигр
Евфрат
Нил
Конго
Замбези
Лимпопо
Оранжевая
Миссисипи
Миссури
Колорадо
Рио-Гранде
Амазонка
Ла-Плата
Парана
Уругвай
Ориноко
Магдалена
Амазонка
Ла-Плата
Парана
Уругвай
Ориноко
Миссисипи
Миссури
Колорадо
Рио-Гранде
Нил
Конго
Замбези
Лимпопо
Оранжевая
Тигр
Евфрат
Инд
Ганг
Брахмапутра
Салуин
Иравади
Меконг
Хуанхэ
Янцзы
Хуанхэ
Сунгари
Уссури
Зея
Бурея
Амур
Лена
Енисей
Обь

t — время добегания в часах:

$$t = \frac{L}{3{,}6\ v}; \qquad (13-43)$$

L — длина реки от истока до расчетного створа в *км*;
v — наибольшая скорость течения (средняя по сечению) в *м/сек*;
η — коэффициент стока; определяется по табл. 13—7; для бассейнов с водопроницаемыми почвами значения η снижаются на 30—50%;
F — площадь водосбора в *км*²;
φ — коэффициент формы гидрографа, характеризуемый отношением t_1 — продолжительности спада — к t_2 — продолжительности подъема паводка; $\gamma = \frac{t_1}{t_2}$:

$$\varphi = \frac{12}{4 + 3\gamma}; \qquad (13-44)$$

для малых рек и логов — $\gamma = 2{,}0$; для средних рек с обычными поймами — $\gamma = 2{,}5$—$3{,}0$; для больших рек со значительными поймами — $\gamma = 4{,}0$;
δ — коэффициент учета озерности и заболоченности бассейна:

$$\delta = 1 - 0{,}8 \lg (1 + \delta_0 + 0{,}2\,\beta_0); \qquad (13-45)$$

δ_0 — озерность бассейна в %;
β_0 — заболоченность бассейна в %;
μ — коэффициент руслового регулирования:

Таблица 13—7

Коэффициенты стока

Зона или район	Обеспеченность в %			
	50	10	2—3	1
Лесная и лесостепная зона Европейской территории СССР, а также степная зона для рек с $F < 500$—$1\,000$ *км*²	0,05—0,10	0,10—0,15	0,15—0,20	0,20—0,30
Предгорные районы Урала и Карпат	0,10—0,15	0,20—0,25	0,25—0,30	0,30—0,50
Дальневосточный край, Черноморское побережье Кавказа, горные реки Карпат, малые реки Донбасса и Крыма с $t<2$ час.	0,15—0,20	0,25—0,30	0,30—0,40	0,40—0,60

$$\mu = 1 - \frac{h\,\Omega}{W}; \qquad (13-46)$$

h — глубина заполнения поймы;
Ω — площадь водного зеркала русла;
$W = 1\,000 H_т\ \eta\ F$ — объем паводка;
$Q_{гр}$ — расход грунтового питания, принимается приближенно:

$$Q_{гр} = \frac{M_0 F}{1\,000}; \qquad (13-47)$$

M_0 — норма стока в *л/сек км*² (по карте, см. фиг. 13—4 и 13—5).

Таблица 13—8

Значение коэффициента α при величине $c>12$

Длина бассейна в *км*	Уклон											
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010	0,015	0,020	0,050	0,100
0	0,2	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,000	1,100	1,150	1,200	1,250
1	0,180	0,225	0,270	0,360	0,450	0,540	0,720	0,900	0,990	1,035	1,080	1,125
2	0,150	0,188	0,225	0,300	0,375	0,450	0,600	0,750	0,825	0,863	0,900	0,938
3	0,110	0,138	0,165	0,220	0,275	0,320	0,440	0,550	0,605	0,633	0,660	0,688
4	0,090	0,113	0,135	0,180	0,225	0,270	0,360	0,450	0,495	0,518	0,540	0,563
5	0,074	0,093	0,111	0,148	0,185	0,222	0,296	0,370	0,407	0,426	0,444	0,463
6	0,063	0,079	0,095	0,127	0,159	0,190	0,254	0,317	0,349	0,365	0,380	0,396
7	0,056	0,070	0,084	0,112	0,140	0,168	0,224	0,280	0,308	0,322	0,336	0,350
8	0,050	0,063	0,075	0,100	0,125	0,150	0,200	0,250	0,275	0,288	0,300	0,313
10	0,042	0,053	0,063	0,084	0,105	0,126	0,168	0,210	0,231	0,242	0,252	0,263
12	0,035	0,046	0,055	0,073	0,092	0,110	0,146	0,183	0,201	0,210	0,220	0,229
14	0,030	0,039	0,049	0,066	0,083	0,098	0,131	0,164	0,180	0,189	0,197	0,205
16	0,026	0,035	0,043	0,060	0,075	0,090	0,120	0,150	0,165	0,173	0,180	0,188
18	0,023	0,031	0,038	0,053	0,068	0,082	0,109	0,136	0,150	0,156	0,163	0,170
20	0,021	0,028	0,034	0,048	0,061	0,075	0,100	0,125	0,138	0,144	0,150	0,156

Таблица 13—9

Значение коэффициента α при величине $c \leqslant 12$

Длина бассейна в *км*	Уклон											
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010	0,015	0,020	0,050	0,100
0	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,15	1,2	1,25
1	0,18	0,225	0,270	0,36	0,450	0,54	0,72	0,90	0,990	1,035	1,08	1,125
2	0,15	0,188	0,225	0,30	0,375	0,45	0,60	0,75	0,825	0,863	0,90	0,938
3	0,11	0,138	0,165	0,22	0,275	0,33	0,44	0,55	0,605	0,633	0,66	0,688
4	0,083	0,104	0,135	0,18	0,225	0,27	0,36	0,45	0,495	0,518	0,54	0,563
5	0,066	0,083	0,108	0,144	0,185	0,222	0,296	0,37	0,407	0,426	0,444	0,463
6	0,055	0,069	0,090	0,120	0,154	0,185	0,254	0,317	0,349	0,365	0,380	0,396
7	0,047	0,059	0,077	0,103	0,132	0,159	0,218	0,272	0,308	0,322	0,336	0,350
8	0,041	0,052	0,068	0,090	0,116	0,139	0,191	0,238	0,270	0,282	0,300	0,313
10	0,033	0,041	0,054	0,072	0,093	0,110	0,152	0,190	0,216	0,225	0,240	0,250
12	0,028	0,035	0,045	0,060	0,077	0,093	0,127	0,159	0,180	0,188	0,200	0,209
14	0,024	0,030	0,039	0,051	0,066	0,079	0,109	0,136	0,154	0,161	0,171	0,179
16	0,021	0,026	0,034	0,045	0,058	0,069	0,095	0,119	0,135	0,141	0,150	0,157
18	0,018	0,023	0,030	0,040	0,051	0,062	0,085	0,106	0,120	0,125	0,133	0,139
20	0,017	0,021	0,027	0,036	0,046	0,056	0,076	0,095	0,108	0,113	0,120	0,125

Для малых безозерных рек можно применять формулу:

$$Q_{max} = \frac{0{,}28 H_\tau \eta F}{t}, \qquad (13—48)$$

(обозначения см. выше).

б) Для районов Украинской ССР лучшие результаты дает формула А. В. Огиевского, учитывающая местные особенности [18], [19].

в) Для малых водосборов (при $F \leqslant 100$ *км*²) определение максимальных расходов можно производить по формуле Научно-технического комитета НКПС (Е. В. Близняк и Г. Д. Дубелир) [7]:

$$Q_{max} = C\alpha F, \qquad (13—49)$$

где C — географический параметр, определяемый по картам изолиний (фиг. 13—14 и 13—15);

α — коэффициент, определяемый по табл. 13—8 и 13—9 в зависимости от уклона реки и длины бассейна;

F — площадь водосбора в *км*².

В зависимости от водопроницаемости почвогрунтов производится уменьшение Q_{max} до 50% и в зависимости от лесистости до 20% (при $F > 20$ *км*²).

При мало водопроницаемых почвах (жирная глина, скала и т. п.) допускается повышение Q_{max} до 20%.

Расходы, вычисленные по формуле (13—49), имеют обеспеченность примерно 2%.

Для перехода к другим обеспеченностям можно вводить коэффициенты согласно табл. 13—10.

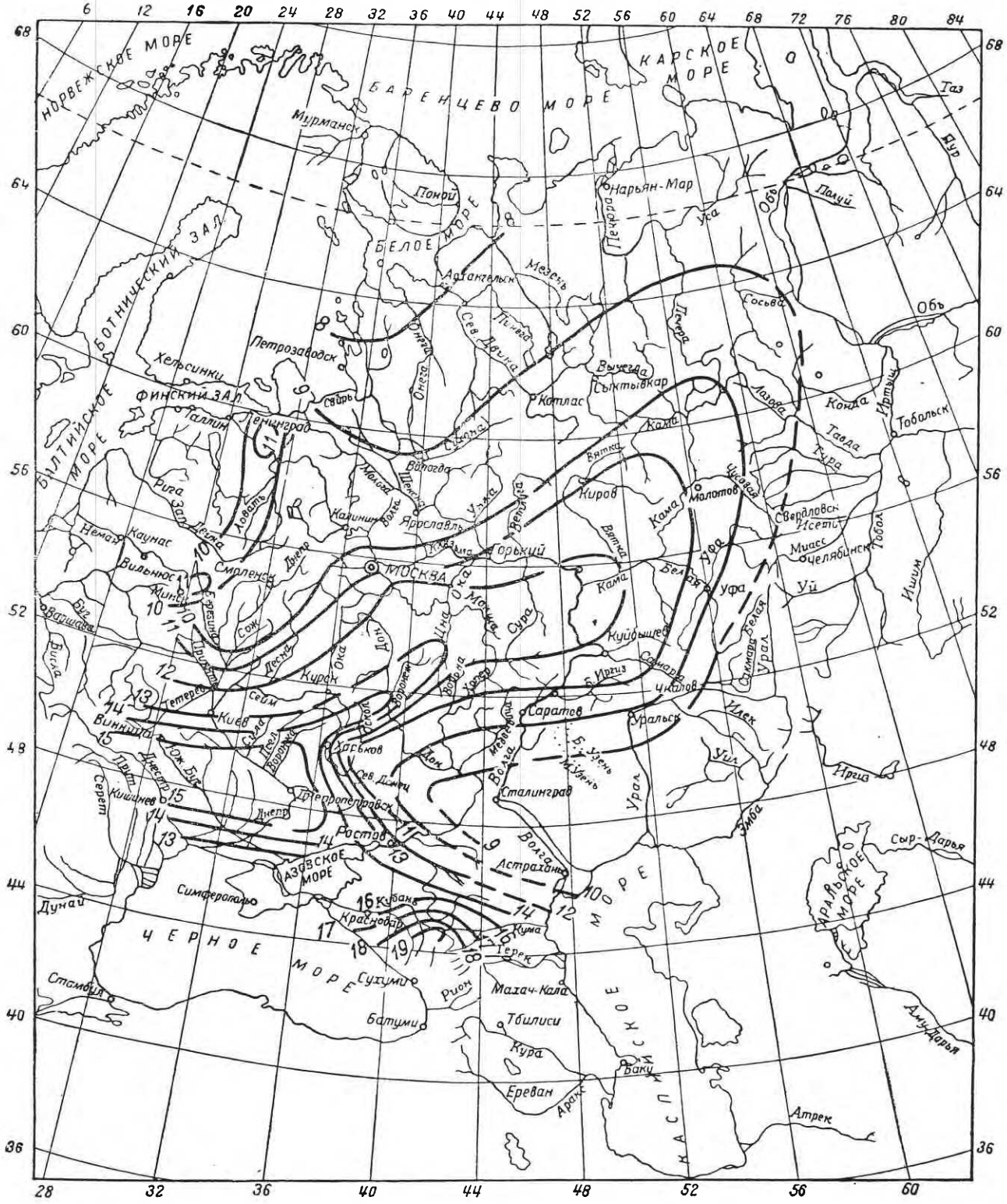
Таблица 13—10

Поправочные приближенные коэффициенты к обеспеченности

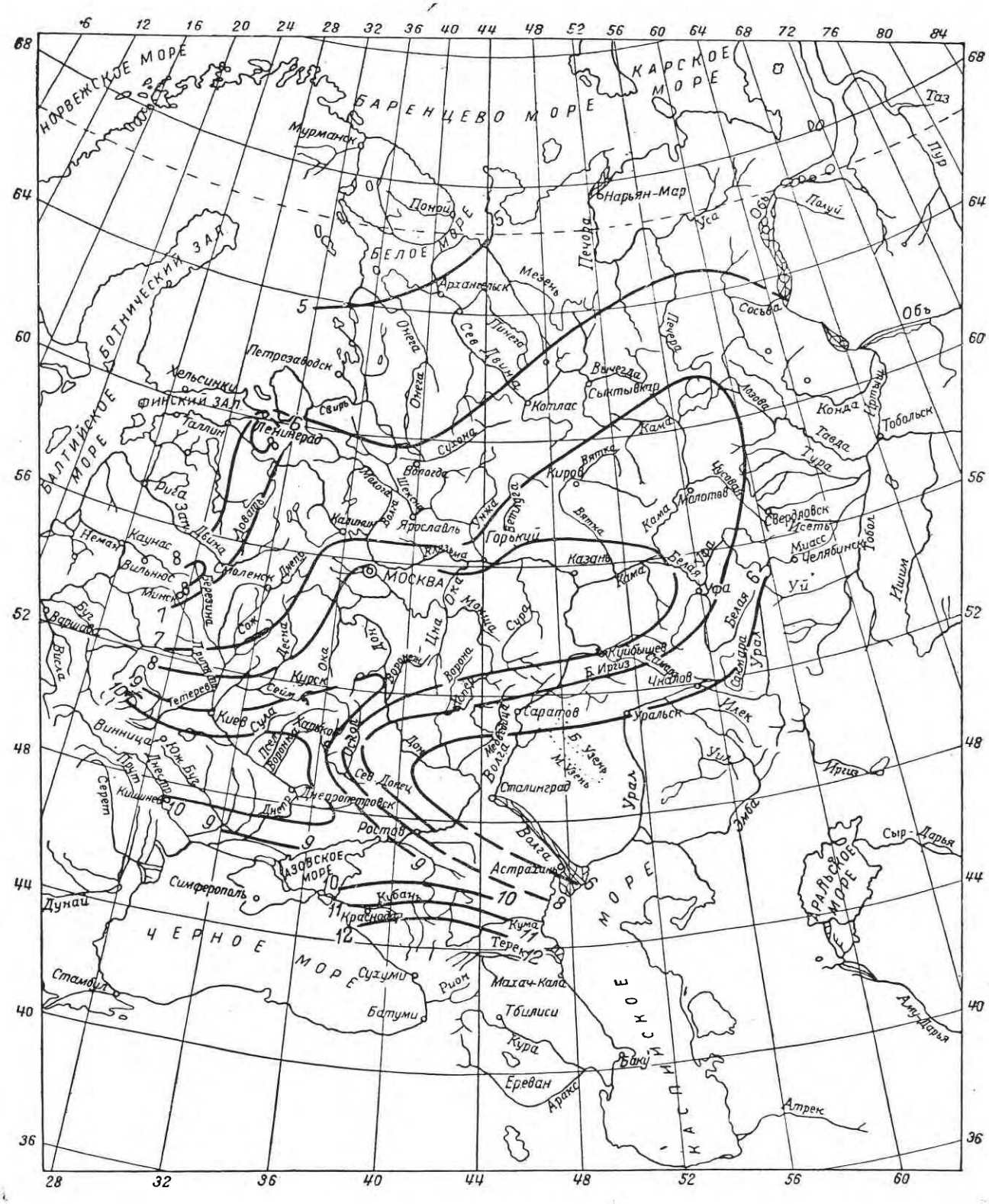
Районы Европейской части СССР	Обеспеченность в %								
	0,1	1	2	5	10	20	30	40	50
Западный, Северо-Западный, Центральный . . .	1,52	1,12	1,00	0,83	0,70	0,57	0,48	0,42	0,37
Южный .	1,75	1,16	1,00	0,77	0,60	0,44	0,34	0,28	0,23

г) Другие формулы. Кроме формул, перечисленных в пп. «а», «б» и «в», имеется ряд ведомственных (например, ДорНИИ, МПС), которыми можно пользоваться также при расчетах применительно к условиям их разработки.

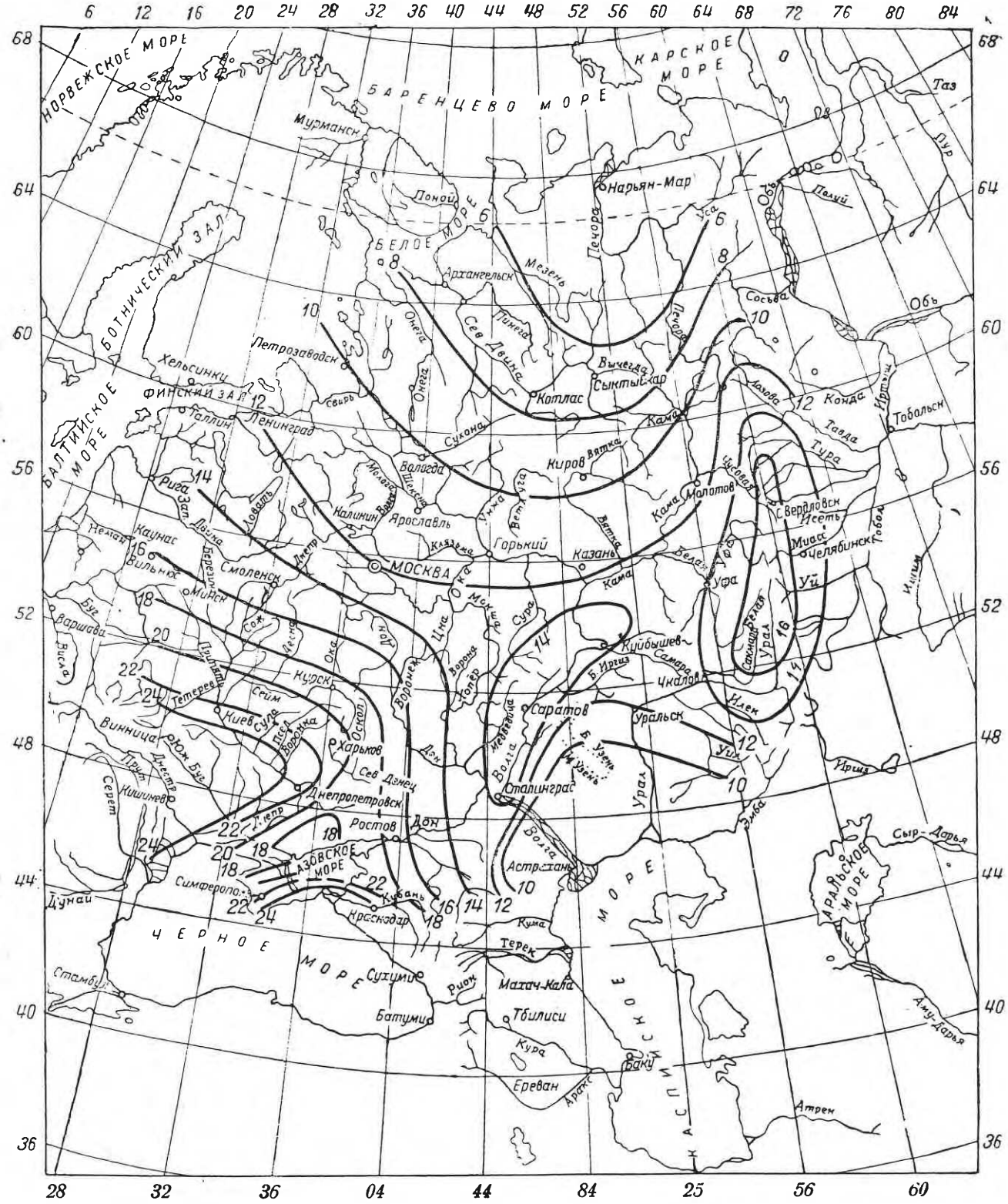
Фиг. 13—11. Карта изолиний ливневого коэффициента S в мм/мин (средние значения)

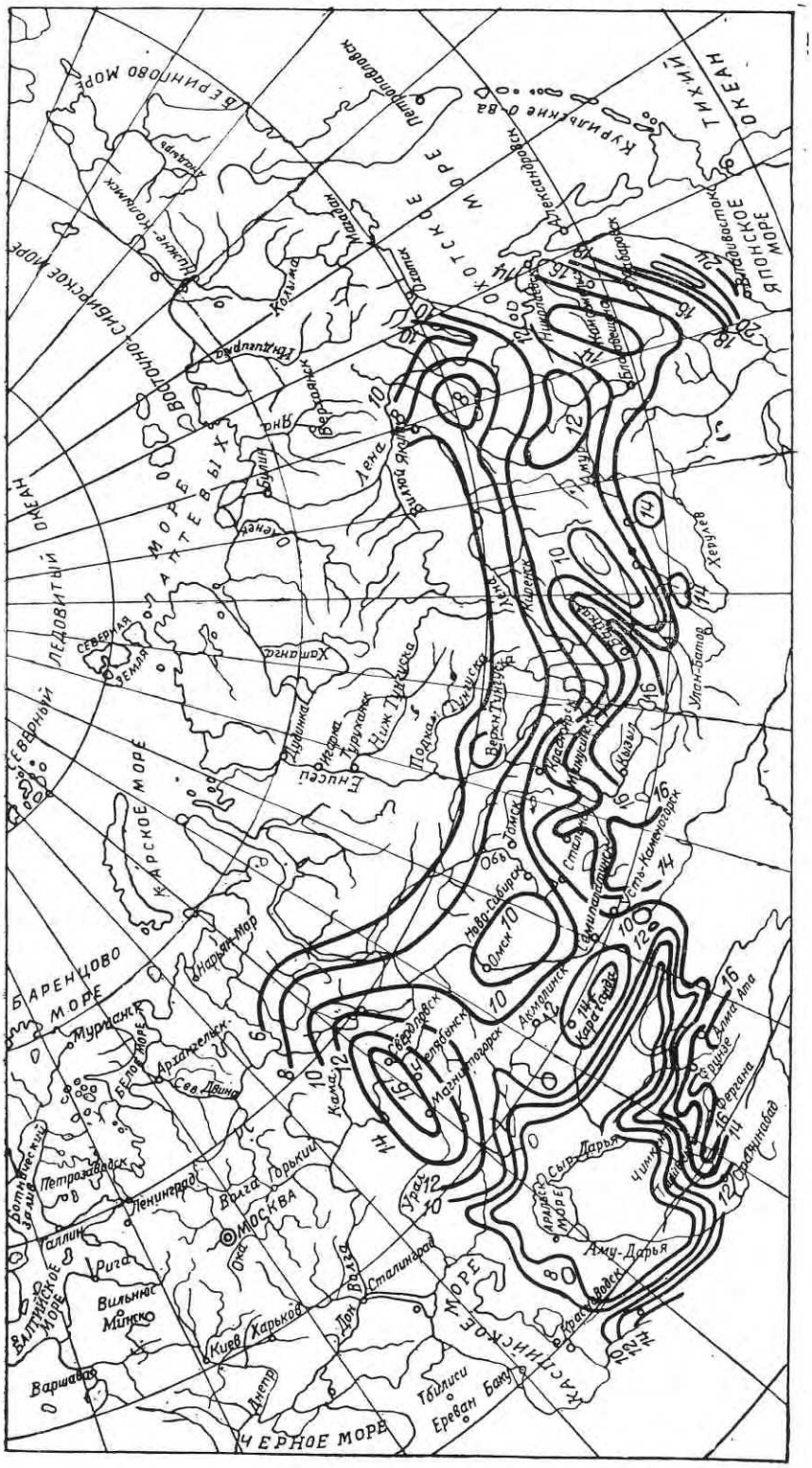


Фиг. 13—12. Карта изолиний ливневого коэффициента S в мм/мин (1% обеспеченности)



Фиг. 13—13. Карта изолиний ливневого коэффициента S в мм/мин (10% обеспеченности)


НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦЕВО МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БОТНИЧЕСКИЙ ЗАЛ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ФИНСКИЙ ЗАЛ
БЕЛОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
АЗОВСКОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
АРАЛЬСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Мурманск
Архангельск
Нарьян-Мар
Хельсинки
Таллин
Ленинград
Рига
Вильнюс
Каунас
Минск
Смоленск
Варшава
Петрозаводск
Вологда
Ярославль
Калинин
Горький
Киров
Казань
Молотов
Свердловск
Челябинск
Куйбышев
Самара
Саратов
Уральск
Оренбург
Сталинград
Астрахань
Харьков
Днепропетровск
Ростов
Киев
Винница
Кишинев
Симферополь
Краснодар
Сухуми
Батуми
Махач-Кала
Тбилиси
Баку
Ереван
Стамбул
Курск
Воронеж
Тобольск
Конда
Сосьва
Обь
Таз
Пур
Дунай
Днестр
Дон
Волга
Урал
Кама
Ока
Сев. Двина
Печора
Онега
Мезень
Вятка
Сура
Цна
Ворскла
Оскол
Сев. Донец
Терек
Кура
Аракс
Сыр-Дарья
Аму-Дарья
Атрек
Илек
Ишим
Тура
Тавда
Иртыш
Иртыш
Ишим
Ветлуга
Унжа
Шексна
Молога
Свирь
Сухона
Вычегда
Пинега
Лодьма
Ижма
Усть-Цильма
Усть-Уса
Усть-Кулом
Усть-Вымь
Усть-Выя
Усть-Ижма
Усть-Ухта
Усть-Ваймуга
Усть-Пинега
Усть-Шонга
Усть-Вага
Усть-Ухтома
Усть-Ухтомка
Усть-Ухтомский
Усть-Ухтомский
Усть-Ухтомский


ТИХИЙ ОКЕАН
ЯПОНСКОЕ МОРЕ
ОХОТСКОЕ МОРЕ
БЕРИНГОВО МОРЕ
ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН
МОРЕ ЛАПТЕВЫХ
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ
КАРСКОЕ МОРЕ
БАРЕНЦОВО МОРЕ
БЕЛОЕ МОРЕ
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
МОСКВА
Ленинград
Мурманск
Архангельск
Петрозаводск
Таллин
Рига
Вильнюс
Минск
Киев
Харьков
Варшава
Сталинград
Куйбышев
Саратов
Челябинск
Магнитогорск
Свердловск
Пермь
Казань
Горький
Уфа
Нижнекамск
Тюмень
Тобольск
Омск
Новосибирск
Томск
Барнаул
Красноярск
Иркутск
Братск
Усть-Илимск
Якутск
Хатанга
Игарка
Дудинка
Норильск
Енисей
Лена
Колыма
Анадырь
Хабаровск
Комсомольск
Владивосток
Благовещенск
Чита
Улан-Батор
Ташкент
Фрунзе
Алма-Ата
Караганда
Акмолинск
Целиноград
Петропавловск
Кокчетав
Семипалатинск
Усть-Каменогорск
Ташауз
Чарджоу
Ашхабад
Красноводск
Баку
Ереван
Тбилиси
Сев. Двина
Кама
Волга
Ока
Днепр
Днестр
Обь
Иртыш
Ангара
Амур
Сыр-Дарья
Аму-Дарья
Чу
Или
Тургай
Нижняя Тунгуска
Подкаменная Тунгуска
Верхняя Тунгуска
Северная Земля
Новосибирские о-ва
Курильские о-ва
Сахалин
Хингано
Шантарские о-ва
Медвежьи о-ва
Новая Земля
Земля Франца-Иосифа
Земля Александры
Земля Вильчека
Земля Короля Карла
Земля Принца Георга
Земля Императрицы Александры
Земля Императора Николая II
Земля Императора Франца-Иосифа
Земля Императора Вильгельма II
Земля Императора Николая I
Земля Императора Александра III
Земля Императора Александра II

13—7. МИНИМАЛЬНЫЕ РАСХОДЫ

При наличии непосредственных данных длительных наблюдений минимальные характерные расходы определяются по этим данным или на основе кривых обеспеченности.

При недостаточности или отсутствии наблюдений минимальные расходы определяются по аналогии со сходными реками или по приближенному методу Н. Д. Антонова (ГГИ) и др. [3].

Минимальные модули:

а) для летнего минимума

$$M_л = M_0^{1,3}\left(0{,}53\,F^{0,035} - \frac{f_л}{\sqrt[4]{\delta + 1}}\right); \qquad (13—50)$$

б) для зимнего минимума

$$M_з = M_0^{0,82}\left(0{,}63\,F^{0,035} - \frac{f_з}{\sqrt[4]{\delta + 1}}\right); \qquad (13—51)$$

в) для среднемесячного минимума

$$M_с = M_0^{0,82}\left(0{,}63\,F^{0,035} - \frac{f_с}{\sqrt[4]{\delta + 1}}\right). \qquad (13—52)$$

Значения параметров $f_л$, $f_з$ и $f_с$ находят по картам (фиг. 13—16, 13—17 и 13—18); δ — процент озерности.

Коэффициент вариации:

а) для летних минимумов

$$C_{v_л} = 6{,}0\,C_{v_0}^2; \qquad (13—53)$$

б) для зимних минимумов

$$C_{v_з} = 4{,}0\,C_{v_0}^{1,75}; \qquad (13—54)$$

в) для среднемесячных минимумов

$$C_{v_с} = 2{,}5\,C_{v_0}^{1,5}, \qquad (13—55)$$

где C_{v_0} — коэффициенты вариации годового стока.

Для зимних минимумов при $C_{v_з} \leqslant 0{,}30$ следует принимать $C_s = 0$; при $C_{v_з}$ от 0,30 до 0,40 — для зимних минимумов и $C_{v_с} \leqslant 0{,}30$ для среднемесячных минимумов можно принимать $C_s = 0$ только в исключительных случаях, когда требуется при расчетах предусмотреть самые крайние, неблагоприятные варианты. При других, более высоких, значениях C_v для зимних и среднемесячных минимумов и при всех значениях для летних минимумов можно принимать $C_s = 2C_v$.

При определении минимальных расходов мало исследованных и неисследованных рек, в особенности малых, обязательно применять метод аналогов. Окончательное значение величин следует принимать на основании детального анализа результатов расчетов по различным методам, причем особое внимание должно быть обращено на физико-географические условия исследуемого района.

При определении минимальных расходов необходимо учитывать возможность явления пересыхания и промерзания ($Q_{min} = 0$). В северных, северо-западных, западных и центральных районах Европейской части СССР могут пересыхать и промерзать реки с площадью бассейна до 50—500 *км²*, а иногда и более; в степных, южных районах могут пересыхать реки с бассейнами до 1 000—10 000 *км²*, а иногда и более; в северных районах Сибири площади промерзающих рек во много раз больше [9].

13—8. ЗИМНИЙ РЕЖИМ

Зимний режим подлежит дополнительному изучению и освещению на основе непосредственных данных наблюдений и литературных источников. Обычно необходимы сведения об уровнях и расходах воды; характеристики осеннего и весеннего ледохода и ледостава; данные о шуге, донном льде, зажорах и заторах, о ледяном покрове, промерзании реки и пр. При отсутствии непосредственных данных наблюдений толщина льда на реках определяется по формулам Быдина—Белоконь [7], [9]:

а) при наличии данных среднесуточных температур

$$\delta_л = 2\sqrt{\Sigma\, t_с^0 + 70°}; \qquad (13—56)$$

б) при наличии данных среднемесячных температур

$$\delta_л = 11\sqrt{\Sigma\, t_м^0 + 2{,}3°}, \qquad (13—57)$$

где $\delta_л$ — толщина льда к концу расчетного периода в *см*;

$\Sigma\, t_с^0$ — сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха за расчетный период с начала перехода среднесуточных температур через 0°;

$\Sigma\, t_м^0$ — сумма среднемесячных отрицательных температур воздуха за расчетный период.

13—9. СТОК НАНОСОВ

Способы определения расходов взвешенных донных (влекомых) и растворенных наносов указаны в п. 12—6 гл. 12.

При наличии значительного числа измеренных расходов наносов устанавливаются соответствующие кривые зависимости расходов наносов от расходов воды и строятся календарные графики стока (гидрографы) наносов за ряд лет.

По этим и другим данным определяют годовые количества взвешенных, донных и растворенных наносов ($R_{взв}$, $R_{дон}$, $R_р$), среднемноголетние и характерные величины и пр., а также суммарный сток наносов

$$R = R_{взв} + R_{дон} + R_р \qquad (13—58)$$

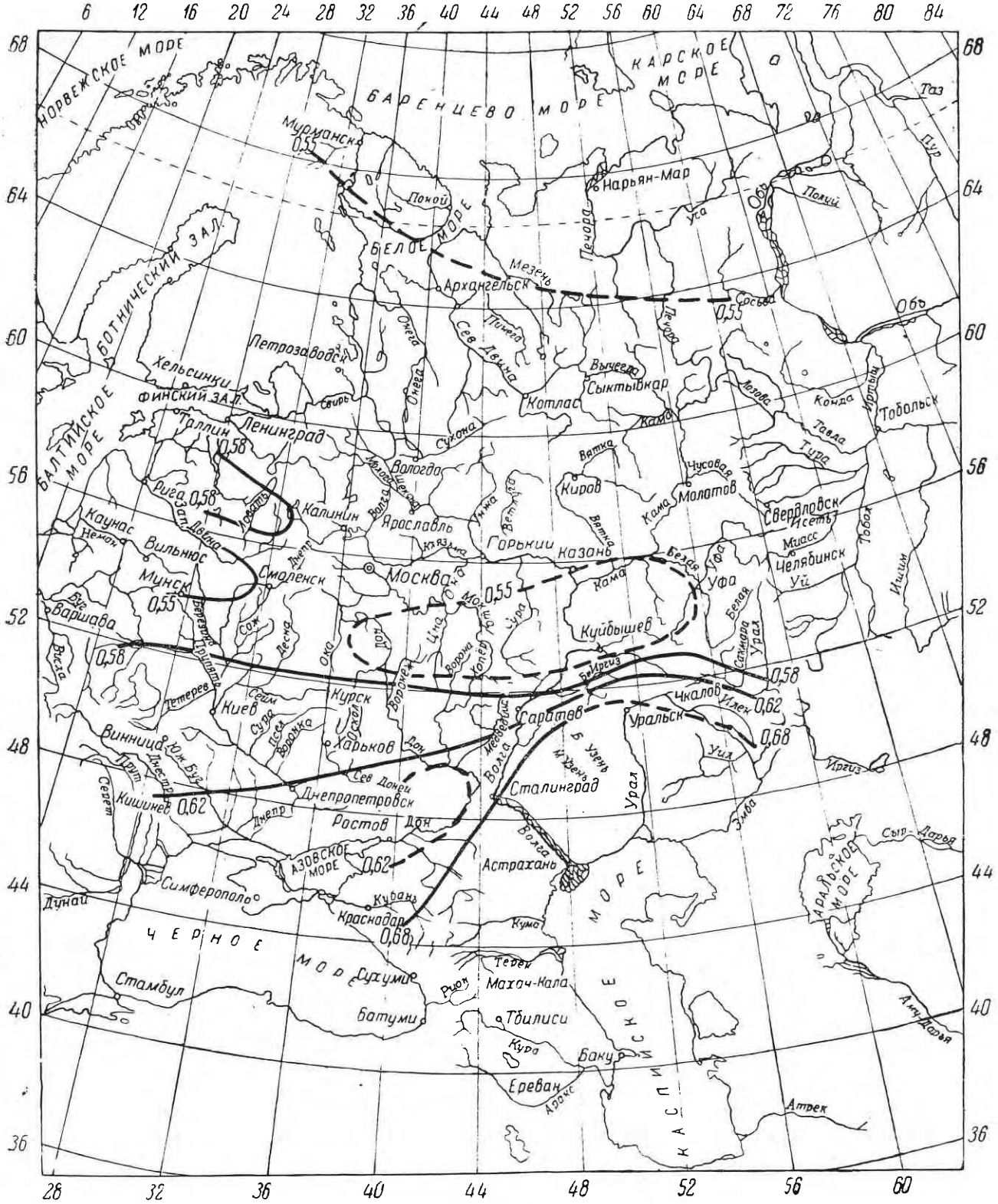
Твердый сток

$$R' = R_{взв} + R_{дон}. \qquad (13—59)$$

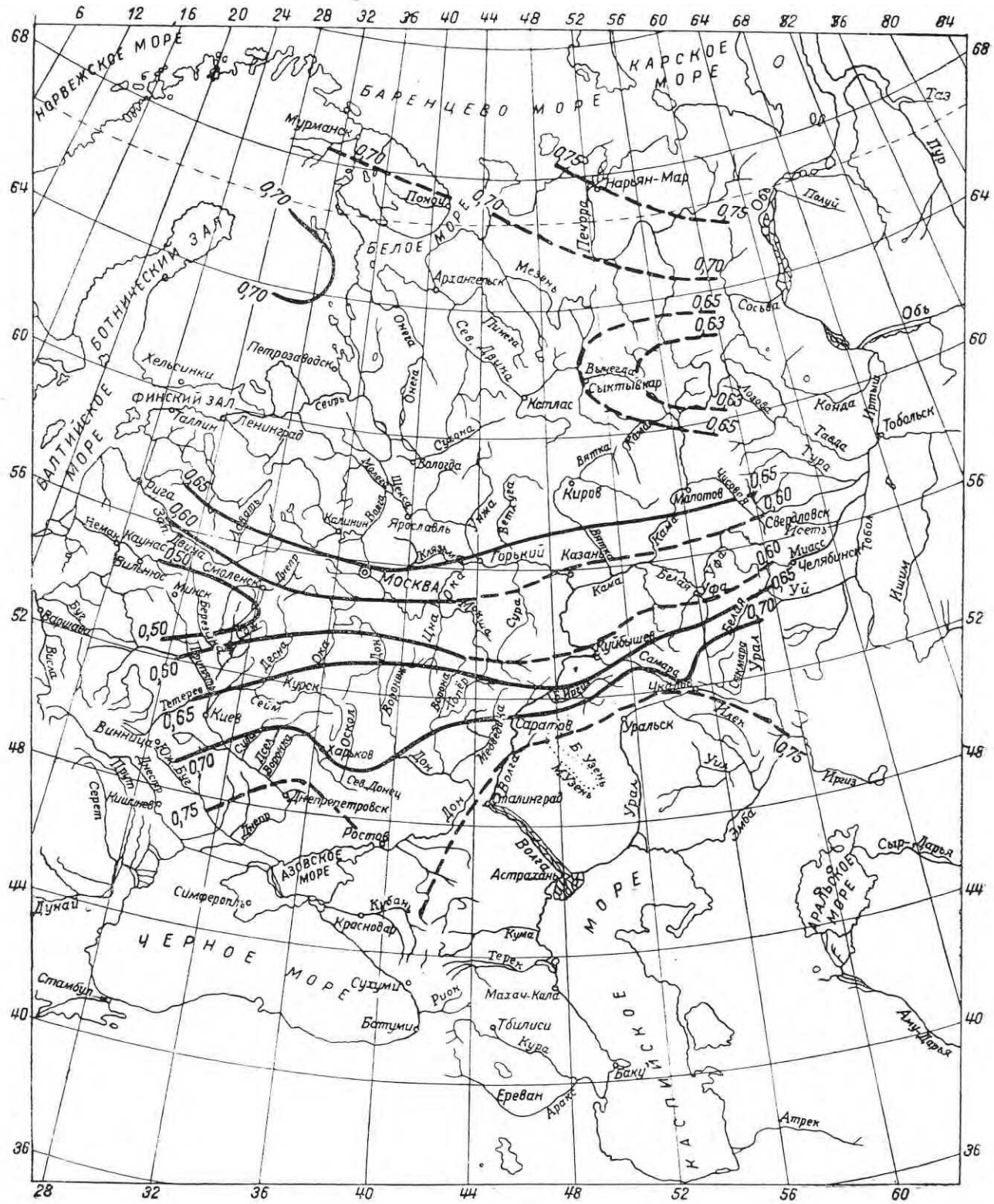
$R_р$ — называется химическим стоком.

Если имеется один средний годовой расход наносов S_i, отвечающий среднему годовому расходу воды Q_i, то, обозначая через Q_0 средний многолетний расход воды, можно определить приближенно средний многолетний расход наносов S_0 по формуле:

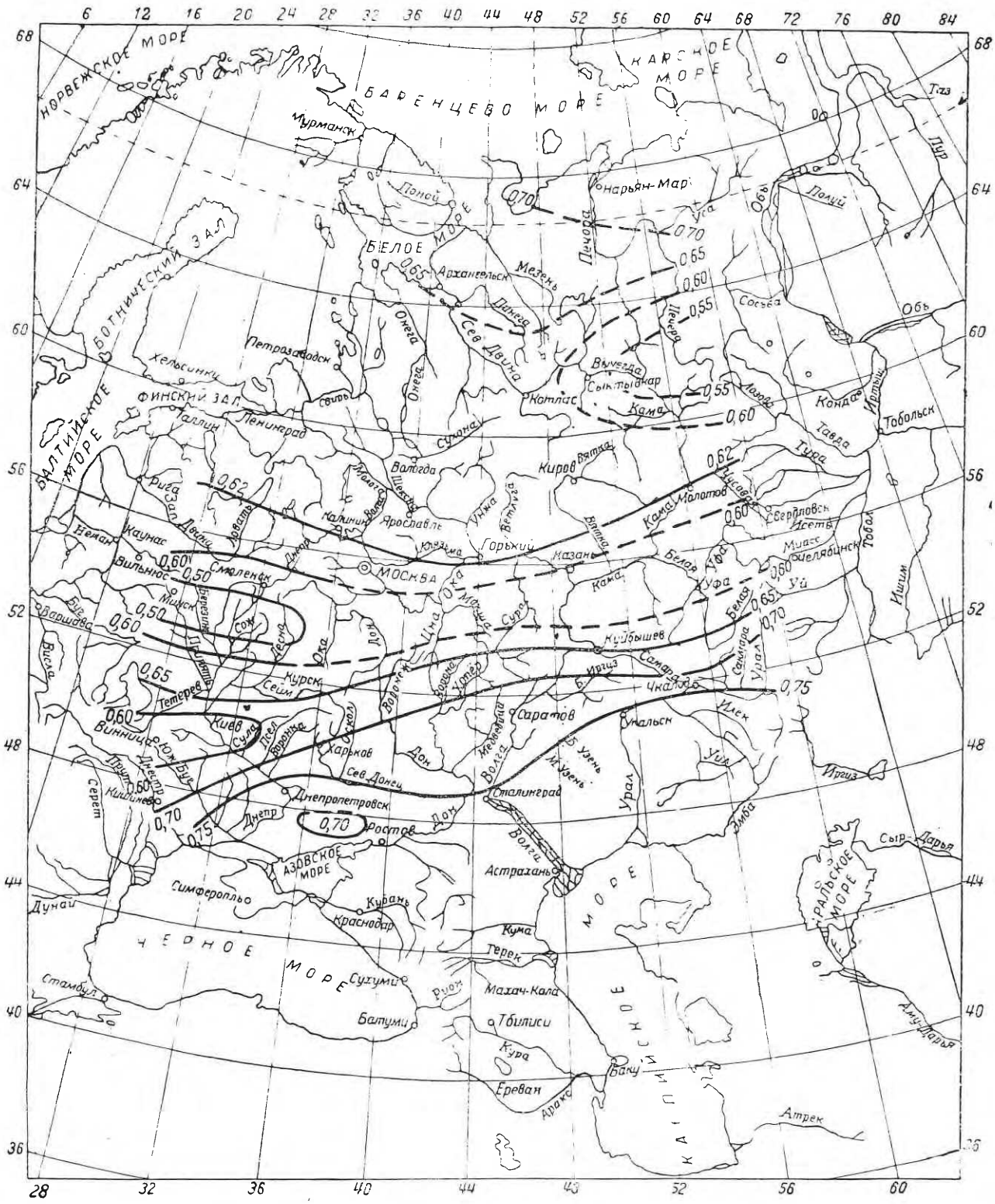
$$S_0 = \frac{Q_0 S_i}{Q_i}. \qquad (13—60)$$



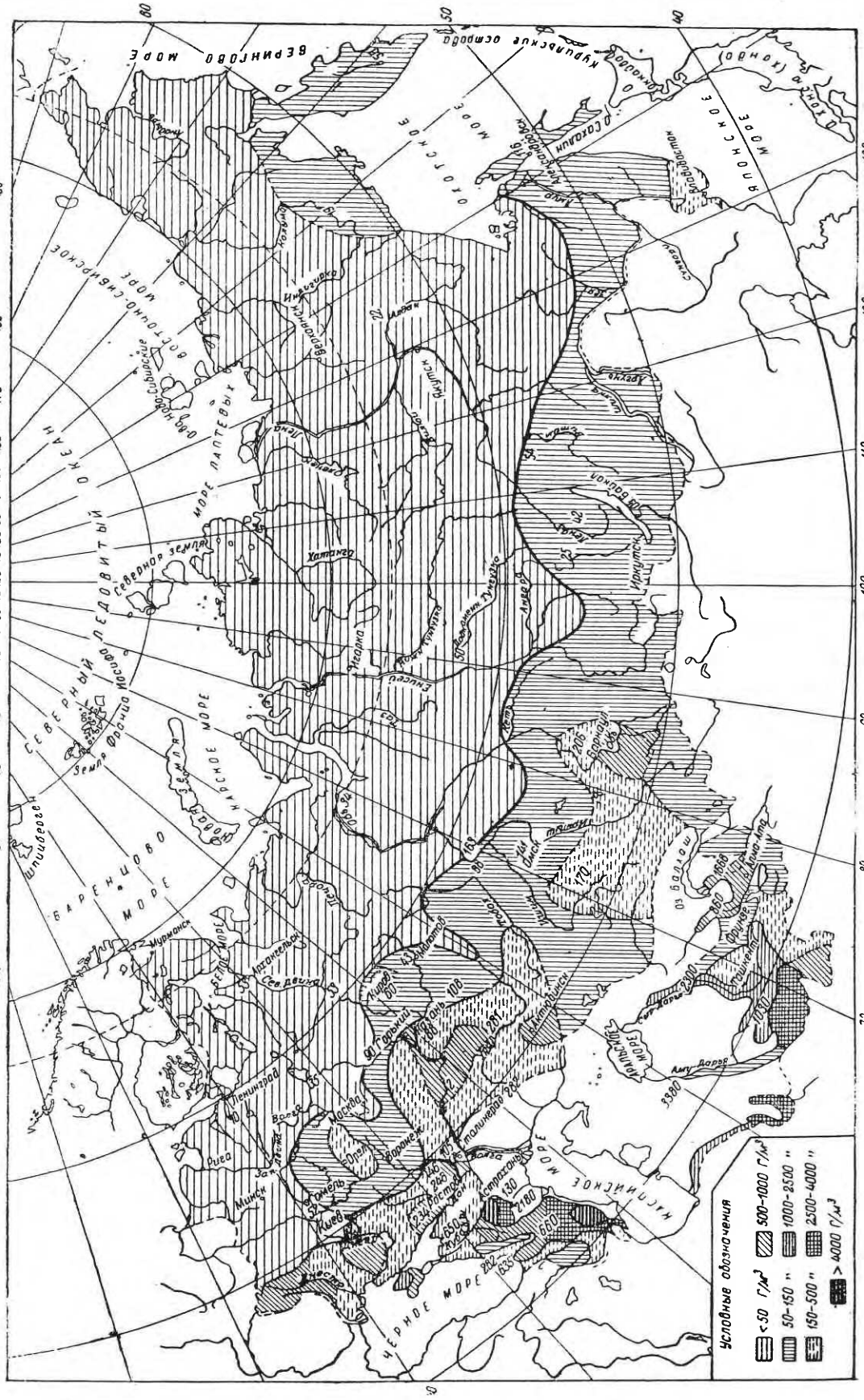
Фиг. 13—16. Схематическая карта параметра $f_л$ к формуле Н. Д. Антонова для определения летних минимальных расходов



Фиг. 13—17. Схематическая карта параметра f_3 к формуле Н. Д. Антонова для определения зимних минимальных расходов



Фиг. 13—18. Схематическая карта параметра f_c к формуле Н. Д. Антонова для определения среднемесячных минимальных расходов.



Фиг. 13–19. Карта средней мутности рек на территории СССР

При отсутствии наблюдений средний многолетний сток взвешенных наносов может быть приближенно определен по карте изолиний средней годовой мутности, составленной Г. И. Шамовым (фиг. 13—19) (см. [17], [24]).

При ограниченном количестве измеренных расходов растворенных наносов вычисление стока их возможно лишь путем построения приближенной кривой связи расхода солей (или плотного остатка U *мг/л*) с расходом воды ($U=f(Q)$—гидролого-химическая характеристика). Кривые $U=f(Q)$ часто являются устойчивыми в многолетнем разрезе, поэтому иногда для их построения могут быть использованы анализы и различных лет наблюдений ([1], [8]).

При расчете заиления водохранилищ принимается только сток взвешенных и донных наносов ($R_{взв}+R_{доп}$).

13—10. ОСНОВНЫЕ ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Основными отчетными документами по гидрологическим расчетам являются:

для технико-экономического доклада — гидрологическая характеристика, составляемая по материалам имеющихся разработок и по литературным данным; в отдельных случаях, когда материалов недостаточно, производится специальная обработка гидрометрических наблюдений по створам, ближайшим к намеченным створам сооружений;

для проектного задания и технического проекта — гидрологический очерк, составляемый по материалам непосредственных наблюдений с использованием данных всех прежних проработок.

1. Программа гидрологической характеристики

В эту программу входят:

а) общее описание реки и ее бассейна; б) краткие климатические данные; в) гидрологическая изученность; г) норма стока и распределение стока по сезонам в характерные годы (маловодный, средний, многоводный); д) максимальные и минимальные расходы; е) анализы химического состава воды, ж) особенности режима реки; з) использованные материалы.

Объем записки — 15—25 страниц машинописного текста.

2. Программа гидрологического очерка

В эту программу включаются: а) орография, рельеф, геология, геоморфология, гидрогеология, гидрографическая сеть, почвенный и растительный покров; б) гидрологическая и метеорологическая изученность; оценка надежности гидрометрических данных и выбор расчетных створов; в) климат, температура, влажность, дефицит влажности, осадки, испарение, ветер; г) характеристика речной сети и режима реки; питание, уровни, расходы, режим стока; д) сток за период наблюдений; анализ данных об уровнях и расходах, построение кривых расхода; подсчет стока; анализ результатов подсчета; е) параметры годового стока; норма стока; коэффициент вариации и асимметрии; приведение к многолетнему периоду; кривые обеспеченности расходов; ж) внутригодовое распределение стока; з) максимальные расходы; приведение коротких рядов; установление Q_{max} расчетной обеспеченности; и) минимальные расходы (летние и зимние); к) зимний режим; даты замерзания и вскрытия; толщина льда; глубинный лед (шуга, донный лед), зажоры и заторы; л) твердый сток (взвешенных и донных наносов); м) химический состав воды и сток растворенных наносов; прогноз изменений химического состава воды; н) заключение и план дальнейших исследований; о) использованные материалы. Объем записки — от 40 до 80 страниц машинописного текста.

3. Основные графические приложения к запискам

Эти приложения состоят из: а) карты бассейна с нанесением границ отдельных водосборов, метеорологической и гидрологической сети, основных сооружений (мельниц, ГЭС, плотин, водозаборов, сбросов сточных вод, мостов), существующих и проектируемых; б) продольного профиля реки; в) графика нарастания площади бассейна; г) графиков среднесуточных уровней за характерные годы с показанием отметок нулей графиков и фаз ледостава и ледохода; д) гидрографов за характерные годы; е) кривых обеспеченности суточных расходов; ж) кривых обеспеченности среднегодовых и максимальных расходов; з) кривых расходов; и) графиков для подсчета зимнего стока; к) графиков, характеризующих сток наносов; л) гидролого-химических характеристик; м) таблиц уровней и расходов по неопубликованным данным; н) фотографических снимков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алекин О. А., К изучению количественных зависимостей между минерализацией, ионным составом и водным режимом рек СССР, Труды ГГИ, вып. 25/79, Гидрометеоиздат, 1950.
2. Алекин О. А., Основы гидрохимии, Гидрометеоиздат, 1953.
3. Антонов Н. Д., Минимальный сток рек Европейской части СССР, Труды НИИГМС, серия IV, вып. 2, ГГИ, Гидрометеоиздат, 1941.
4. Аполлов Б. А., Учение о реках, изд. Московского государственного университета, 1952.
5. Близняк Е. В., Принятые в СССР методы расчета максимальных расходов воды в реках, Сборник докладов, представленных Комитету по участию СССР в международных энергетических объединениях, Госэнергоиздат, 1951.
6. Близняк Е. В., Водные исследования, Речиздат, 1952.
7. Близняк Е. В. и Поляков Б. В., Инженерная гидрология, Госстройиздат, 1939.
8. Бочков Н. М., Водная среда и изменение ее качества при регулировании стока как фактор водохозяйственного расчета, Труды I совещания по регулированию стока, изд. АН СССР, 1946.
9. Великанов М. А., Гидрология суши, Гидрометеоиздат, 1948.
10. Великанов М. А., Водный баланс суши, Гидрометеоиздат, 1940.
11. ГОСТ 3999-48. Расчет максимальных расходов воды рек, 1948.
12. Зайков Б. Д., Средний сток и его распределение в году на территории СССР, Гидрометеоиздат, 1946.
13. Зайков Б. Д., Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР, Труды ГГИ, вып. 21/75 Гидрометеоиздат, 1949.
14. Краткий справочник для гидрологических расчетов, под редакцией Е. В. Близняка, Госэнергоиздат, 1948.
15. Крицкий М. Н. и Менкель М. Ф., Гидрологические основы речной гидротехники, Изд. Академии наук СССР, 1950.
16. Лучшева А. А., Практическая гидрология, Гидрометеоиздат, 1950.
17. Лопатин Г. В., Наносы рек СССР, Географгиз, 1952.
18. Огиевский А. В., ред., Гидрологические расчеты для рек УССР (на украин. языке), Изд. Академии наук УССР, 1947.
19. Огиевский А. В., Гидрология суши, Сельхозгиз, 1952.
20. Поляков Б. В., Гидрологический анализ и расчеты, Гидрометеоиздат, 1946.
21. Соколовский Д. Л., Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС, Гидрометеоиздат, 1946.
22. Соколовский Д. Л., Речной сток, Гидрометеоиздат, 1952.
23. Федоров Л. Т., Исследования и расчет максимальных расходов снеговых половодий рек Европейской части СССР, Регулирование стока, Сборник № 5, изд. Академии наук СССР, 1952.
24. Шамов Г. И., Сток взвешенных наносов рек СССР, Труды ГГИ, вып. 20/74, Гидрометеоиздат, 1949.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

14—А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

14—1. НАЗНАЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Основным назначением инженерно-геологических изысканий, связанных с гидротехническим строительством, является всестороннее геологическое изучение района сооружений (плотин, водохранилищ, деривационных каналов и др.) с целью обоснования проектирования и прогноза тех изменений, которые могут произойти в геологической обстановке под влиянием строительства сооружений и их эксплуатации.

При инженерно-геологических изысканиях освещаются:

а) общие физико-географические условия (рельеф, климат, гидрография, элементы гидрологии);

б) геологическое строение (стратиграфия, литология, тектоника);

в) геоморфологические условия (строение рельефа и условия его формирования);

г) гидрогеологические условия;

д) физико-геологические явления (оползни, карст, просадки, сейсмичность и др.);

е) физико-механические свойства горных пород;

ж) наличие местных минеральных строительных материалов.

14—2. ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основные геологические и инженерно-геологические понятия и определения, знание которых необходимо для пользования материалами инженерно-геологических изысканий, приведены в табл. 14—1 ÷ 14—8.

1. Схема стратиграфического деления земной коры

Таблица 14—1

Группа (эра)	Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Продолжительность периода (млн. лет)	Суммарная продолжительность от современного периода (млн. лет)	Группа (эра)	Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Продолжительность периода (млн. лет)	Суммарная продолжительность от современного периода (млн. лет)
Кайнозойская	Четвертичная *Q*	Верхний (Голоцен)	—	1		Кайнозойская	Третичная *T*	Неоген *N* Плиоцен	—	54	55
		Средний (Плейстоцен)	—					Миоцен	—		
		Нижний (Постплиоцен)	—					Палеоген *Pg* Олигоцен	—		
								Эоцен	—		
								Палеоцен	—		

Продолжение табл. 14—1

Группа (эра)	Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Продолжительность периода (млн. лет)	Суммарная продолжительность от современного периода (млн. лет)
Мезозойская	Меловая C_r	Верхний C_{r_2}	Датский Маастрихтский Компанский Сантонский Коньякский Туронский Сеноманский	65	120
		Нижний C_{r_1}	Альбский, Аптский — Гольт Барремский, Готеривский, Валанжинский — Неокомский		
	Юрская J	Верхний (Мальм) J_3	Верхне-Волжский Нижне-Волжский Киммериджский Оксфордский Келловейский	35	155
		Средний (Доггер) J_2	Батский Байосский		
		Нижний (Лейас) J_1	Верхний Средний Нижний		
Мезозойская	Триасовая T	Верхний T_3	Рэтский Норийский Карнийский	35	190
		Средний T_2	Ладинский Анизийский		
		Нижний T_1	Верфенский (Скифский)		
Палеозойская	Пермская P	Верхний P_2	Татарский, Казанский, Уфимский — Цехштейн	25	215
		Нижний P_1	Кунгурский Артинский		
	Каменноугольная C	Верхний (Уральский) C_3	Стефанский	85	300
		Средний (Московский) C_2	Вестфальский		
		Нижний (Динантский) C_1	Намюрский Динантский		
	Девонская D	Верхний D_3	Фаменский Франский	50	350
		Средний D_2	Живетский Эйфельский		
		Нижний D_1	Кобленцский Жединский		
	Силурийская S	Верхний (Готландский) S_2	Даунтонский Лудловский Уинлокский Лландоверский	130	480
		Нижний (Ордовичский) S_1	Карадокский Лландейльский Аренигский Тремадокский		

Продолжение табл. 14—1

Группа (эра)	Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Продолжительность периода (млн. лет)	Суммарная продолжительность от современного периода (млн. лет)	Группа (эра)	Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Продолжительность периода (млн. лет)	Суммарная продолжительность от современного периода (млн. лет)
Палеозойская	Кембрийская Cm	Верхний Cm_3	Лингуловый	70	550	Докембрийский	Протерозойская P_{rz} Архейская A_r	—	—	2 500—3 500	
		Средний Cm_2	Меневианский								
		Нижний Cm_1	Керфайский								

Примечания. 1. Деление четвертичной системы на ярусы (века) производится:
а) для районов, не захваченных трансгрессиями моря, в соответствии с наименованиями ледников и межледниковых эпох, например, для Русской платформы (Европейская часть СССР): Лихвинский (Миндельский), Днепровский (Рисский) и Валдайский (Вюрмский) ярусы;
б) для районов распространения четвертичных морских трансгрессий — в соответствии с названиями морских бассейнов, например, для Каспийского бассейна: Бакинский, Хазарский и Хвалынский ярусы.
2. Деление третичной системы на ярусы производится в различных районах по разному. В табл. 14—2 приведена схема деления для юго-западной Украины и южных районов Европейской части СССР.

Таблица 14—2

Схема стратиграфического деления третичной системы

Система (период)	Отдел (эпоха)	Ярус, горизонт, слой (век и время)		
Третичная T	Неоген N	Плиоцен	Юго-западная Украина	Черное море	Каспийское море
			Левантинский	Чаудинский Гурийский Таманский	Апшеронский Акчагыльский
			—	Куяльницкий Киммерийский	Продуктивная толща Армавирская свита
			Понтический		
		Миоцен	Юго-западная Украина	Северный и восточный Кавказ. Черноморское побережье	
			Мэотический		
			Сарматский		
			Конкский		
Третичная T	Палеоген P_g	Олигоцен	Второй средиземноморский	Караганский	
				Чокракский	
			Полтавский	Верхний майкопский	
			Харьковский	Нижний майкопский. Хадумский. Верхние фораминиферовые слои. Верхний коун (юго-восточный Кавказ)	
		Эоцен	Киевский		
			Бучакский	Нижние фораминиферовые слои. Средний и нижний коун (юго-восточный Кавказ)	
		Палеоцен	Каневский	Сумгаитская свита (юго-восточный Кавказ) Серия флиша (западный Кавказ) Пестроцветная свита (Дагестан)	

2. Схема деления горных пород по генетическим признакам

Таблица 14—3

Основные генетические подразделения	Характеристика							
Осадочные породы, образовавшиеся путем осаждения и накопления мелких раздробленных частиц в морских и континентальных условиях	Морские	Обломочные (терригенные)	Галечники и конгломераты. Щебень и брекчии. Пески и песчаники. Алевриты и алевролиты (пылеватые породы несцементированные и сцементированные)					
		Глинистые	Глины, аргиллиты, глинистые сланцы					
		Химические и органогенные	Карбонаты: известняки, мел, доломиты, мергели Силикаты: диатомиты, трепел, опоки Галоиды: галитит (каменная соль), сильвинит и др.					
	Континентальные	Продукты разрушения коренных пород, оставшиеся на месте	Почвы. Элювий: щебень, дресва, глины, суглинки, супеси					
		Отложения склонов	Делювий: суглинисто-щебенчатые накопления. Осыпи, обвалы: щебень, глыбы					
		Отложения русловых потоков	Аллювий: галечники, гравий, пески, супеси, глины. Пролювий (осадки временно-действующих потоков горного типа): галечники, щебень, пески, супеси					
		Отложения озер, болот и лагун	Глины, илы, пески, гипс, галитит, сода и др. Сапропели. Торф					
		Ледниковые отложения	Собственно ледниковые: моренные суглинки и глины с валунами. Флювиогляциальные (осадки талых ледниковых вод): галечники, гравий, пески. Озерно-ледниковые: глинистые и илистые пески, супеси и суглинки, ленточные глины					
		Эоловые (ветровые) отложения	Пески, лёссы[1]					
Изверженные или магматические породы, возникшие из магмы, поступившей в верхние зоны земной коры с больших глубин	Глубинные (интрузивные)	Кислые (содержание SiO_2 более 65%)	Граниты, гранодиориты	Средние (содержание SiO_2 52—65%)	Сиениты, диориты	Основные (содержание SiO_2 40—52%)	Габбро, перидотиты (ультраосновные)	
	Излившиеся (эффузивные)		Липариты, кварцевые порфиры		Трахиты, фонолиты, ортофиры, андезиты, дациты, порфириты		Диабазы, базальты, порфириты	
	Взрывные (туфо-пепельные)	Продукты вулканического извержения: рыхлые—лапилли, вулканический песок и пепел; сцементированные—туфы, пемза. По составу аналогичны глубинным и излившимся магматическим породам						
Метаморфические породы—изверженные и осадочные породы, образовавшиеся под воздействием большого давления и высокой температуры	Гнейсы, амфиболиты, филлиты, сланцы—хлоритовые, тальковые, слюдяные и др.; кварциты, гнейсокварциты, мраморы							

[1] Имеются различные теории происхождения лёссов. Эоловая теория трактует их образование как результат деятельности ветра.

3. Основные типы тектонических движений земной коры

Таблица 14—4

Название	Характеристика
Эпейрогенические движения	Постоянно протекающие вековые колебания. Захватывают большие участки земной коры. Основной формой движения является вертикальное (вверх и вниз). Магматическая деятельность проявляется не всегда
Орогенические движения	Обусловливают сложные нарушения в первоначальном залегании слоев горных пород (дислокации) Движения происходят по двум направлениям: горизонтальному и вертикальному и сопровождаются активными магматическими процессами Основные фазы орогенических движений в истории земли: 1) Лаврентьевская—в начале архея 2) Альгонкская—архей — протерозой 3) Каледонская—в конце силура 4) Герцинская (варисцийская)—от нижнекаменноугольного периода до триаса 5) Альпийская —в конце мелового и в третичном периодах

4. Виды нарушений в залегании горных пород (дислокации)

Таблица 14—5

Название	Характеристика
Пликативные дислокации (без разрыва сплошности слоев)	
Антиклиналь	Складка, обращенная выпуклостью вверх (свод)
Синклиналь	Складка, обращенная выпуклостью вниз (мульда)
Нормальная складка	Крылья складки симметрично расходятся от ядра (вершины) к основанию
Изоклинальная складка	Крылья складки параллельны
Флексура	Однобокая коленчатая складка
Дизъюнктивные дислокации (с разрывом сплошности слоев)	
Сброс	Перемещение пород по трещине вертикально или наклонно к горизонту
Горст	Поднятие пород между двумя трещинами или сбросами
Грабен	Опускание пород между двумя трещинами или сбросами
Надвиг	Передвижение (надвигание) пород по пологим волнистым поверхностям
Тектонические трещины	Трещины, возникшие в результате тектонических движений. Рассекают горные породы на значительную глубину

5. Ориентировочная схема разделения горных пород по инженерно-геологическим признакам

Таблица 14—6

Группа	Название геотехнической группы	Генетический тип пород	Механические свойства	Водопроницаемость	Химическая стойкость	Физическая стойкость
I	Скальные и полускальные породы	Изверженные. Метаморфические. Осадочные твердые	Прочная жесткая связь между зернами (спаянность и сцементированность). Не сжимаемы. При сдвиге дают скол. Механические свойства зависят от степени выветрелости и трещиноватости[1]	Водопроницаемы только по трещинам	Изверженные скальные практически нерастворимы, среди полускальных, метаморфических и осадочных имеются растворимые разности	Скальные практически инертны по отношению к воде; крупнозернистые и слоистые разности обладают пониженной морозостойкостью Среди полускальных имеются размягчающиеся и морозонестойкие разности

[1] Следует иметь в виду, что деление горных пород на скальные и полускальные является в значительной мере условным. Среди полускальных пород, так же как и среди скальных, могут быть разновидности с достаточно высокой прочностью, позволяющей использовать их как строительный материал для сооружений.

Продолжение табл. 14—6

Группа	Название геотехнической группы	Генетический тип пород	Механические свойства	Водопроницаемость	Химическая стойкость	Физическая стойкость
II	Связные и полусвязные породы	Осадочные тонкодисперсные. Торф. Почвы	В сухом состоянии сходны с полускальными, во влажном—пластичны и сжимаемы; при сдвиге дают пластическую деформацию. Механические свойства резко меняются в зависимости от степени влажности	Связные практически водоупорны, полусвязные—слабо проницаемы; водопроницаемость увеличивается при наличии трещин. Тонкая слоистость (ленточные глины) или ориентированная пористость (лёссы) обусловливает различную проницаемость по разным направлениям	Нерастворимы, но могут содержать растворимые примеси; растворение последних затруднено слабой водопроницаемостью. Растворение солей в лёссах способствует просадкам	Набухают, размягчаются и расплываются в воде; при замерзании могут сильно увеличиваться в объеме, образуя линзы и прослои льда (пучинистые породы) Лёссы и лёссовидные породы при увлажнении могут давать просадки
III	Несвязные породы	Осадочные сыпучие	Связи между зернами нет; под действием статической нагрузки обычно не сжимаются. При сотрясении слабо уплотненные разности могут дать быструю осадку	Водопроницаемы	Нерастворимы, редко с примесью растворимых составляющих	Не разбухают и не размягчаются в воде

6. Классификация подземных вод

Таблица 14—7

Типы подземных вод	Соотношение области питания и области распространения	Характеристика по напору	Геологические условия залегания	Особенности режима
Почвенные, болотные, верховодка	Совпадают	Ненапорные	Почва, поверхностные образования; водоупорным ложем служат линзы и прослои менее проницаемых пород в зоне аэрации	Воды временного характера, связанные с весенним снеготаянием или длительным дождем
Грунтовые	То же	Ненапорные (иногда с местным напором)	Залегают над первым от поверхности водоупорным пластом, обычно на небольшой глубине от поверхности земли	Колебания уровня воды происходят под действием метеорологических факторов. Годовая амплитуда колебаний на водоразделах не превышает 2—2,5 *м*, в зоне влияния паводков реки определяется высотой и продолжительностью паводков
Межпластовые ненапорные	Область распространения больше области питания	То же	Аналогичны грунтовым водам, но отличаются от них тем, что выше уровня подземных вод имеется водоупорный пласт	Те же факторы, что и в грунтовых водах, но влияние их менее выражено

Продолжение табл. 14—7

Типы подземных вод	Соотношение области питания и области распространения	Характеристика по напору	Геологические условия залегания	Особенности режима
Артезианские	Область распространения больше области питания	Напорные	Заполняют весь водоносный пласт, заключенный между водоупорными слоями. Характерны для крупных геологических структур	Колебания уровня артезианских вод незначительны и обусловлены изменениями атмосферного давления, а также колебаниями уровня в дренирующих водоемах и водотоках

Примечание. По характеру путей движения грунтовые, межпластовые и артезианские воды подразделяются на поровые и трещинные. Последние (трещинные воды) в свою очередь делятся на собственно трещинные, пластово-трещинные, карстово-трещинные и жильные. В области распространения вечной мерзлоты подземные воды подразделяются на подмерзлотные, межмерзлотные и надмерзлотные. Воды подмерзлотные и межмерзлотные обычно имеют напорный характер.

7. Физико-геологические явления

Таблица 14—8

Основные процессы	Наименование и характеристика явлений	Основные процессы	Наименование и характеристика явлений
I. **Эндогенные** — вызываемые внутренними силами земли	Вулканические извержения, сейсмические явления	в) аккумуляция — отложение и накопление продуктов разрушения горных пород	Суффозия — вымывание (механическое) и вынос частиц из породы
II. Экзогенные — обусловливаемые внешними факторами (атмосфера, гидросфера, биосфера). Разделяются на:	Эрозия — разрушение пород под воздействием текучих вод рек, ручьев		Карстовые явления — растворение и выщелачивание горных пород с образованием в них характерных форм рельефа (воронки, увалы и пр.) и пустот (каналы, пещеры)
а) выветривание — разрушение и разрыхление горных пород на поверхности земли — физическое (механическое), химическое и органическое (под действием организмов)	Абразия — разрушение и выравнивание берегов под воздействием волнобоя и наступающих вод, преимущественно морских (морская абразия)		Дефляция — развевание и перенос продуктов разрушения горных пород под действием ветра
б) денудация — смещение и перенос продуктов разрушения горных пород (термином денудация часто обозначают всю совокупность процессов разрушения горных пород, происходящих на земной поверхности, включая и выветривание)	Осыпи — осыпание обломков (щебня и глыб) выветрившихся пород и отложение их у подножья крутых склонов		Явления, связанные с вечной мерзлотой: наледи и термокарст (образование западин, воронок, в результате оттаивания мерзлоты); солифлюкция (течение суглинков, супесей и мелких песков в результате оттаивания мерзлоты и увлажнения); образование бугров пучения, гидролакколитов и др.
	Оползни (осовы, сплывы) — смещение земляных масс на склонах		
	Сели — горные грязевые и грязекаменные потоки, возникающие после интенсивных ливней и снеготаяния		
	Просадки — осадки макропористых пород под действием собственного веса при избыточном увлажнении		

14—Б. СОСТАВ И МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

В состав инженерно-геологических изысканий входят следующие виды работ: 1) подготовительные работы; 2) комплексная инженерно-геологическая съемка; 3) разведочные работы (бурение и проходка горных выработок); 4) геофизические работы; 5) гидрогеологические работы; 6) полевые испытания физико-механических свойств грунтов; 7) лабораторные исследования; 8) поиски и разведки строительных материалов.

14—3. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Подготовительные работы заключаются в сборе и изучении литературных и архивных материалов по району изысканий, в составлении программы и сметы, подготовке и отправке на место необходимого оборудования и составлении инструктивно-методических указаний для технического и административно-хозяйственного персонала изыскательской партии. Сбор и обработка литературных и архивных материалов имеют целью определить степень изученности района и обосновать объем и методику дальнейших изысканий.

Программа инженерно-геологических изысканий, разрабатываемая инженером-геологом совместно с проектировщиком, должна содержать следующие разделы:

а) краткое изложение технического задания на проектирование (стадия проектирования, основная схема и возможная компоновка проектируемых сооружений и т. п.);

б) краткую характеристику геологических и инженерно-геологических условий района изысканий по данным литературных и архивных источников;

в) намечаемые объем и содержание инженерно-геологических работ и обоснование их необходимости по всему району и участкам расположения отдельных сооружений;

г) календарные сроки выполнения работ.

Сметы на инженерно-геологические изыскания составляются по «Единому прейскуранту цен на проектные и изыскательские работы» (изд. Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства, 1950), а также по «Единым нормам выработки на геолого-разведочные работы» (ЕНВ) Министерства геологии (Госгеолиздат, 1953).

14—4. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Инженерно-геологическая съемка имеет целью комплексное изучение геологических, геоморфологических и гидрогеологических условий района применительно к требованиям строительства инженерных сооружений путем описания и нанесения на топографическую карту наблюдаемых в поле естественных и искусственных обнажений горных пород, выходов подземных вод и физико-геологических явлений.

В результате инженерно-геологической съемки дается характеристика: а) стратиграфии, литологического состава и, в первом приближении, физико-механических свойств горных пород; б) тектоники и трещиноватости; в) геоморфологических особенностей долин и водоразделов; г) водоносности горных пород, условий питания и разгрузки отдельных водоносных горизонтов, качества подземных вод и других гидрогеологических факторов, доступных изучению без специальных разведочных и опытных работ; д) физико-геологических явлений; е) возможности получения на месте тех или иных видов местных строительных материалов.

На предварительных стадиях проектирования (ТЭД) производятся инженерно-геологические съемки маршрутного типа или площадные съемки мелкого масштаба.

В случае наличия по району материалов ранее выполненных съемок в этот период нередко можно ограничиться рекогносцировочным осмотром района.

При изысканиях для проектного задания и технического проекта на участках, намеченных под сооружения, производятся съемки более крупного масштаба (до 1 : 10 000, а в некоторых случаях — даже до 1 : 2 000).

Инженерно-геологическая съемка чаши водохранилища производится в масштабах 1 : 200 000—1 : 50 000, а на отдельных участках, например, защищаемых от подтопления, затопления, обвалов, оползней и пр., — в более крупных масштабах, в зависимости от сложности геологических условий.

При назначении объема инженерно-геологической съемки необходимо учитывать требования проектирования данного сооружения.

Инженерно-геологическая съемка включает в себя следующие вспомогательные работы: а) проходку мелких горных выработок (шурфов, расчисток); б) зондировочное бурение; в) отбор образцов и проб пород и воды для последующих лабораторных анализов и испытаний; г) полевые лабораторные исследования грунтов и химического состава воды (при помощи полевых походных лабораторий); д) глазомерную топографическую съемку с барометрическим нивелированием; е) фотографирование.

Объем шурфования и бурения устанавливается в зависимости от обнаженности и сложности геологического строения.

Для инженерно-геологических целей широко применяется аэрофотосъемка. Получаемые при помощи аэрофотосъемки изображения местности (контактные отпечатки, фотосхемы и карты в горизонталях) позволяют производить более детальное геоморфологическое картирование, а во многих случаях по ним представляется также возможность оценивать геологическое строение и тектоническую структуру района.

Авиация используется, кроме того, для рекогносцировочного инженерно-геологического освещения района (так называемая аэровизуальная рекогносцировка).

Применение авиации (в том числе аэрофотосъемки) оказывается целесообразным при необходимости получения материала для обширных площадей и при изучении больших по протяжению участков долин рек.

14—5. РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ

Разведочные работы являются основным методом детального изучения инженерно-геологических условий строительства гидротехнических сооружений. Они включают в себя бурение скважин и проходку горных выработок: шурфов, шахт, штолен, канав. Бурение подразделяется на: а) ручное ударно-вращательное, б) механическое ударное и в) механическое вращательное (колонковое, роторное).

Основные характеристики бурового оборудования даны в табл. 14—9. Кроме указанного в табл. 14—9 бурового оборудования все большее применение нахо-

Таблица 14—9

Основные характеристики бурового оборудования

Способ бурения / Наименование показателей	Ручное ударно-вращательное				Механическое ударное				Механическое вращательное (колонковое)				
Тип станка	—	—	—	—	УА-75-III	К-29	БУ-2 „Уралец"	УКС-20	ЗИВ-75	ЗИВ-150	КА-2М-300	КАМ-500	АБГ-50-2
Диаметры скважин в *мм*	219—127	168—127	127—89	89—60	273—219	325—219	300	500	95	115	116	190	130
Максимальная глубина в *м*	50	30	30	15	75	150	300	300	75	150	300	500	50
Мощность двигателя в *л. с.*	—	—	—	—	18	30	Электродвигатель типа МА-203$^{2}/_{6}$ мощностью 19,7 *квт*	Электродвигатель мощностью 32 *квт*	10	20	15	22—30	Двигатель автомашины, на которой установлен станок мощностью 25 *л. с.*
Вес станка в *т*[1]	4,0	2,5	1,2	0,8	2,9	—	14,8	5,6	1,0	1,8	0,75	1,9	1,5
Условия применения	Преимущественно в рыхлых отложениях (глины, суглинки, пески)				В рыхлых крупнообломочных отложениях, иногда в скальных и полускальных породах				В скальных и полускальных породах				
В каком виде извлекается порода	С нарушенной структурой				Измельченная порода и буровой шлам				Керны-колонки (столбики) породы и буровой шлам				
Ориентировка скважин	Преимущественно вертикальные, в редких случаях наклонные				Вертикальные				Вертикальные, наклонные и горизонтальные				

[1] Вес станка для ручного бурения дан вместе с трубами и инструментами для указанных максимальных глубин. Для механического бурения приводится вес станка без труб и инструментов.

дят буровые станки, которыми проходятся так называемые опорные и «смотровые» скважины диаметром до 1 *м* и более.

Бурение скважин таких диаметров возможно и в сильно водоносных породах, причем имеется возможность извлекать на поверхность керн, а также осматривать и фотографировать стенки скважин.

Характеристика станков, применяемых для бурения скважин крупного диаметра:

диаметр в *мм*	620—1 220
максимальная глубина бурения в *м*	150
мощность двигателя в *л. с.*	65—112
производительность в скальных породах в *м/смену*	0,5—2,0
вес станка с набором колонковых труб в *т*	18—35

В настоящее время сконструированы станки для бурения скважин диаметром до 1,5—2,0 *м*. Такого типа станки уже внедряются в практику инженерно-геологических изысканий, например, станок ТМ-1300. В них предусмотрены специальные колонковые трубы с режущими приспособлениями на забое, благодаря чему весь керн может быть поднят на поверхность не только в скальных и полускальных, но и в рыхлых породах.

Заслуживает внимания новый вибрационный метод бурения, предложенный Д. Д. Барканом. Производительность вибрационного метода в 10—20 раз выше, а стоимость в 3—6 раз ниже ручного метода; глубина скважин — до 15—20 *м* (за исключением скальных, полускальных и галечных грунтов). Буровой комплект может быть установлен на грузовой автомашине.

Роторное бурение в практике инженерно-геологических изысканий применяется в настоящее время в основном при поисках и разведках на воду.

Принципы размещения скважин (и других горных выработок) и глубина, до которой их следует доводить, устанавливаются в каждом конкретном случае в соответствии с видом проектируемого сооружения, преобладающим составом пород, степенью их неоднородности, дислоцированности и другими факторами.

При предварительных изысканиях скважины располагаются таким образом, чтобы можно было получить общую сравнительную оценку геолого-литологических и гидрогеологических условий целого района, охватывающего ряд участков возможного расположения сооружений.

На выявленных конкурирующих участках расположения плотины в процессе предварительных изысканий обычно оказывается достаточным бурение небольшого количества скважин для получения поперечного геологического разреза долины по оси створа плотины.

При окончательных изысканиях, выполняемых для составления технического проекта, сеть буровых сква-

жин сгущается и располагаются они уже только на выбранных участках и трассах сооружений. В районе плотины в этот период, как правило, пробуривают три ряда скважин — по оси створа и на расстоянии порядка 50—100 *м* вверх и вниз от створа. Число и глубина скважин при этом могут изменяться в широких пределах и должны определяться для каждого объекта геологами совместно с проектировщиками.

На площадках машинного здания, бетонной плотины и других ответственных сооружений гидроузла скважины располагают по сетке на расстоянии 20—25 *м* друг от друга и заглубляют ниже подошвы сооружения.

Для освещения трассы деривационного канала производятся шурфование и разведочное бурение по поперечникам. Разведка учащается на косогорных участках и при пересечении трассой склонов речных террас.

На трассе туннельной деривации, выбираемой обычно по данным детальной геологической съемки, скважины и горные выработки располагаются в местах резких изменений рельефа, тектонической структуры района и литологического состава пород. Особенно подробно разведываются портальные участки.

Горные выработки в большинстве случаев осуществляются в дополнение к бурению, но нередко имеют и самостоятельное значение.

Типы горных выработок и ориентировочные указания об их применении приведены в табл. 14—10.

Таблица 14—10

Типы горных выработок

Название выработок	Размеры сечения в *м*	Глубина в *м*
Канавы (расчистки)	0,5—07 (понизу)	1,5—3,0
Шурфы	1,0×1,25; 1,25×1,8; 1,4×1,8	5,0—20,0
Шахты	2,0×3,0; 3,0×3,0 и более	С обязательным заглублением на 10—20 *м* в невыветрелую породу
Штольни	1,3×1,8 (в породе); 1,5×2,0	20,0—30,0 и более

14—6. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Из всех геофизических методов для решения задач инженерной геологии при изысканиях для гидротехнического строительства наибольшее распространение получила электроразведка, хотя в ряде случаев успешно используются и другие методы геофизики, например, сейсморазведка, магнитометрический и гравиметрический методы.

Электроразведка должна применяться в самой тесной увязке с общим комплексом геологических исследований, причем точность данных электроразведки необходимо контролировать при помощи буровых скважин.

Основным условием успешного применения электроразведки является наличие ощутимой разницы в удельных электрических сопротивлениях исследуемых пород и выдержанность этого параметра в пределах участка исследований.

Удельное электрическое сопротивление горных пород зависит от пористости, влажности, минерализации, температуры, а также от структуры и текстуры пород. От соотношения перечисленных факторов удельное сопротивление существенно изменяется, в силу чего его значение для различных типов горных пород может быть установлено лишь весьма ориентировочно (табл. 14—11).

Таблица 14—11

Ориентировочные удельные электрические сопротивления горных пород

Наименование	Удельное сопротивление в омах
Гранит	$2{,}4 \cdot 10^2$—10^9
Гнейс	$6{,}8 \cdot 10^4$—10^9
Базальт	10^6—10^9
Песок	0,5—10^3
Глина	0,16—30
Известняк	$2 \cdot 10^2$—10^9
Песчаник	20—10^9
Сланцы	10—10^3
Вода	0,02—150

Примечание. Данные электрических сопротивлений пород приводятся по книге В. Н. Дахнова, „Промысловая геофизика", Гостоптехиздат, 1947, стр. 12-14.

Основными видами электроразведки, применяемыми при инженерно-геологических изысканиях, являются: вертикальное зондирование, электропрофилирование и электрический карротаж скважин.

Вертикальное зондирование дает возможность осветить изменение сопротивления по глубине в каждой точке наблюдений; при помощи профилирования исследуется изменение сопротивлений на одной и той же глубине по определенной линии (профилю). Карротаж используется для уточнения, на основании послойных замеров электрических сопротивлений, геологического разреза и гидрогеологических показателей в пробуренных скважинах.

С помощью указанных методов при соответствующих условиях представляется возможным установить: а) глубину залегания скального основания под аллювиальными и другими рыхлыми отложениями; б) мощность выветрелой зоны скальных пород; в) наличие зон тектонических нарушений; г) степень трещиноватости и закарстованности пород; д) наличие переуглублений речных долин; е) глубину залегания верхней и нижней поверхности вечной мерзлоты; ж) наличие крупных включений льда в породах; з) глубину залегания подземных вод.

Кроме того, в последнее время применяется так называемый «метод заряженного тела», с помощью которого определяются направление и скорость подземного потока по одной пробуренной скважине.

14—7. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Общее освещение гидрогеологических условий в районе проектируемых гидротехнических сооружений дается в процессе производства инженерно-геологической съемки (описание обнажений, источников, колодцев и т. д.) и разведочных работ.

Для детальной характеристики гидрогеологических условий производятся специальные исследования: изучение режима подземных вод, опытные откачки, нагнетания и наливы воды в скважины, наливы воды в шурфы и определение естественных скоростей подземного потока.

1. Изучение режима подземных вод

Изучение режима подземных вод имеет целью выявить закономерности в изменениях уровня, химического состава, температуры и расхода (для источников) во времени.

На основе этих закономерностей возможно:

а) установить действительное положение депрессионной поверхности подземных вод в различные моменты времени;

б) оценить характер связи различных водоносных горизонтов между собой и рекой, условия их питания и стока;

в) осветить водопроницаемость водоносных пород путем определения коэффициента пьезопроводимости или уровнепроводимости пород:

$$a = \frac{Kh}{\mu}\ м^2/сутки,$$

где K — коэффициент фильтрации в *м/сутки*;
h — средняя мощность водоносного горизонта в *м*;
μ — недостаток насыщения или водоотдача породы;

г) оценить относительную величину инфильтрационного питания грунтовых вод атмосферными осадками (w).

Указанные данные необходимы при производстве расчетов подпора грунтовых вод для оценки возможности подтопления территории и фильтрационных потерь из водохранилищ.

Особенно важными являются наблюдения за режимом подземных вод в районах развития трещиноватых и закарстованных пород, где только по длительным наблюдениям за колебаниями уровня, химического состава и расхода воды в источниках, скважинах и открытых водотоках и водоемах можно определить участки высокой водопроницаемости (трещиноватости, закарстованности) пород. Эти наблюдения, продолженные при наполнении и эксплуатации водохранилища, позволяют оценить наличие фильтрационных утечек и пути, по которым они происходят наиболее интенсивно.

На первой стадии инженерно-геологических изысканий наблюдения за режимом подземных вод производятся в разведочных скважинах, шурфах, а также в источниках и колодцах. На второй стадии изысканий обычно создается специальная сеть наблюдательных пунктов путем дополнительного бурения так называемых «режимных» скважин. Наблюдательные пункты располагаются по поперечникам обычно нормально к реке, а в верхнем бьефе вблизи сооружения, параллельно и под углом к реке в соответствии с направлением обходного фильтрационного потока из верхнего бьефа в нижний. В неоднородных толщах пород, содержащих ряд водоносных горизонтов, нередко бывает весьма важно производить наблюдения в каждом из них в отдельности. Для этих целей устанавливаются послойные пьезометры. Общее количество и глубина наблюдательных выработок определяются рельефом местности и положением исследуемых водоносных горизонтов.

Наблюдения за режимом подземных вод сопровождаются наблюдениями за колебаниями уровней и расходов воды в реках и озерах и метеорологическими наблюдениями. Для этих целей организуются водомерные посты, гидрометрические и метеорологические станции.

2. Опытные откачки

Опытные откачки (одиночные и кустовые) служат для определения коэффициента фильтрации.

Опытные откачки производятся преимущественно при изысканиях для проектного задания и технического проекта, причем в последнем случае они приурочиваются к конкретным участкам расположения сооружений.

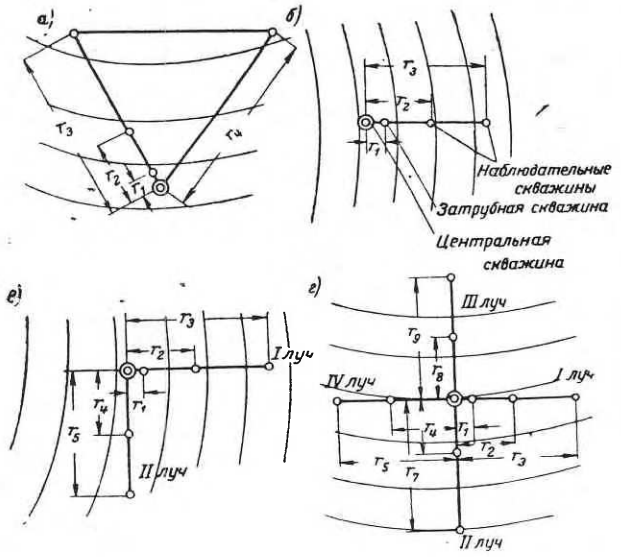
При одиночных откачках наблюдательные скважины отсутствуют и наблюдения за положением депрессионной кривой подземного потока не ведутся: уровень воды замеряется в той же скважине, из которой производится откачка. При невозможности производить замеры уровня в самой опытной скважине для этих целей устраиваются специальные, так называемые затрубные скважины, отстоящие от основной на расстоянии 0,5—1,0 *м*, или затрубные пьезометры — тонкие трубки, прикрепленные непосредственно к фильтру опытной скважины.

Для производства кустовых откачек пробуривается система или куст скважин, в котором одна (центральная) служит непосредственно для откачки, остальные (наблюдательные) располагаются на определенном расстоянии от центральной и служат для замеров уровня подземных вод при откачке. Число скважин в кусте зависит от характера водоносных пород и требующейся точности определения коэффициента фильтрации. Наиболее часто применяемые схемы опытных кустов показаны на фиг. 14—1,*а, б, в, г*.

Число опытных откачек и их распределение в пределах участка сооружений устанавливают, исходя из гидрогеологических условий и задач проектирования. Примерные указания по этому вопросу приводятся в табл. 14—12.

При опытных откачках измеряются расходы (дебиты) и понижения уровня воды в скважинах. Для получения более достоверных данных обычно дается 2—3 понижения, причем на каждом из них откачка продолжается от 8 до 24 час. (в зависимости от водопроницаемости пород) после достижения практически постоянных величин расхода и уровней во всех скважинах.

Величина коэффициента фильтрации на основании опытных откачек рассчитывается по формулам, приведенным в табл. 14—13, 14—14 и 14—15.



Фиг. 14—1

Схемы расположения скважин при опытных откачках

Таблица 14—12

Область применения опытных откачек

Стадии изысканий	Объем и распределение опытных откачек
Технико-экономический доклад (ТЭД)	На участках возможного расположения плотин производятся (по особым заданиям) лишь одиночные откачки в скальных и полускальных породах. Коэффициенты фильтрации песчаных пород можно определять по лабораторным анализам.

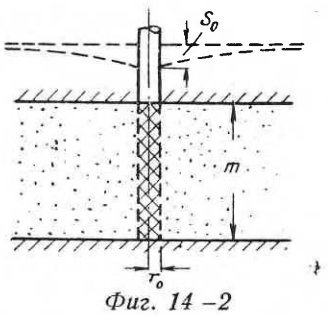
Продолжение табл. 14—12

Стадии изысканий	Объем и распределение опытных откачек
Проектное задание	1. На первом этапе изысканий для проектного задания производятся одиночные откачки из характерных водоносных горизонтов в районе возможного расположения сооружений 2. На втором этапе изысканий производятся одиночные и кустовые откачки на каждом конкурирующем участке расположения сооружений: а) на участке плотины и ГЭС производится по 2—3 откачки в пределах каждого морфологического элемента речной долины (пойма, террасы, коренные склоны); б) по трассе дериваций производятся одиночные откачки на указанных элементах речной долины; число откачек зависит от протяжения трассы и характерных изменений геологических условий и рельефа
Технический проект	Опытные откачки, преимущественно кустовые, производятся на окончательно выбранных створах расположения отдельных сооружений. Число кустов и глубина опробуемых зон устанавливаются в соответствии с проектом

Так как определение коэффициента фильтрации является трудоемкой работой, рекомендуется соответствующие фильтрационные расчеты производить сначала по ориентировочным характеристикам водопроницаемости пород, а затем решить вопрос, насколько необходимы опытные откачки, с учетом конкретных заданий изысканий.

Таблица 14—13

Формулы для расчета коэффициента фильтрации K по одиночным откачкам из совершенных скважин

Расположение скважин относительно водоема	Гидравлический тип подземных вод	Схемы	Расчетные формулы	Автор
Вдали от водоема	Напорные воды		$K = \frac{0{,}366\,Q \lg \frac{R}{r_0}}{m s_0}$ (14—1)	Дюпюи

Фиг. 14 –2

Продолжение табл. 14—13

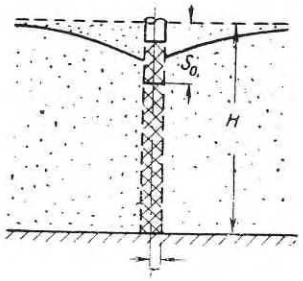
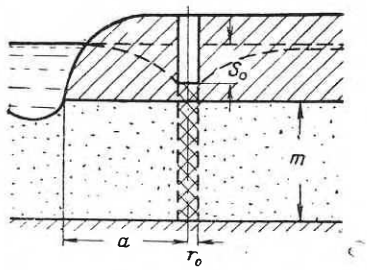
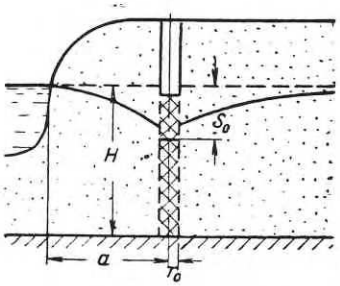
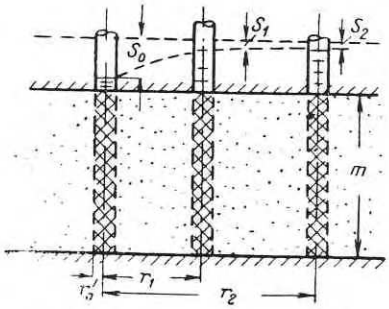
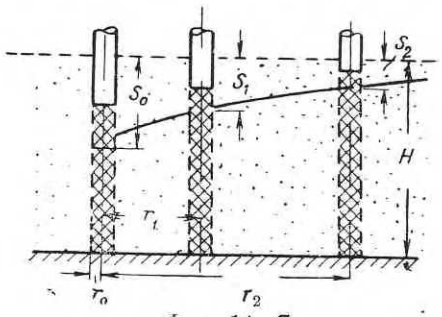
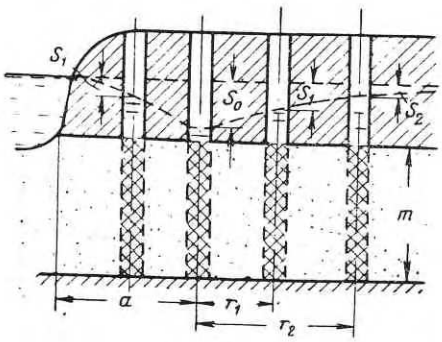
Расположение скважин относительно водоема	Гидравлический тип подземных вод	Схемы	Расчетные формулы	Автор
Вдали от водоема	Безнапорные воды	 *Фиг. 14-3*	$K = \frac{0{,}732\, Q \lg \frac{R}{r_0}}{s_0 (2H - s_0)}$ (14—2)	Дюпюи
Вблизи водоема	Напорные воды	 *Фиг. 14—4*	$K = \frac{0{,}366\, Q}{m s_0} \lg \frac{2a}{r_0}$ (14—3)	Форхгеймер
	Безнапорные воды	 *Фиг. 14—5*	$K = \frac{0{,}732\, Q}{s_0 (2H - s_0)} \lg \frac{2a}{r_0}$ (14—4)	

Таблица 14—14

Формулы для расчета коэффициента фильтрации K по кустовым откачкам из совершенных скважин

Расположение скважин относительно водоема	Гидравлический тип подземных вод и расположение скважин относительно берега водоема	Схемы	Расчетные формулы	Автор
Вдали от водоема	Напорные воды	 Фиг. 14—6	Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K = \frac{0{,}366\,Q}{(s_1-s_2)\,m}\lg\frac{r_2}{r_1}$ (14—5) Расчет по привязному пьезометру и наблюдательной скважине: $K = \frac{0{,}366\,Q}{(s_0-s_1)\,m}\lg\frac{r_1}{r_0}$ (14—6)	Дюпюи
	Безнапорные воды	 Фиг. 14—7	Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K = \frac{0{,}732\,Q\lg\frac{r_2}{r_1}}{(s_1-s_2)\,(2H-s_1-s_2)}$ (14—7) Расчет по привязному пьезометру и наблюдательной скважине: $K = \frac{0{,}732\,Q\lg\frac{r_1}{r_0}}{(s_0-s_1)(2H-s_0-s_1)}$ (14—8)	
Вблизи водоема	Напорные воды: луч, перпендикулярный к берегу водоема	 Фиг. 14—8	Расчет по одной наблюдательной скважине: $K = \frac{0{,}366\,Q}{ms_1}\lg\frac{2a\pm r_1}{r_1}$ (14—9) Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K = \frac{0{,}366\,Q}{m\,(s_1-s_2)}\left(\lg\frac{2a\pm r_1}{r_1} - \lg\frac{2a\pm r_2}{r_2}\right)$ (14—10) В формулах (14—9) и (14—10) знак плюс перед r_1 и r_2 принимается, когда наблюдательная скважина расположена на луче, направленном от центральной скважины в глубь берега; минус, если наблюдательная скважина находится между водоемом и центральной скважиной	Форхгеймер—Бабушкин

Продолжение табл. 14—14

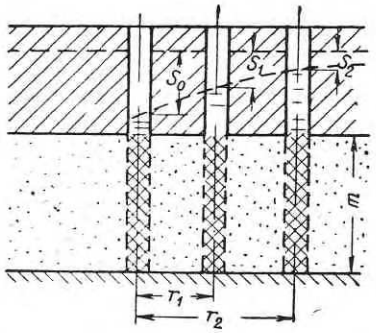
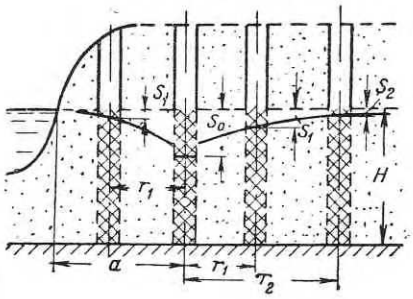
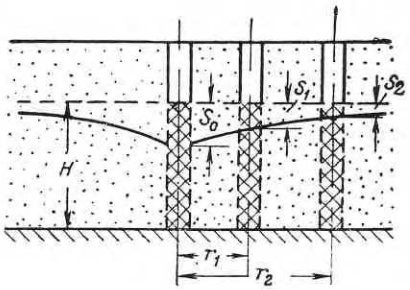
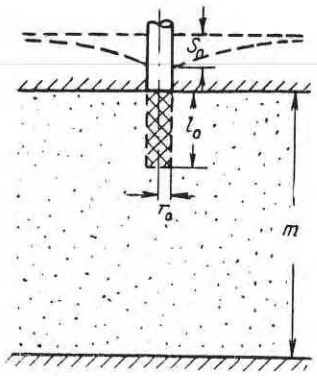
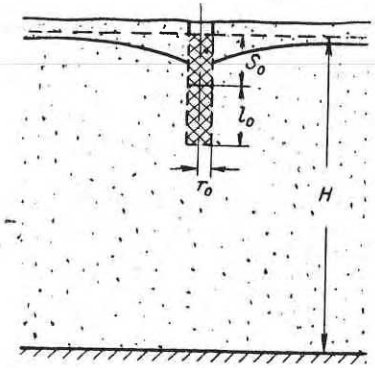
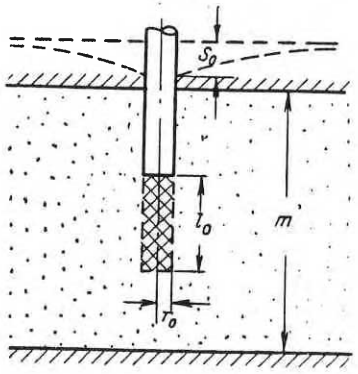
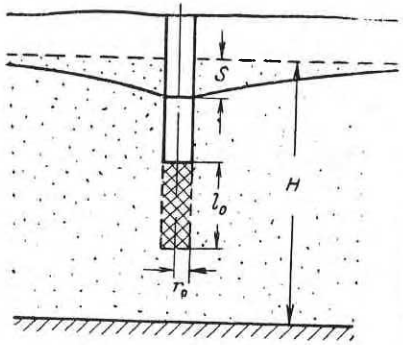
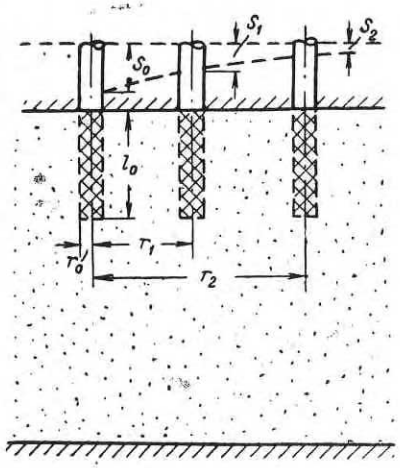
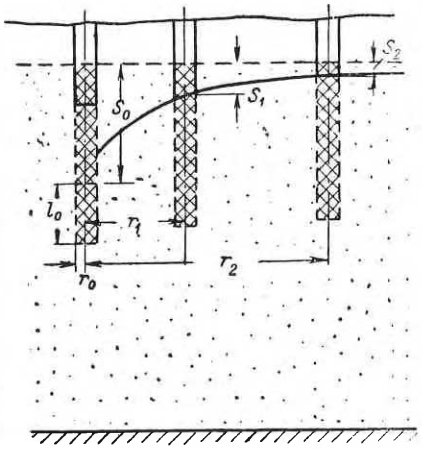
Расположение скважин относительно водоема	Гидравлический тип подземных вод и расположение скважин относительно берега водоема	Схемы	Расчетные формулы	Автор
Вблизи водоема	Напорные воды: луч, параллельный берегу водоема	 Фиг. 14—9	Расчет по одной наблюдательной скважине: $K=\frac{0{,}366\,Q}{ms_1}\lg\frac{\sqrt{4a^2+r_1^2}}{r_1}$ (14—11) Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K=\frac{0{,}366\,Q}{m(s_1-s_2)}\left(\frac{1}{2}\lg\frac{4a^2+r_1^2}{4a^2+r_2^2}+\lg\frac{r_2}{r_1}\right)$ (14—12) a — расстояние от реки до центральной скважины	Форхгеймер—Бабушкин
	Безнапорные воды: луч, перпендикулярный берегу водоема	 Фиг. 14—10	Расчет по одной наблюдательной скважине: $K=\frac{0{,}732\,Q}{s_1(2H-s_1)}\lg\frac{2a\pm r_1}{r_1}$ (14—13) Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K=\frac{0{,}732\,Q}{(s_1-s_2)(2H-s_1-s_2)}\times\left[\lg\frac{2a\pm r_1}{r_1}-\lg\frac{2a\pm r_2}{r_2}\right]$ (14—14) В формулах (14—13) и (14—14) знак плюс перед r_1 и r_2 принимается, когда наблюдательная скважина расположена на луче, направленном от центральной скважены вглубь берега; минус, если наблюдательная скважина находится между водоемом и центральной скважиной	
	Безнапорные воды: луч, параллельный берегу водоема	 Фиг. 14—11	Расчет по одной наблюдательной скважине: $K=\frac{0{,}732\,Q}{s_1(2H-s_1)}\lg\frac{\sqrt{4a^2+r_1^2}}{r_1}$ (14—15) Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K=\frac{0{,}732\,Q}{(s_1-s_2)(2H-s_1-s_2)}\times\left(\frac{1}{2}\lg\frac{4a^2+r_1^2}{4a^2+r_2^2}+\lg\frac{r_2}{r_1}\right)$ (14—16) a — расстояние от реки до центральной скважины	

Таблица 14—15

Расчет коэффициента фильтрации K по одиночным и кустовым откачкам из несовершенных скважин

Расположение скважин относительно водоема	Вид откачки	В напорных водах	В безнапорных водах	Расчетные формулы	Автор
Вдали от водоема. Длина фильтра незначительна по отношению к мощности слоя: $l_0 < \frac{1}{3} m$ и $l_0 < \frac{1}{3} H$	Одиночные откачки; фильтр примыкает к границе пласта	 Фиг. 14—12	 Фиг. 14—13	$K = \frac{0{,}366\,Q}{l_0\,s_0} \lg \frac{1{,}32\,l_0}{r_0}$ (14—17)	Бабушкин — Гиринский
	Одиночные откачки; фильтр удален от границы пласта	 Фиг. 14—14	 Фиг. 14—15	$K = \frac{0{,}366\,Q}{l_0\,s_0} \lg \frac{0{,}66\,l_0}{r_0}$ (14—18) Формула (14—18) может быть использована также в случае подрусловых откачек при условии погружения фильтра ниже дна реки на величину $c = \frac{l_0}{2{,}3 \lg \frac{l_0}{r_0}}$	

Продолжение табл. 14—15

Расположение скважин относительно водоема	Вид откачки	В напорных водах	В безнапорных водах	Расчетные формулы	Автор
Вдали от водоема. Длина фильтра незначительна по отношению к мощности слоя: $l_0 < \frac{1}{3} m$ и $l_0 < \frac{1}{3} H$	Кустовые откачки	 Фиг. 14—16	 Фиг. 14—17	а) Расчет по одной наблюдательной скважине: $K = \frac{0{,}16\,Q}{l_0\,s_1} \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1}$ (14—19) б) Расчет по привязному пьезометру и наблюдательной скважине: $K = \frac{0{,}16\,Q}{l_0\,(s_0 - s_1)} \left(2{,}3 \lg \frac{1{,}32\,l_0}{r_0} - \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1}\right)$ (14—20) в) Расчет по двум наблюдательным скважинам: $K = \frac{0{,}16\,Q}{l_0\,(s_1 - s_2)} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_2}\right)$ (14—21)	Бабушкин—Гиринский

Примечания. 1. При откачках из несовершенных скважин вблизи реки следует удалять скважины от последней на расстояние $a \geq 0{,}5\,m$ (или $0{,}5\,H$). При таких условиях влияние реки можно не учитывать.

2. В формулах, помещенных в табл. 14—13, 14—14 и 14—15:

K — коэффициент фильтрации в *м/сутки*;
Q — расход (дебит) при откачке в *м³/сутки*;
R — радиус депрессии в *м*. Приближенно принимается равным: для мелкозернистых песков—100 *м*, для среднезернистых и крупнозернистых песков—200 *м*, для галечников—500—800 *м*, для трещиноватых пород от 300 до 1 000 *м*. Остальные обозначения показаны на фигурах (размеры в метрах).

3. Опытные нагнетания

Опытные нагнетания воды в скважины производятся для суждения об относительной трещиноватости и водопроницаемости пород и осуществляются при помощи специальных тампонов, устанавливаемых на различных интервалах по глубине (см. фиг. 14—18).

В результате нагнетаний определяется так называемое удельное водопоглощение q, равное отношению количества поглощенной при опыте воды (в литрах в 1 мин.) к мощности опробуемого интервала (в метрах) и соответствующее 1 *м* напора.

Для возможности сопоставления результатов различных опытов при нагнетаниях во всех случаях принимаются одинаковые величины опробуемых интервалов и ступеней напора.

Расчет удельного водопоглощения выполняется с учетом фактической, полученной при опытах, зависимости расхода воды Q от величины напора H, причем

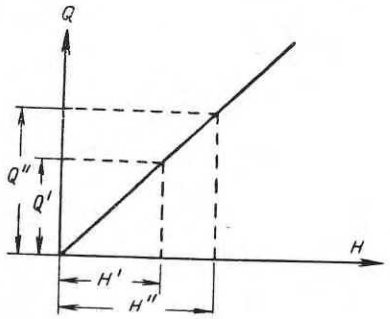
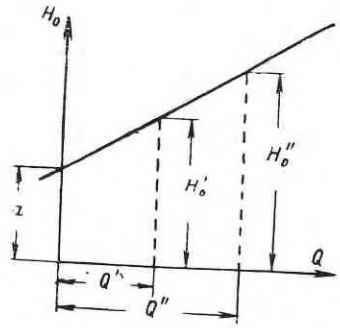
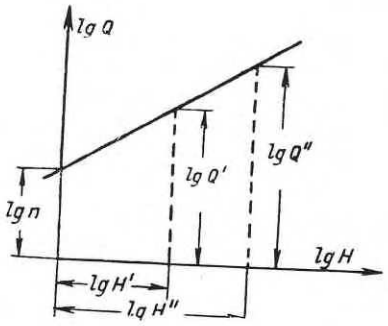
$$H = h + p,$$

где h — высота (в *м*) от оси манометра до уровня воды в скважине;

p — избыточное давление на манометре, выраженное в *м* вод. ст.

Таблица 14—16

Формулы для определения зависимости $Q=F(H)$

Вид графика	Формула для расчета Q	№ формулы	Формула для определения параметров	№ формулы
	Прямолинейная зависимость			
 *Фиг. 14—19*	$Q = aH$	(14—22)	$a = \frac{Q'' - Q'}{H'' - H'}$	—
	Параболическая зависимость			
 *Фиг. 14—20*	$Q = \frac{\sqrt{a^2 + 4bH} - a}{2b}$ $(H = aQ + bQ^2)$	(14—23)	$a = H_0' - bQ'$ $b = \frac{H_0'' - H_0'}{Q'' - Q'}$	(14—24) (14—25)
	Степенная зависимость			
 *Фиг. 14—21*	$Q = n\sqrt[\alpha]{H}$ $(1 < \alpha < 2)$	(14—26)	$\alpha = \frac{\lg \frac{H''}{H'}}{\lg \frac{Q''}{Q'}}$ $\lg n = \lg Q' - \frac{1}{\alpha} \lg H'$ (при $H=1$, $q=n$)	(14—27) (14—28)

При выборе расчетной формулы можно исходить из прямолинейной, параболической и степенной зависимостей $Q=F(H)$ (см. табл. 14—16).

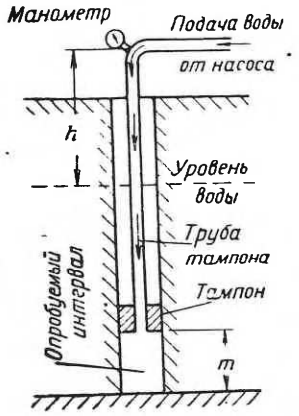
В формулах и графиках:

Q' и Q'' — расходы воды при опытах в *л/мин*;

H' и H'' — напоры при опытах в *м* вод. ст.;

H_0' и H_0'' — приведенные напоры, равные соответственно $\frac{H'}{Q'}$ и $\frac{H''}{Q''}$ в *м/л мин*;

a, b, α и n — параметры уравнений.



Фиг. 14—18. Схема опытных нагнетаний в скважины

После определения Q по одной из приведенных в табл. 14—16 формул вычисляется удельное водопоглощение по формуле:

$$q=\frac{Q}{mH}, \qquad (14—29)$$

где q — удельное водопоглощение в *л/мин*;

m — мощность опробуемого интервала в *м*;

H — напор в *м*.

Для получения сопоставимых результатов правильнее производить расчет удельного водопоглощения при $H=1$ *м*, что, кроме того, упрощает расчеты: при этом условии параметры a, $\lg n$ или $\lg q$ определяются непосредственно по графикам (см. фиг. 14—19÷14—21).

Наряду с удельным водопоглощением по результатам опытных нагнетаний можно определить также величину коэффициента фильтрации (по тем же формулам, что для опытных откачек с заменой s на H).

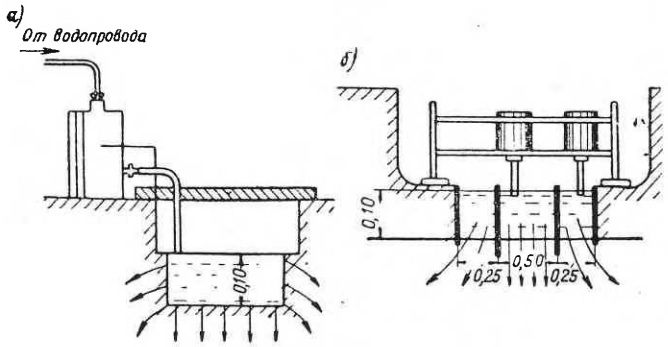
4. Наливы воды в шурфы

Наливы воды в шурфы производятся для изучения водопроницаемости неводоносных пород.

Опыты по наливу воды в шурфы выполняются по различным методам, например, Болдырева (фиг. 14—22,*а*) и Нестерова (фиг. 14—22,*б*).

Расчет коэффициента фильтрации по данным наливов в шурфы производится по формуле:

$$K=\frac{Q}{F}, \qquad (14—30)$$



Фиг. 14—22. Схема опытных наливов воды в шурфы
а — по методу Болдырева; *б* — по методу Нестерова

где K — коэффициент фильтрации в *м/сутки*;

Q — установившийся расход воды в *м³/сутки*;

F — в опытах по методу Болдырева — площадь смачиваемой поверхности зумпфа, равная $\pi r(r+2h)$ *м²* (r — радиус зумпфа; h — высота постоянного слоя воды в *м*); в опыте по методу Нестерова F — площадь дна зумпфа, ограниченная внутренним кольцом, в *м²*.

Примечание. При наливах по методу Болдырева расчет коэффициента фильтрации можно производить также по формуле Н. К. Гиринского, опубликованной в сборнике „Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии", труды института ВСЕГИНГЕО, Госгеолиздат, 1953.

5. Определение скорости движения подземных вод в порах и трещинах горных пород

Скорость движения подземных вод в порах и трещинах горных пород является важным показателем для оценки возможности суффозионного выноса частиц, размыва и нарушения устойчивости пород основания, подмывы шпунтов и т. д.

При инженерно-геологических изысканиях скорость движения подземных вод определяется опытным путем. Для этой цели в водоносный слой в одном каком-либо пункте (например, в скважине) вводится краска или соль и производятся наблюдения за временем прохождения их до другого пункта, расположенного на известном расстоянии.

Опыты по определению скоростей могут быть поставлены в условиях естественного потока или совмещенны с откачками из скважин.

Расчет средней скорости на основании опытов производится по формулам:

а) в условиях естественного потока

$$K_v=\frac{L}{TI}; \qquad (14—31)$$

б) при опытной откачке из совершенной скважины

$$K_v=\frac{\left(r_2^2-r_1^2\right)\ln\frac{r_2}{r_1}}{2\Delta h T}, \qquad (14—32)$$

где K_v — коэффициент скорости в порах, равный действительной средней скорости потока при градиенте I, равном единице, в *м/сутки*;

L — расстояние между пусковой и наблюдательной скважинами в *м*;

T — продолжительность в сутках хода соли или краски между скважинами, определяемая по кривой изменения концентрации в наблюдательной выработке. Для получения запаса при расчете скорости время T принимается на момент появления индикатора в скважине;

r_2 — расстояние дальней (пусковой) наблюдательной скважины от центральной в *м*;

r_1 — расстояние ближней наблюдательной скважины в *м*;

Δh — разность уровней в наблюдательных скважинах в *м*.

Примечание. 1. Если запуск индикатора производится в наблюдательную скважину и улавливается в центральной, то в формуле (14—32) величина r_1 является радиусом фильтра центральной скважины, а Δh – разностью уровней в наблюдательной и центральной скважинах. 2. Формула (14—32) выведена для напорных условий. В ненапорных водах она может применяться при значительной мощности водоносного горизонта.

Коэффициент скорости K_v определяется также по формуле:

$$K_v = \frac{K}{n}, \qquad (14-33)$$

где n — пористость пород, K — коэффициент фильтрации.

Имея величину K_v, можно определить действительную среднюю скорость движения воды в порах и трещинах в любой точке области фильтрации:

$$V = K_v I, \qquad (14-34)$$

где V — скорость движения воды в порах и трещинах в *м/сутки*;
I — градиент потока.

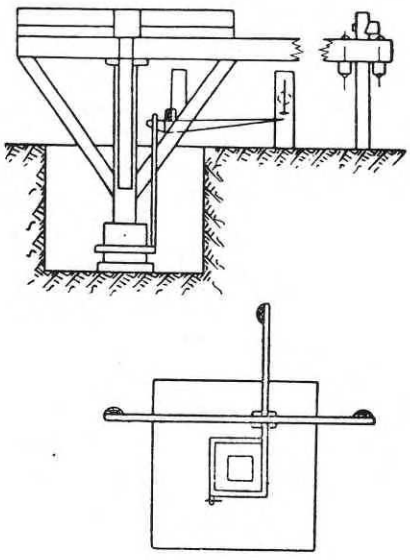
14—8. ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Полевые опыты по изучению физико-механических свойств грунтов производятся непосредственно на участках сооружений. Каждый опыт должен отвечать определенной технической задаче, устанавливаемой в процессе проектирования. В практике инженерно-геологических изысканий в основном проводятся два типа полевых опытов по изучению физико-механических свойств грунтов: 1) пробные нагрузки в шурфах и скважинах, 2) испытания сопротивления грунтов сдвигу.

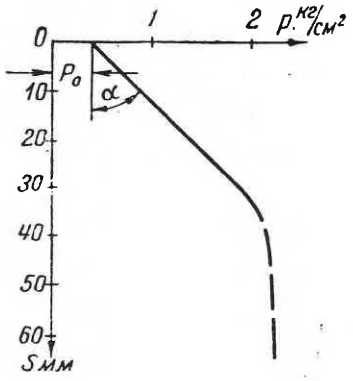
В отдельных случаях в полевых условиях производятся также специальные экспериментальные исследования: выветривания глинистых пород (в опытных котлованах, шурфах), «плывучести» песков, температурного режима грунтов и явлений пучения и осадок грунтов при замерзании и оттаивании (в районах вечной мерзлоты) и др.

1. Пробные нагрузки штампом

Пробные нагрузки в открытых шурфах производятся на штампы площадью 5 000 или 10 000 *см²* (первый



Фиг. 14—23. Схема испытаний грунта опытными нагрузками в шурфах



Фиг. 14—24. График зависимости $S=f(p)$ на опытных нагрузках

размер является стандартным). Установка для проведения нагрузок показана на фиг. 14—23.

Нагрузка на штамп производится ступенями (0,2—0,5—1,0—1,5—2,5 *кг/см²*) до достижения предельной нагрузки, при которой происходит выпирание грунта или образование трещин с резким скачком в возрастании осадки и длительной осадкой, протекающей примерно с одинаковой скоростью.

Результаты пробных нагрузок в шурфах обрабатываются следующим образом.

1. По графику зависимости осадки от нагрузки (фиг. 14—24) устанавливают предел пропорциональности между осадками и нагрузками для данного штампа.

Зависимость осадки от нагрузки в пределах пропорциональности выражается уравнением:

$$S = c\,(p - p_0), \qquad (14-35)$$

где S — осадка штампа в *см*;
p — удельное давление на штамп в *кг/см²*;
p_0 и c — параметры, определяемые из графика фиг. 14—24 ($c = \operatorname{ctg}\alpha$).

2. Устанавливается модуль деформации грунта:

$$E = ak\frac{P}{S}, \qquad (14-36)$$

где E — модуль деформации в *кг/см²*;
P — полное давление на штамп, вызвавшее осадку, в *кг*; принимается в пределах прямолинейного участка графика;
S — осадка в *см*;

$$k = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{1-\mu^2}{\sqrt{F}}, \qquad (14-37)$$

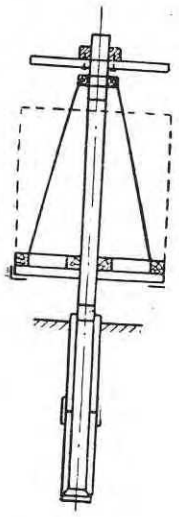
где μ — коэффициент бокового расширения грунта, равный для песков 0,29, для глин 0,42;
F — площадь штампа в *см²*;
a — поправочный коэффициент, учитывающий различие деформаций при испытании на поверхности (в шурфах) и на глубине (в скважине).

Значения k и a даны в табл. 14—17.

Таблица 14—17

Значения коэффициентов k и α

Тип испытаний и размер штампа	Песок		Глина	
	α	k	α	k
Поверхностное (в шурфах) испытание квадратным штампом F=5 000 *см*² . .	1,00	0,0115	1,0	0,0103
Глубинное (в скважинах) испытание круглым штампом F=600 *см*² . .	0,70	0,0331	0,70	0,297



Фиг. 14—25. Схема испытаний грунта опытными нагрузками в скважинах

В макропористых породах (лёссах, лёссовидных суглинках) пробные нагрузки производятся с замачиванием. Для контроля за изменением пористости пород при этом отбираются образцы до установки штампа и после окончания опыта.

Оценка просадочности породы, по Ю. М. Абелеву, может быть дана на основании показателей:

$$M = \frac{S_з}{S_н}, \qquad (14—38)$$

а также по разности $S_з - S_н$,

где $S_з$ — полная осадка опытного штампа после замачивания;

$S_н$ — осадка штампа до замачивания.

При $M > 5$ и $S_з - S_н > 3$ *см* (для штампа площадью 5 000 *см*²) порода оценивается как макропористая, обладающая просадочными свойствами.

Пробные нагрузки для испытания сжимаемости пород на глубине производятся в скважинах диаметром 325 *мм* со штампом, диаметр которого равен 277 *мм* (площадь 600 *см*²).

Схема установки для пробных нагрузок в скважинах дана на фиг. 14—25.

Обработка результатов пробных нагрузок в скважинах ведется по указаниям, изложенным выше.

2. Испытания на сопротивление грунтов сдвигу

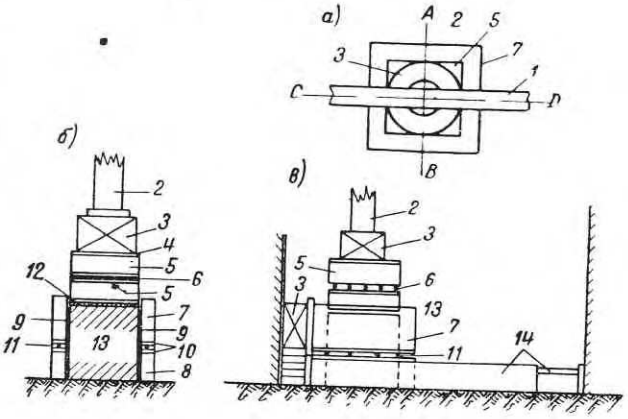
Испытания грунтов на сопротивление сдвигу в полевых условиях производятся над монолитами большого размера (с площадью сдвига порядка 600 *см*²) непосредственно в шурфах, котлованах и других горных выработках.

Одна из установок для проведения испытаний показана на фиг. 14—26.

В результате полевых испытаний составляется график зависимости сопротивления грунтов сдвигу от вертикальной нагрузки (фиг. 14—27), уравнение которого может быть выражено:

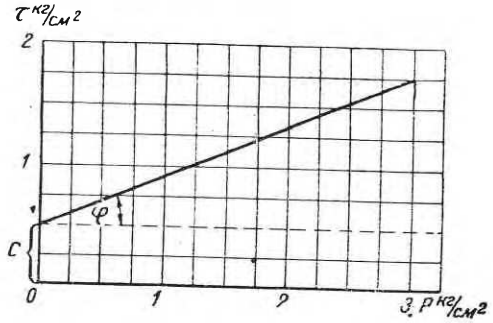
$$\tau = c + p\,\mathrm{tg}\,\varphi, \qquad (14—39)$$

где τ — сдвигающее усилие в *кг/см*²;



Фиг. 14—26. Схема испытаний грунта на сдвиг

а — план установки; *б* — разрез по $A—B$; *в* — разрез по $C—D$; *1* — верхняя упорная балка — № 50; *2* — деревянная стойка d=20—25 *см*; *3* — домкрат; *4* — листовая сталь 5—7 *мм*; *5* — штамп; *6* — металлические катки; *7* — верхний ящик; *8* — нижний ящик; *9* — битум; *10* — деревянные подкладки; *11* — металлические желобки и стальные шарики; *12* — зазор для заливки воды; *13* — монолит грунта; *14* — нижний упор



Фиг. 14—27. График зависимости $\tau = f(p)$ по испытаниям на сдвиг

c — сцепление, получаемое как отрезок, отсекаемый прямой на вертикальной оси, в *кг/см*²;

$\mathrm{tg}\,\varphi$ — коэффициент трения;

φ — угол наклона прямой к оси абсцисс;

p — вертикальная нагрузка в *кг/см*².

Зависимость $\tau = f(p)$ может быть получена при постоянной величине или коэффициента пористости ε или влажности w (гл. 15, п. 15—8).

14—9. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные исследования имеют целью:

а) установить принадлежность пород к определенным горизонтам (по стратиграфическому и литологическому признакам) и обосновать правильное построение геологических разрезов и карт;

б) получить качественные и количественные показатели физико-механических свойств горных пород;

в) охарактеризовать физические свойства и химический состав воды и возможное ее влияние на породы и бетон.

Таблица 14—18

Состав исследований горных пород

Виды исследований	Производимые определения	Горные породы, подвергающиеся исследованиям	Получаемые показатели
Палеонтологические	Состав фауны и флоры, пыльцевой анализ	Осадочные породы различного состава	Перечень (семейство, род, вид) окаменелых органических остатков (животных и растительных)
Петрографические и минералогические	Просмотр шлифов под микроскопом, минералогический анализ	Изверженные, осадочные и метаморфические породы	Минералогический состав и структура породы
Химические	Валовой химический анализ, химический анализ отдельных компонентов, анализ водных и солянокислых вытяжек	Осадочные породы различного состава, чаще—содержащие воднорастворимые соли	Перечень содержащихся в породе химических компонентов и растворимых солей
Физико-механические (геотехнические)	Физико-механические свойства пород: гранулометрический состав, естественная влажность, удельный и объемный веса, водопроницаемость, пластичность, сжимаемость (компрессионные испытания), сопротивление сдвигу	Осадочные, преимущественно нескальные породы: связные и несвязные	См. гл. 15
Водоустойчивость	Физическая и химическая стойкость пород: опыты на размокание, разбухание, размываемость, суффозию, растворение	Осадочные скальные и нескальные породы	Преимущественно качественные характеристики для оценки устойчивости пород против воздействия водного потока

Лабораторные исследования горных пород выполняются на всех стадиях изысканий и имеют комплексный характер.

Состав исследований горных пород указан в табл. 14—18.

Для характеристики химического состава воды производятся следующие анализы (см. табл. 14—19).

Агрессивное влияние воды и возможность разрушения бетона в сооружениях обусловливаются: а) растворением и вымыванием карбонатных (преимущественно) составных частей цемента и б) образованием новых соединений, кристаллизующихся в порах бетона. Большую роль в этом последнем процессе играют сульфаты; например, переход извести в гипс, образование двойной сернокислой соли алюминия и кальция или так называемой соли Деваля и т. п.

Оценку агрессивности воды на основании обработки и обобщения результатов химических анализов следует производить по ГОСТ 111-54 (см. гл. 6, п. 6—21). Для приближенной оценки воды можно пользоваться табл. 14—20.

Таблица 14—19

Виды химических анализов воды

Определяемые компоненты			
Полный анализ, выполняется выборочно для основных типов вод, выявленных на основании массовых определений		Сокращенный анализ, выполняется при массовых определениях	
количественный	качественный	количественный	качественный
Cl' SO_4''; HCO_3' (при наличии также CO_3''); $Na^{\cdot}$; $K^{\cdot}$; Ca'', Mg''; R_2O_3; SiO_2; свободная CO_2; pH; сухой остаток; потери при прокаливании	NO_3'; $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$; $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$	Cl'; SO_4''; HCO_3'; $Na^{\cdot}+K^{\cdot}$ (определяются по разности *мг-экв* анионов и катионов) $Ca^{\cdot\cdot}$; $Mg^{\cdot\cdot}$ (или общая жесткость), pH, сухой остаток	NO_3'; $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$; $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$

Таблица 14—20

Показатели для приближенной оценки агрессивности воды

Название химического компонента	Содержание химического компонента, при котором вода является агрессивной
Временная жесткость	Менее 3—4 град.
Показатель концентрации водородных ионов pH	Менее 7,0 при временной жесткости менее 24 град. и менее 6,7 — при временной жесткости более 24 град.
Свободная и агрессивная CO_2	Определяется в зависимости от соотношения ионов Ca'' (жесткости), Cl' и SO_4''. Обычно воды, содержащие значительное количество агрессивной CO_2, являются опасными, если только они не содержат большого количества ионов Ca''
Ионы SO_4''	Более 300—500 *мг/л*
Mg''	Более 5 000 *мг/л* (при содержании SO_4'' до 1 000 *мг/л*) в зависимости от временной жесткости

14—10. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В гидротехническом строительстве в качестве строительных материалов используются коренные скальные («каменные») породы (бут, облицовочный материал, щебень для бетона, материал для плотин и т. п.), гравий и песок (инертные добавки, заполнители в бетоне, материал для плотин и дренажных устройств и т. п.) и глинистые грунты (материалы для плотин, противофильтрационных экранов и т. п.).

В зависимости от стадии изысканий устанавливаются категории запасов строительных материалов, различающиеся по степени их изученности (см. табл. 14—21).

Объем работ по поискам и разведкам строительных материалов определяется, с одной стороны, стадией изысканий (требующейся категорией запасов) и, с другой — геологическими условиями.

Перспективность того или иного участка в отношении наличия строительных материалов устанавливается в процессе геологической съемки. Для характеристики качества строительных материалов в этот период отбираются единичные пробы из естественных обнажений или имеющихся искусственных выработок.

Специальные разведки с применением шурфов, канав, скважин и других выработок производятся в последующих стадиях для более детального изучения выявленных при геологической съемке месторождений. Разведочные выработки в пределах месторождений располагаются в зависимости от характера пород и условий их залегания по сетке в виде квадратов, прямоугольников или по отдельным линиям.

Качество строительных материалов оценивается по результатам анализов и испытаний проб, отобранных при разведке месторождений. Примерный состав определений для различных видов строительных материалов приводится в табл. 14—22.

Таблица 14—21

Схема деления запасов полезных ископаемых

Название категорий запасов	Степень изученности месторождений	На какой стадии инженерно-геологических изысканий устанавливаются
Категория *C*	Качество материала устанавливается по отдельным пробам, а в случаях, не вызывающих сомнения, — по аналогии с подобными породами изученных месторождений	Рекогносцировочные изыскания (схема)
„ C_2	Запасы месторождений определяются по геологическим предпосылкам. Отнесение запасов к категории C_2 производится только по геологическим соображениям, и лишь для новых районов и месторождений необходимы единичные исследования образцов.	Запасы категории C_2 служат для перспективного планирования строительства и планирования геологоразведочных работ
„ C_1	Запасы устанавливаются на основании данных изучения примыкающих месторождений (по экстраполяции), а также на основании геологического изучения естественных и редких искусственных обнажений и геофизических данных. Для отнесения к категории C_1 требуется исследование небольшого количества проб	Запасы категории C_1 служат для перспективного планирования строительства и установления ассигнований на геологоразведочные работы

Продолжение табл. 14—21

Название категорий запасов	Степень изученности месторождений	На какой стадии инженерно-геологических изысканий устанавливаются
Категория *B*	Качество материала устанавливается путем лабораторного изучения типичных проб. Запасы количественно достаточно точно устанавливаются разведками с точностью до 60—80% от общих запасов месторождения. Форма тела полезного ископаемого может быть выявлена недостаточно	Предварительные изыскания (проектное задание). В отдельных случаях окончательные изыскания (технический проект) Запасы по категории *B* используются для решения вопроса о технической возможности и экономической целесообразности разработки месторождения и обоснования проектного задания на строительство
Категория *A*	Механические свойства материала должны быть изучены	Окончательные изыскания (технический проект, рабочие чертежи)
» A_2	Запасы определяются детальной разведкой и опробованием при помощи горных выработок, буровых скважин или теми и другими. Для отнесения запасов к категории A_2 требуется определение их с точностью до 85—90% от общих запасов месторождения. Изучение качества должно быть произведено на типичных средних валовых пробах	Запасы по категории A_2 служат для обоснования технического проекта и генеральной сметы на строительство
» A_1	Запасы вполне устанавливаются и опробуются при оконтуривании тела полезного ископаемого горными выработками. Для отнесения запасов к категории A_1 требуется изучение качества всех сортов полезного ископаемого	Запасы по категории A_1 служат для обоснования производственного планирования горных эксплуатационных работ (при изысканиях для гидротехнического строительства обычно не устанавливаются)

Примечание. 1. Настоящая таблица деления запасов составлена по материалам, приведенным в книге „Инженерно-геологические исследования для гидротехнического строительства." т. II. Госгеолиздат, 1950.
2. При строительстве небольших гидротехнических сооружений запасы месторождений естественных строительных материалов могут быть рекомендованы к разработке на основании менее детальной разведки, чем это предусмотрено в таблице.

Таблица 14—22

Состав анализов и испытаний строительных материалов

Виды строительных материалов / Название определений	Каменные материалы	Гравий	Песок	Глинистые грунты[1]
Гранулометрический состав	—	+	+	+
Петрографический состав	+	+	+	—
Химический состав (содержание воднорастворимых солей и сернистых соединений)	+	—	+	+
Удельный вес	+	+	+	+
Объемный „	+	+	+	+
Водопоглощение	+	—	—	—
Фильтрационные свойства	—	—	+	+
Содержание органических веществ	—	+	+	+
Предел прочности на сжатие	+	+	—	—
Морозостойкость	+	+	—	—

[1] Кроме определения основных физических свойств. глинистые грунты в зависимости от намечаемого использования испытываются по специальной программе.

Технические требования, предъявляемые к различным видам строительных материалов, см. в гл. 6.

14—В. ОСНОВНЫЕ ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

14—11. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Объем инженерно-геологических изысканий и глубина разработки отдельных вопросов определяются стадией проектирования.

Инженерно-геологические изыскания заканчиваются камеральными работами и составлением отчетов и записок для обоснования проекта. Часть камеральных работ выполняется в период подготовки к полевым изысканиям и в процессе их проведения.

В соответствии с объемом и содержанием выполненных изысканий по их окончании может быть составлен один объединенный отчет или ряд отчетов по отдельным элементам работ (например, съемке, фильтрационным исследованиям и т. п.), а также по отдельным участкам проектируемых сооружений (например, участку расположения головного узла, водохранилищу, деривации и т. п.).

Инженерно-геологические отчеты представляют собой описание и обобщение всех выполненных полевых и камеральных работ и должны включать в себя по возможности весь имеющийся фактический материал, а именно: описание обнажений, рельефа и физико-геологических явлений, журналы и разрезы (колонки)

отдельных разведочных выработок, таблицы и графики откачек, нагнетаний и других опытных исследований, таблицы лабораторных данных и т. п.

По каждому вопросу изысканий в отчете излагаются подробные и обоснованные выводы, заключения и предложения исследователя как в развитие общетеоретических положений инженерной геологии, так и применительно к запросам проектирования и строительства. Отчеты иллюстрируются картами, разрезами и другими чертежами.

Инженерно-геологические записки к соответствующим проектам в отличие от отчетов должны содержать сводную обобщенную характеристику инженерно-геологических условий в разрезе конкретных требований проектирования и краткие обоснования этой характеристики материалами инженерно-геологического отчета.

14—12. ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ К ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ДОКЛАДУ (ТЭД)

Инженерно-геологическая записка к ТЭД должна иметь следующий состав.

1. Общая часть (общая характеристика всей долины в целом)

а) введение — целевая установка и программа изысканий, объем выполненных работ, исполнители;

б) история изученности района, краткий обзор главнейших литературных и архивных материалов и их оценка;

в) физико-географический очерк — описание рельефа и гидрографической сети; общая характеристика климата и отдельных его элементов; основные данные по гидрологии;

г) геологическое строение — стратиграфия, общая литологическая и инженерно-геологическая характеристика коренных и четвертичных отложений, тектоника;

д) геоморфология и физико-геологические явления — классификация и описание основных форм рельефа по их геологическому содержанию, условиям образования и развитию; характеристика физико-геологических явлений, имеющих инженерное значение (карст, оползни, осыпи и т. п.);

е) гидрогеологические условия — обзор водоносности коренных и четвертичных отложений с выделением основных водоносных горизонтов, общая схематическая характеристика этих горизонтов и химического состава подземных вод;

ж) инженерно-геологическое районирование — разделение речной долины по всему комплексу инженерно-геологических условий на отдельные отрезки — районы и общая оценка этих районов с точки зрения условий размещения и постройки гидротехнических узлов, каналов и водохранилищ.

Графические приложения: карта изученности и карта выполненных изыскательных работ (границы и масштабы съемки, местоположение и тип разведочных выработок и т. д.); гипсометрическая, геологическая, геоморфологическая и гидрогеологическая карты (могут быть даны комбинированные карты) и геолого-литологические профили; карта инженерно-геологическая с районированием территории.

2. Специальная часть

В этой части записки более конкретно и детально рассматриваются инженерно-геологические условия районов (участков) возможного размещения сооружений. По каждому такому участку составляется записка или раздел записки, состоящий из следующих глав:

а) введение — объем работ, выполненных на данном участке, краткое описание проекта;

б) геолого-геоморфологическое строение района (участка) — характерные особенности современного и древнего (погребенного) рельефа и тектонической структуры, схема литологического расчленения горных пород;

в) гидрогеологические условия с точки зрения общей характеристики водообильности, проницаемости пород, химизма подземных вод, расположения и связи отдельных водоносных горизонтов друг с другом и с рекой. Общие суждения о возможных путях и степени опасности фильтрационных утечек после постройки сооружений;

г) характеристика основных литолого-генетических типов горных пород (скальных, полускальных и нескальных) и предварительная их оценка как основания сооружений и в качестве строительного материала;

д) физико-геологические явления описываются по всей долине реки; дается общий прогноз этих явлений после постройки сооружений как для районов водохранилищ, так и для отдельных участков сооружений;

е) выводы и заключение по всему комплексу инженерно-геологических условий участка разрабатываются применительно к запроектированной схеме расположения сооружений.

Если изучалось несколько конкурирующих участков, то в выводах должно быть дано развернутое сопоставление и сравнительная инженерно-геологическая характеристика этих участков и соображения о составе и содержании дальнейших изыскательских работ.

Описание каждого участка иллюстрируется топографической, геолого-геоморфологической и инженерно-геологической картами, профилями, разрезами разведочных выработок и таблицами лабораторных анализов.

14—13. ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ К ПРОЕКТНОМУ ЗАДАНИЮ

Инженерно-геологическая записка к проектному заданию имеет в общем такую же схему построения, как и записка к ТЭД, но отличается от нее большей глубиной проработки и более конкретными характеристиками отдельных участков строительства.

Общая часть записки должна заканчиваться сравнительной характеристикой различных участков возможного расположения сооружений и конкретным инженерно-геологическим обоснованием выбора конкурирующих вариантов для более детальных изысканий второй очереди к проектному заданию.

В специальной части записки отдельно рассматриваются инженерно-геологические условия конкурирующих участков, расположение плотины, района водохранилища, трассы деривации, участка силового узла и т. д.

К инженерно-геологической записке должны быть приложены следующие графические документы: топо-

графическая карта с указанием на ней выполненных работ; геологическая, геоморфологическая, гидрогеологическая и инженерно-геологическая карты (или их сочетания) с характерными профилями и разрезами; карта водохранилища с показанием на ней угрожаемых участков в отношении фильтрации, подтопления и разрушения берегов; инженерно-геологические карты более крупного масштаба и профили по отдельным участкам возможного расположения сооружений; профили по всем вариантам створов и трасс и карты гидроизогипс; графики физико-механических и фильтрационных свойств горных пород; схематические профили водопроницаемости, трещиноватости, прочности пород и других показателей по створам основных сооружений.

14—14. ОТЧЕТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ К ТЕХНИЧЕСКОМУ ПРОЕКТУ

Инженерно-геологическая записка к техническому проекту в своей общей части должна содержать описание объема и методики выполненных работ и лишь краткую справку о природных условиях района по материалам проектного задания.

В специальных разделах записки освещаются инженерно-геологические условия каждого отдельного участка строительства. Это освещение дается с исчерпывающей полнотой, на основе конкретных материалов изысканий с учетом типа и конструкции сооружений и плана производства строительных работ. Записка иллюстрируется инженерно-геологическими, геолого-литологическими и фильтрационными планами и профилями с показанием расположения и заглубления оснований сооружений, а также графиками и таблицами по отдельным элементам выполненных изысканий.

В этой части записки, кроме того, предлагаются и соответствующим образом обосновываются инженерные мероприятия, которые необходимо осуществить для обеспечения устойчивости и нормальной работы сооружений, а также программа и методы необходимых стационарных наблюдений за режимом подземных вод, фильтрацией в основании сооружений, их осадкой, устойчивостью склонов и откосов и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

I. Общие руководства

1. Воздвиженский Б. И. и Волков С. А., Буровое дело, Госгеолиздат, 1949.
2. Гуменский Б. М., Основы геологии для строителя, Госгеолиздат, 1949.
3. Каменский Г. Н., Основы динамики подземных вод, ч. I, 1933, ч. II, 1943, Госгеолиздат.
4. Каменский Г. Н., Поиски и разведка подземных вод, Госгеолиздат, 1949.
5. Маслов Н. Н., Инженерная геология, Стройиздат, 1941.
6. Маслов Н. Н., Прикладная механика грунтов, Машстройиздат, 1949.
7. Обручев В. А., Основы геологии, Госгеолиздат, 1947.
8. Обручев В. А., Полевая геология, ГОНТИ, т. I и II, 1931.
9. Овчинников А. М., Общая гидрогеология, Госгеолиздат, 1949.
10. Приклонский В. А., Грунтоведение, ч. I, 1949, ч. II, 1952, Госгеолиздат.
11. Попов И. В., Инженерная геология. Госгеолиздат, 1951.
12. Саваренский Ф. П., Гидрогеология, ГОНТИ, 1935.
13. Саваренский Ф. П., Инженерная геология, ГОНТИ, 1937.
14. Силин-Бекчурин А. И., Специальная гидрогеология, Госгеолиздат, 1950.
15. Сорокин Л. В., Максимов Б. И. и др., Общий курс разведочной геофизики, Гостоптехиздат, 1949.

II. Методические указания и инструкции

1. Биндеман Н. Н., Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами и нагнетаниями, Углетехиздат, 1951.
2. Единые нормы выработки на геологоразведочные работы (ЕНВ): поисково-съемочные работы; горно-проходческие; разведочное бурение: гидрогеологические работы; химико-аналитические и другие лабораторные исследования; опробование твердых полезных ископаемых, Госгеолиздат, 1953.
3. Инженерно-геологические исследования для гидротехнического строительства, ч. I и II, МГРИ, ГИДЭП, Госгеолиздат, 1950.
4. Инженерно-геологическая съемка при гидроэнергетическом строительстве, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.
5. Исследование карьеров для намывных плотин и дамб. Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.
6. Каменский Г. Н., Инструкция по исследованию водопроводимости горных пород методом опытных нагнетаний, Госгеолиздат, 1946.
7. Литвинов И. М., Исследование грунтов в полевых условиях, Углетехиздат, 1951.
8. Наблюдения за режимом подземных вод в районе гидротехнических сооружений и по берегам водохранилищ, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1949.
9. Определение скорости и направления течения подземных вод, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1949.
10. Определение коэффициента фильтрации горных пород методом инфильтрации из шурфов, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.
11. Опытные нагнетания в одиночные скважины, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.
12. Приклонский В. А. и Лаптев Ф. Ф., Руководство по изучению физических свойств и химического состава подземных вод, Госгеолиздат, 1949.
13. Прогноз подпора грунтовых вод по берегам водохранилищ, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.
14. Справочник по инженерной геологии, под редакцией Ф. П. Саваренского, ГОНТИ, 1939.
15. Технические условия на исследование грунтов как оснований сооружений (проект), Госстройиздат, 1939.
16. Указания по определению коэффициента фильтрации при опытных откачках из несовершенных скважин, Водгео, 1950.
17. Условные обозначения для инженерно-геологических карт разрезов, Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

15—1. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГРУНТОВ

Гранулометрический состав грунтов определяется ситовым анализом: без промывки водой — для выделения частиц крупностью d=10—0,5 *мм*, с промывкой водой—для выделения частиц крупностью d=10—0,1 *мм*. Крупность частиц в пределах 0,50 *мм*$>d>$0,01 *мм* может быть определена способом отмучивания (Сабанина), крупность частиц в пределах 0,5$>d>$0,005 *мм*—пипеточным способом.

Частицы грунтов по крупности характеризуются данными [12], приведенными в табл. 15—1.

Таблица 15—1

Характеристика фракций по крупности

Наименование частиц	Диаметр частиц d в *мм*
Валуны:	
очень крупные	>800
крупные	800—400
средние	400—200
Булыжник	200—60
Галька и дресва	60—20

Продолжение табл. 15—1

Наименование частиц	Диаметр частиц d в *мм*
Гравелистые и хрящеватые частицы:	
крупные	20—10
средние	10— 4
мелкие	4— 2
Песчаные частицы:	
крупные	2—1
средние	1,0 —0,5
мелкие	0,50—0,25
очень мелкие	0,25—0,05
Пылеватые частицы:	
крупные	0,05 —0,01
мелкие	0,010—0,005
Глинистые частицы	<0,005

Таблица 15—2

Виды песчаных и крупнообломочных грунтов

Виды грунтов	Наименование грунтов	Распределение частиц по крупности в % от веса сухого грунта
Крупнообломочные грунты	Щебенистый Галечниковый	Сумма всех частиц крупнее 10 *мм* составляет более 50%
	Дресвяный Гравийный	Сумма всех частиц крупнее 2 *мм* составляет более 50%
Песчаные грунты	Песок гравелистый	Сумма всех частиц крупнее 2 *мм* составляет более 25%
	„ крупный	Сумма всех частиц крупнее 0,5 *мм* составляет более 50%
	„ средней крупности	Сумма всех частиц крупнее 0,25 *мм* составляет более 50%
	„ мелкий	Сумма всех частиц крупнее 0,1 *мм* составляет более 75%
	„ пылеватый	Сумма всех частиц крупнее 0,1 *мм* составляет менее 75%

Правила пользования табл. 15--2. Последовательно суммируются процентные содержания (по весу) частиц грунта сначала частиц крупнее 10 *мм*, затем частиц крупнее 2 *мм*, далее частиц крупнее 0,5 *мм* и т. д. Наименование присваивается по первому подходящему признаку в порядке расположения наименований в таблице.

Песчаные и крупнообломочные грунты (щебенистые, галечниковые, дресвяные, гравийные) в соответствии со СНиП [18] подразделяются на виды, приведенные в табл. 15—2.

15—2. УДЕЛЬНЫЙ ВЕС

Удельный вес частиц грунтов определяется согласно ГОСТ 5181-49 [7] и для основных видов четвертичных отложений СССР (песка, супеси, суглинка и глины) колеблется в пределах $\gamma_y = 2{,}50 \div 2{,}95$ *г/см³* (*т/м³*). По данным Д. Е. Польшина, значения удельного веса частиц этих грунтов, если они не содержат растительных остатков и водорастворимых солей и не вскипают при пробе соляной кислотой, могут быть приняты по табл. 15—3.

Таблица 15—3

Значения удельных весов грунтов

Наименование грунта	Удельный вес в *г/см³* (*т/м³*)
Пески	2,66
Супеси	2,70
Суглинки	2,71
Глины	2,74

Данными табл. 15—3 можно пользоваться для предварительных расчетов, а также для определения пористости влажного грунта по весу единицы объема и весовой влажности, при определении гранулометрического состава грунтов пипеточным и другими методами.

15—3. ОБЪЕМНЫЙ ВЕС И ПОРИСТОСТЬ

Объемный вес связных грунтов (глинистых) как нарушенной, так и ненарушенной структуры, может быть определен различными способами — режущего цилиндра, парафинирования и др. (ГОСТ 5182-49) [8]).

Объемный вес несвязных грунтов (песчаных, гравелистых и пр.) нарушенной структуры определяется засыпкой грунта в мерный цилиндр заданного объема.

Объемный вес песчаных и глинистых грунтов ненарушенной структуры, залегающих на большой глубине, определяется с помощью специальных цилиндров-грунтоносов, приспособленных для отбора проб из скважин.

Объемный вес крупнообломочных грунтов ненарушенной структуры, залегающих на небольшой глубине, определяется путем отбора и взвешивания пробы некоторого объема, измеряемого затем засыпкой песком.

Связь между объемным весом, удельным весом, пористостью, коэффициентом пористости выражается следующими формулами.

Объемный вес скелета (сухого грунта):

$$\gamma_{сух} = \frac{\gamma_w}{1 + w}, \qquad (15—1)$$

где γ_w — вес влажного грунта в единице объема в *г/см³* (*т/м³*);

w — влажность грунта в относительных единицах.

Объемный вес влажного грунта:

$$\gamma_w = \frac{\gamma_y}{1 + \varepsilon}(1 + w), \qquad (15—2)$$

где γ_y — удельный вес частиц грунта;

ε — коэффициент пористости.

Пористость грунта:

$$n = 1 - \frac{\gamma_{сух}}{\gamma_y}; \qquad (15—3)$$

$$n = 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_y(1+w)}; \qquad (15—4)$$

$$n = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \qquad (15—5)$$

Коэффициент пористости грунта при полном заполнении пор водой:

$$\varepsilon = \frac{w\gamma_y}{\gamma_в}, \qquad (15—6)$$

где $\gamma_в$ — объемный вес воды.

Полная влагоемкость грунтов выражается формулой:

$$w_{п.вл} = \frac{\varepsilon\gamma_в}{\gamma_y}; \qquad (15—7)$$

объем воздуха в 1 *см³* грунта

$$\gamma_в = (w_{п.вл} - w)\frac{\gamma_{сух}}{\gamma_в}; \qquad (15—8)$$

степень влажности

$$G = \frac{\gamma_y w}{\varepsilon\gamma_в} \qquad (15—9)$$

или

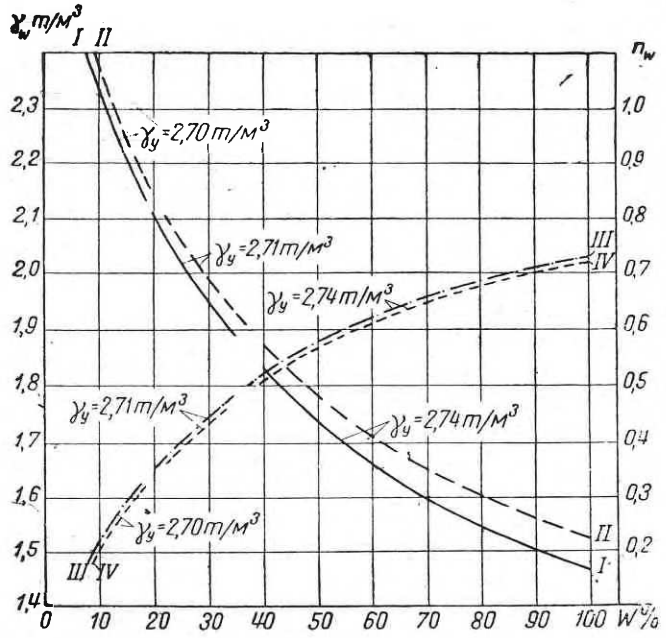
$$G = \frac{w}{w_{п.вл}}. \qquad (15—10)$$

При $G = 1$ поры грунта полностью заполнены водой — двухфазная система, при $G < 1$ поры грунта частично заполнены водой, частично воздухом — трехфазная система.

Для предварительных подсчетов при проектировании значения объемных весов связных грунтов (влажных) γ_w и значения пористости n можно определять из зависимостей $\gamma_w = f(w; \gamma_y)$ и $n = f(w; \gamma_y)$, зная величину влажности грунта w или задаваясь ею.

Зависимость объемного веса γ_w и пористости n от удельного веса и влажности грунта w при полностью заполненных водой порах (степень влажности $G = 1$) и частичном заполнении (степень влажности $G = 0{,}95$) приведена на фиг. 15—1. При этом для глин, суглинков и супесей значения удельных весов взяты из табл. 15—3.

По степени влажности (доля заполнения пор водой), песчаные и глинистые макропористые грунты характеризуются согласно НиТУ 6-48, табл. 15—4.



Фиг. 15—1. Зависимости объемного веса связного грунта (влажного) и пористости от удельного веса и влажности (для грунтов с удельным весом $\gamma_y = 2{,}7 \div 2{,}74$ т/м³)

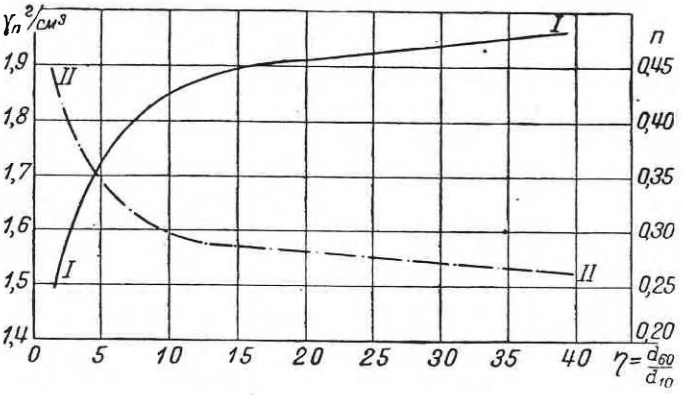
I—I—зависимость $\gamma_w = f(\gamma_y; w)$ (для грунтов со степенью влажности $G = 1{,}0$); *II—II* — то же, при степени влажности $G = 0{,}95$; *III—III* — зависимость $n_w = f(\gamma_y; w)$ для грунтов со степенью влажности $G = 1{,}0$; *IV—IV* — то же, при степени влажности $G = 0{,}95$

Таблица 15—4

Классификация грунтов по влажности

Наименование грунтов	Степень влажности G
Маловлажные	$\leqslant 0{,}5$
Очень влажные	0,5—0,8
Насыщенные водой	0,8—1,0

Определение осредненных величин объемного веса γ_n и пористости n несвязных грунтов (песчаных, гравелистых и галечниковых) приближенно можно выполнить по полученным экспериментально графикам $\gamma_n = f(\eta)$ и $n = f(\eta)$ (фиг. 15—2), где $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ =коэффициент неоднородности грунта, определенный по кривой гранулометрического состава (d_{10} — действующий диаметр — крупность таких частиц, меньше которых имеется в грунте по весу 10%, d_{60} — контролирующий диаметр — соответственно 60%).



Фиг. 15—2. Зависимости объемного веса несвязного грунта и пористости от коэффициента неоднородности грунта (для грунтов с удельным весом $\gamma_y = 2{,}64 \div 2{,}65$ т/м³)

I—I — зависимость $\gamma_n = f(\eta)$; *II—II* — зависимость $n = f(\eta)$

15—4. СТЕПЕНЬ ПЛОТНОСТИ

Степенью плотности характеризуется плотность несвязных грунтов в естественном залегании и плотность песчаных грунтов насыпных и намывных плотин. Степень плотности определяется по формулам:

$$D = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}; \qquad (15—11)$$

$$D = \frac{(n_{max} - n)(1 - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})(1 - n)}, \qquad (15—12)$$

где ε — коэффициент пористости песка природного сложения или коэффициент пористости грунта тела земляной плотины после насыпки или после намыва;

ε_{max} — коэффициент пористости того же песка, высушенного и находящегося в предельно рыхлом состоянии;

ε_{min} — коэффициент пористости того же песка, находящегося в предельно плотном состоянии.

По степени плотности несвязные (песчаные) грунты характеризуются (табл. 15—5) [11].

Таблица 15—5

Классификация песчаных грунтов по плотности

Наименование грунтов	Степень плотности D
Плотные	$\geqslant 0{,}67$
Средней плотности	0,67—0,33
Рыхлые	$\leqslant 0{,}33$

15—5. ВЛАЖНОСТЬ

Влажность грунта определяется обычно в лабораторных условиях путем сушки образца в сушильном шкафу до постоянного веса при температуре 100—105° (ГОСТ 5179-49 [6]).

Весовая влажность грунта w определяется как отношение веса воды, заключенной в порах грунта, к весу скелета грунта и выражается или в относительных единицах или в процентах.

Весовая влажность грунта в относительных единицах выражается также формулой:

$$w = \frac{\gamma_w}{\gamma_{сух}} - 1; \qquad (15—13)$$

объемная влажность определяется через весовую влажность по формуле

$$w_0 = w \frac{\gamma_{сух}}{\gamma_в}. \qquad (15—14)$$

Для быстрого определения влажности существует несколько способов — пикнометрический, карбидный, обжиговый и др.

Быстрое определение влажности грунта необходимо для контроля за уплотнением грунта при возведении земляных плотин, при обследованиях сооружений и пр.

Формула для определения влажности пикнометрическим способом, по данным Д. Е. Польшина, имеет вид:

$$w = a \frac{G_1 - G'}{G_2 - G_3} - 1. \qquad (15—15)$$

Здесь G' — вес колбы, в которой ведутся определения;
G_1 — вес колбы с грунтом, влажность которого определяется;
G_2 — вес колбы с грунтом и водой;
G_3 — вес колбы с водой;
w — влажность в относительных единицах;
a — для песка равен 0,624; для супеси 0,630; для суглинка 0,631; для глины 0,635.

При выводе формулы (15—15) для отдельных грунтов значения удельных весов приняты по табл. 15—3.

15—6. ГРАНИЦЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И КОНСИСТЕНЦИЯ ГРУНТОВ

1. Граница текучести

Граница текучести грунтов $w_т$ определяется согласно ГОСТ 5184-49 [10] посредством погружения стандартного конуса в образец грунта под действием собственного веса на глубину 10 *мм* от поверхности. Влажность на границе текучести выражается в процентах.

2. Граница раскатывания

Граница раскатывания связных грунтов $w_р$ согласно ГОСТ 5183-49 [9] определяется раскатыванием образца в жгут толщиной около 3 *мм*. Влажность на границе раскатывания $w_р$ выражается в процентах.

3. Число пластичности

Число пластичности связных грунтов $w_п$, выражаемое в процентах и равное

$$w_п = w_т - w_р, \qquad (15—16)$$

характеризует связный грунт.

Связные грунты характеризуются по признаку пластичности (табл. 15—6).

Таблица 15—6

Классификация связных грунтов по пластичности

Наименование грунтов	Число пластичности $w_п$
Супесь	1—7
Суглинок	7—17
Глина	>17

4. Консистенция грунтов

Величина, характеризующая консистенцию связных (немакропористых) грунтов, определяется по формуле:

$$B = \frac{w - w_р}{w_п}, \qquad (15—17)$$

где w — влажность в процентах для данного состояния грунта.

В НиТУ 6-48, связные (немакропористые) грунты различаются по консистенции (табл. 15—7).

Таблица 15—7

Классификация связных грунтов по консистенции

Наименование грунтов	Консистенция B
Твердые	<0
Пластичные	0—1
Текучие	>1

5. Максимальная молекулярная влагоемкость

Максимальная молекулярная влагоемкость $w_м$, по А. Ф. Лебедеву [13], служит характеристикой связанной воды [1] в грунтах.

Максимальная молекулярная влагоемкость грунта выражается влажностью в процентах. Она определяется в большинстве случаев способом влагоемких сред на прессе при давлении $\sigma \approx 65$ *кг/см²*.

По исследованиям А. Ф. Лебедева, частицы грунтов различной крупности в зависимости от диаметра d способны удерживать различное количество воды около своей поверхности. Эти данные приведены в табл. 15—8.

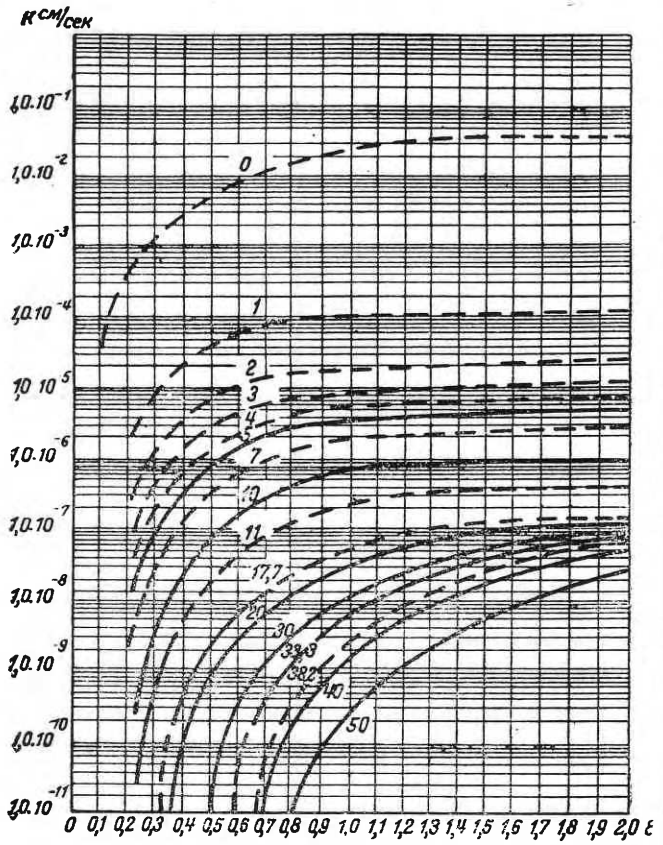
Таблица 15—8

Максимальная молекулярная влагоемкость (по А. Ф. Лебедеву)

d в *мм*	$w_м$ в %	d в *мм*	$w_м$ в %
1—0,5	1,57	0,10—0,05	4,75
0,5—0,25	1,60	0,05—0,005	10,18
0,25—0,10	2,73	0,005—0	44,85

15—7. КОЭФФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ

В лаборатории коэффициент фильтрации связных и несвязных грунтов определяется в приборах Г. Н. Каменского, П. П. Аргунова, И. М. Литвинова и др. на образцах нарушенной и ненарушенной струк-



Фиг. 15—3. Зависимость коэффициента фильтрации связного грунта от числа пластичности и коэффициента пористости $k = f(\varepsilon; w_п)$ (для грунтов с числом пластичности $w_п = 0 \div 50$)

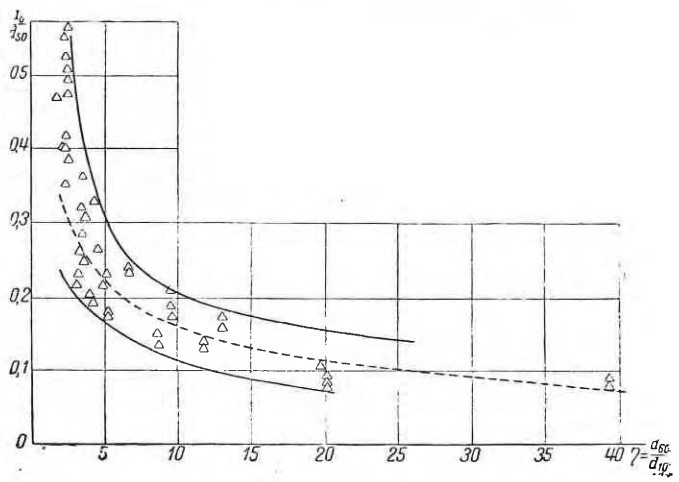
туры, а в полевых условиях — лишь для несвязных грунтов и скальных и полускальных (трещиноватых) пород в их естественном залегании (см. гл. 14).

Коэффициент фильтрации связных грунтов может быть приближенно определен по графику $k = f(\varepsilon; w_п)$ (фиг. 15—3) [3], где $w_п$ — число пластичности; ε — коэффициент пористости для заданного состояния.

Коэффициент фильтрации несвязных (песчаных и песчано-гравелистых) грунтов, если известен их гранулометрический состав или коэффициент неоднородности $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ и средний диаметр частиц d_{50}, может быть, по данным В. С. Истоминой, приближенно определен по формуле:

$$K = \frac{g n' d_0^2}{96 \nu}, \qquad (15—18)$$

где d_0 — средний диаметр пор (в гидравлическом отношении), определяемый, исходя из зависимости $\frac{d_0}{d_{50}} = f(\eta)$ (фиг. 15—4) и величины d_{50};



Фиг. 15—4. Зависимость среднего (в гидравлическом отношении) диаметра пор несвязного грунта от коэффициента неоднородности $\left(\frac{d_0}{d_{50}} = f(\eta)\right)$

n' — действительная пористость грунта, т. е. пористость, соответствующая порам, в которых может иметь место движение фильтрационного потока [определяется ниже, по формулам (15—20) или (15—21)];

ν — кинематический коэффициент вязкости воды;

g — ускорение силы тяжести.

При принятии температуры фильтрационного потока $t = 10°$ соответственно $\nu = 0{,}0131$ *см²/сек* и $g = 981$ *см/сек²* формула (15—18) будет иметь вид:

$$K = 7{,}8\, n' d_0^2, \qquad (15—19)$$

где d_0 в *мм*, K — в *см/сек*.

Формулы (15—18) и (15—19) действительны для грунтов с коэффициентами неоднородности от $\eta = 2{,}3$ до $\eta = 39{,}3$ при среднем диаметре частиц от $d_{50} = 0{,}10$ *мм* до $d_{50} = 8{,}00$ *мм*.

Величину среднего диаметра пор d_0 для грунтов со средними объемными весами $\gamma_п$, лежащими выше осредненной кривой зависимости $\gamma_п = f(\eta)$ (см. фиг. 15—2), следует определять в области ближе к верхней огибающей зависимости $\frac{d_0}{d_{50}} = f(\eta)$ (фиг. 15—4).

Для грунтов со средними значениями $\gamma_п$, лежащими ниже осредненной кривой зависимости $\gamma_п = f(\eta)$ (см. фиг. 15—2), величину среднего диаметра пор d_0 следует определить в области ближе к нижней огибающей кривой зависимости $\frac{d_0}{d_{50}} = f(\eta)$ (фиг. 15—4).

Величину действительной пористости для несвязных грунтов, у которых максимальная молекулярная влагоемкость $w_м \leqslant 3\%$, можно определить по формуле акад. Л. С. Лейбензона:

$$n' = n\left(1 - 0{,}114\,\frac{1-n}{n}\right), \qquad (15—20)$$

где n — пористость, определяемая по формуле (15—3).

Для грунтов, у которых $w_м > 3\%$, n' можно определить по формуле:

$$n' = n - \frac{w_м \gamma_у}{\gamma_в + w_м \gamma_у}. \qquad (15—21)$$

Таблица 15—9

Коэффициенты фильтрации крупнозернистых однородных материалов (по С. В. Избашу)

Диаметр частиц, приведенных к шару, d в *мм* . .	2,00	3,60	5,85	5,94	7,26	8,33	12,50	14,60	16,40	22,00	35,10
Коэффициент фильтрации K в *см/сек**	0,312	1,90	2,87	4,20	6,50	7,10	7,00	7,35	14,15	13,50	14,20

Коэффициент фильтрации крупнозернистых однородных материалов, по данным С. В. Избаша, можно определить по табл. 15—9.

Коэффициент фильтрации некоторых гравелистых материалов с частицами $d>1$ *мм*, по лабораторным данным В. С. Истоминой, может быть приближенно определен по табл. 15—10.

Таблица 15—10

Приближенные значения коэффициентов фильтрации гравелистых материалов

Средний диаметр частиц (по весу) d_{50} в *мм*	35,0	21,0	10,0	14,0	5,8	3,0	2,9
Коэффициент неоднородности $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	2,7	2,0	2,0	6,3	5,9	3,5	2,7
Пористость n	0,38	0,40	0,40	0,33	0,33	0,38	0,38
Коэффициент фильтрации (при температуре $t = 10°$) K в *см/сек*	20,0	20,0	10,0	5,0	3,3	0,8	0,8

Примерные осредненные значения коэффициентов фильтрации различных грунтов приведены в табл. 15—11.

Таблица 15—11

Коэффициенты фильтрации грунтов

Наименование грунтов	Коэффициенты фильтрации K в *см/сек*	Наименование грунтов	Коэффициенты фильтрации K в *см/сек*
Глина . .	$\leqslant 1\cdot10^{-7}$	Мелкозернистый песок . .	$1\cdot10^{-4}$—$1\cdot10^{-3}$
Суглинок	$1\cdot10^{-7}$—$1\cdot10^{-5}$	Среднезернистый песок . . .	$1\cdot10^{-3}$—$1\cdot10^{-2}$
Супесь .	$1\cdot10^{-5}$—$1\cdot10^{-3}$	Крупнозернистый песок . . .	$1\cdot10^{-2}$—$1\cdot10^{-1}$
Иловатые грунты .	$1\cdot10^{-3}$—$1\cdot10^{-2}$	Гравий и галька .	$1\cdot10^{-1}$—$1\cdot10$
Торфянистые грунты . . .	$1\cdot10^{-4}$—$1\cdot10^{-3}$		

* Значения коэффициентов фильтрации получены из формулы $K = \frac{v}{\sqrt[1]{J^m}}$, где градиент J менялся в интервале $0{,}10 < J < 1{,}00$.

15—8. СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ СДВИГУ

Сопротивление грунтов сдвигу определяется обычно на односрезных приборах (Н. А. Цытовича [19], А. А. Ничипоровича [15], М. Н. Троицкой и др.) в лаборатории и в полевой обстановке [19] на образцах грунтов нарушенной и ненарушенной структуры (в зависимости от условий работы грунта — в самом сооружении или его основании).

Сопротивление грунтов сдвигу в зависимости от вертикальной нагрузки в общем виде может быть выражено формулой:

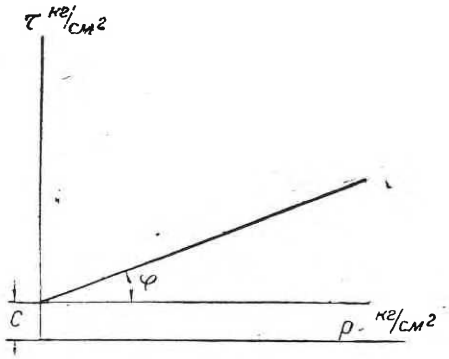
$$\tau = c + p \operatorname{tg} \varphi, \qquad (15—22)$$

где p — вертикальная нагрузка в *кг/см²* или *т/м²*;

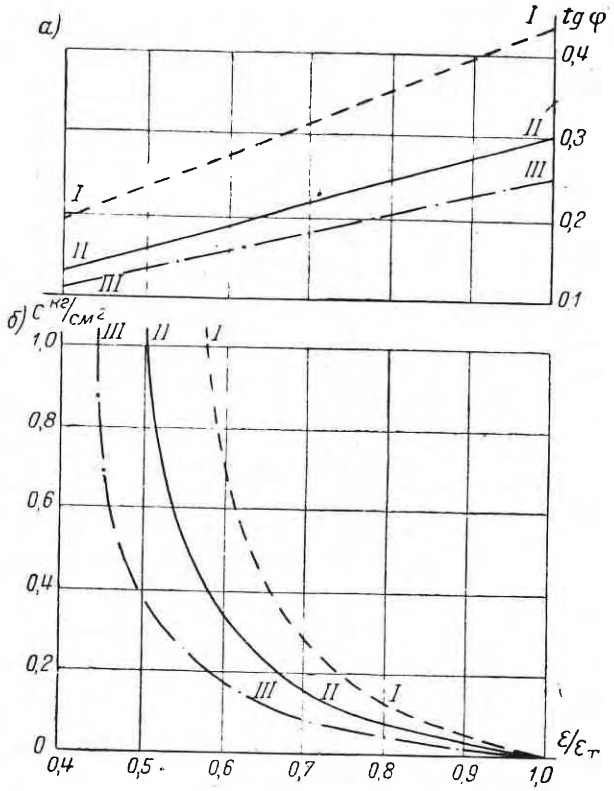
$\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения;

c — сцепление (в тех же единицах, что и p), получаемое как отрезок на оси ординат, отсекаемый прямой зависимости $\tau = f(p)$ (фиг. 15—5).

Зависимость $\tau = f(p)$ (фиг. 15—5) может быть получена, при постоянной величине либо коэффициента пористости, либо влажности (при $G=1$). При этом уплотнение образцов (обычно четырех) производится до стабилизации осадки под одной и той же нагрузкой $p = p_n$. Срез образцов после уплотнения выполняется на ветви разгрузки компрессионной кривой. Три образца срезаются при нагрузках p_1, p_2 и p_3, где $p_1 < p_2 < p_3 < p_n$, а четвертый при нагрузке $p_4 = p_n$ [15], [19].



Фиг. 15—5. Зависимость сопротивления сдвигу связного грунта от вертикальной нагрузки $\tau = f(p)$ при постоянных значениях влажности w или коэффициента пористости ε



Фиг. 15—6. Зависимости коэффициента трения и сцепления связного грунта нарушенной структуры при степени влажности $G = 1$ от отношения $\varepsilon/\varepsilon_т$ (для грунтов с $\varepsilon_т = 0{,}6 \div 2{,}5$)

а — зависимость $\operatorname{tg}\varphi = f(\varepsilon_т; \varepsilon/\varepsilon_т)$; *б* — зависимость $c = f(\varepsilon_т; \varepsilon/\varepsilon_т)$;
I—I — для грунтов с $\varepsilon_т = 0{,}6 \div 0{,}9$; *II—II* — для грунтов с $\varepsilon_т = 1{,}2 \div 1{,}8$; *III—III* — для грунтов с $\varepsilon_т = 2{,}1 \div 2{,}5$

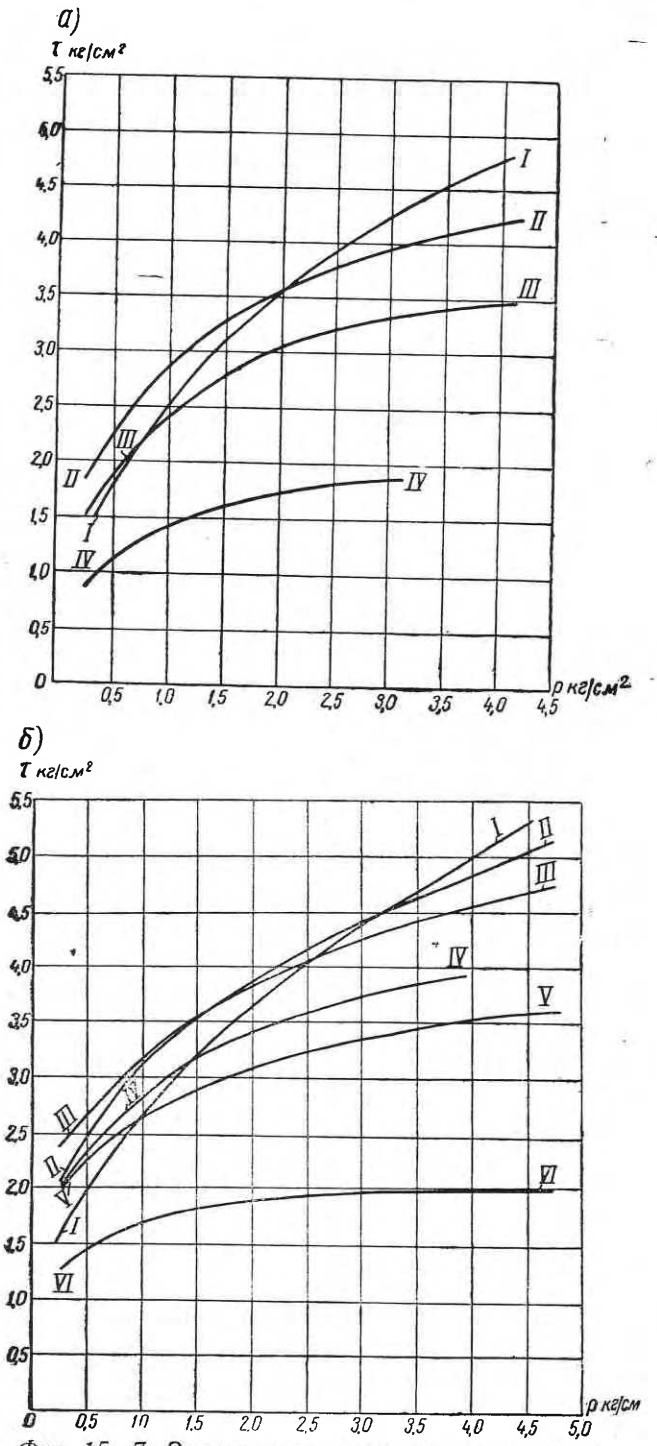
Значения величин $\operatorname{tg}\varphi$ и c связных грунтов нарушенной структуры при различных значениях коэффициента пористости ε и при полном насыщении пор водой ($G = 1$) в зависимости от величины коэффициента пористости на границе текучести $\varepsilon_т$ могут быть определены по данным А. А. Ничипоровича [15] или приближенно по графикам В. С. Истоминой, приведенным на фиг. 15—6:

$$\operatorname{tg}\varphi = f\left(\varepsilon_т; \frac{\varepsilon}{\varepsilon_т}\right) \text{ и } c = f\left(\varepsilon_т; \frac{\varepsilon}{\varepsilon_т}\right),$$

где $\varepsilon_т$ — коэффициент пористости на границе текучести $\left(\varepsilon_т = \dfrac{\gamma_у w_т}{\gamma_в}$ и $G = 1\right)$;

ε — коэффициент пористости для данного состояния.

Сопротивление сдвигу связных грунтов резко повышается при неполном насыщении пор грунта водой ($G < 1$). Влияние влажности на сопротивление сдвигу двух типов связного грунта (суглинка и глины) характеризуется кривыми на фиг. 15—7 (по данным С. И. Мигина).



Фиг. 15—7. Зависимость сопротивления сдвигу для глины и суглинка нарушенной структуры от вертикальной нагрузки при различной степени влажности $G < 1$

а — для суглинка, характеризующегося $w_т = 20\%$; $w_р = 13\%$; $w_м = 7\%$; $\gamma_{сух} = 1{,}81$ *г/см³*: *I — I* — при $w = 2{,}0\%$; *II — II* — при $w = 5{,}7\%$; *III—III* — при $w = 9{,}0\%$; *IV—IV* — при $w = 12\%$; *б* — для глины, характеризующейся $w_т = 45\%$; $w_р = 23\%$; $w_м = 14\%$; $\gamma_{сух} = 1{,}60$ *г/см³*: *I—I* — при $w = 5{,}9\%$; *II—II* — при $w = 9{,}6\%$; *III—III* — при $w = 14{,}3\%$; *IV—IV* — при $w = 17{,}4\%$; *V—V* — при $w = 19{,}4\%$; *VI—VI* — при $w = 23{,}3\%$

Кроме приведенного метода определения сопротивления связных грунтов сдвигу существует другой метод, предложенный Н. Н. Масловым и основанный на испытании недоуплотненных образцов грунта с фиксацией плотности — влажности грунта в зоне сдвига после проведения опыта. По этому методу срез осуществляется при разных нагрузках после различного времени выстаивания образца под нагрузками. В результате проведения указанных опытов можно построить кривые зависимости $\tau = f(w)$ для различных значений величины вертикальной нагрузки p и $\tau = f(p)$ для различных значений плотности — влажности грунта w. Однако процесс сдвига недоуплотненных образцов представляет собой явление весьма сложное, и для широкого его применения требуются дальнейшие уточнения и разработка ряда вопросов методики опытов (Н. А. Цытович [19]).

Углы внутреннего трения для песчаных грунтов в зависимости от крупности и плотности изменяются в соответствии с величинами, указанными в табл. 15—12 (по данным НИИ оснований и фундаментов, Д. Е. Польшин и С. И. Синельщиков).

Таблица 15—12

Углы внутреннего трения песчаных грунтов

Коэффициенты пористости ε	Виды песков и величины углов внутреннего трения φ в град.			
	гравелистые и крупные	средней крупности	мелкие	пылеватые
0,7	38	35	32	30
0,6	41	38	37	34
0,5	43	40	38	36

Примечание. Среднее квадратичное отклонение приведенных в табл. 15—12 значений углов внутреннего трения $\pm 2°$.

15—9. СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ГРУНТОВ РАЗРЫВУ

Сопротивляемость связных грунтов разрыву, или сцепление при разрыве $C_р$, может быть определено либо в цилиндрических приборах, либо в приборах в виде восьмерки, подобно тому, как это делается для испытаний образцов бетона.

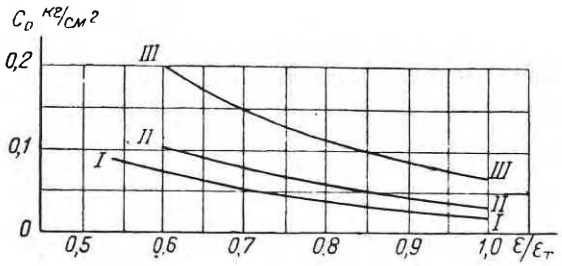
Сцепление при разрыве образцов связных грунтов, подобно сцеплению при сдвиге, зависит как от характера грунта (границы текучести $w_т$, числа пластичности $w_п$, коэффициента пористости при границе текучести $\varepsilon_т$), так и от того состояния грунта, в котором он находится (от влажности w и от коэффициента пористости ε).

Результаты определений для некоторых связных грунтов, по данным В. С. Истоминой, приведены на фиг. 15—8 в виде зависимости:

$$C_р = f\left(\varepsilon_т; \frac{\varepsilon}{\varepsilon_т}\right),$$

где $\varepsilon_т$ — коэффициент пористости на границе текучести $\left(\varepsilon_т = \frac{\gamma_у w_т}{\gamma_в}$ и $G = 1\right)$;

ε — коэффициент пористости для данного состояния.



Фиг. 15—8. Зависимость сцепления при разрыве связного грунта нарушенной структуры при степени влажности $G = 1$ от отношения $\varepsilon/\varepsilon_т$ (для грунтов с $\varepsilon_т = 0,6 \div 2,1$)

I—I — грунт с $\varepsilon_т = 0,6$; *II—II* — грунт с $\varepsilon_т = 1,1$; *III—III* — грунт с $\varepsilon_т = 2,1$

Величина сцепления при разрыве для грунтов с влажностью, близкой к границе текучести $w \approx w_т$, может быть приближенно определена по формуле:

$$C_р \approx \frac{0,14}{10^2 d_{80}} \text{ кг/см}^2, \qquad (15—23)$$

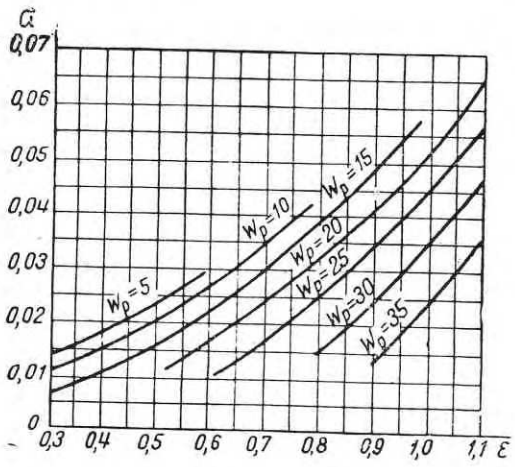
где d_{80} — диаметр в *мм* таких частиц, меньше которых в грунте имеется 80% по весу (определяется по кривой гранулометрического состава).

15—10. КОЭФФИЦИЕНТ УПЛОТНЕНИЯ

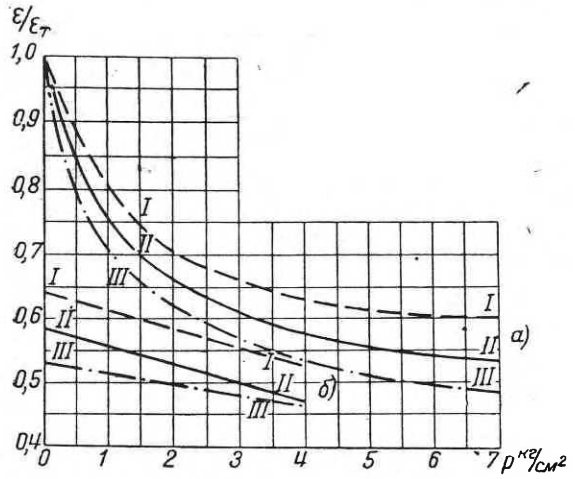
Коэффициент уплотнения грунтов в интервале изменения вертикальных нагрузок от величины p_{n-1} до p_n выражается формулой:

$$a = \frac{\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n}{p_n - p_{n-1}}, \qquad (15—24)$$

где ε_{n-1} и ε_n — коэффициенты пористости грунта при нагрузках p_{n-1} и p_n.



Фиг. 15—9. Зависимость коэффициента уплотнения связного грунта от коэффициента пористости и границы раскатывания (для грунтов с границей раскатывания $w_р = 5 \div 35$; a—в $см^2/кг$)



Фиг. 15—10. Относительная зависимость компрессионных кривых для связных грунтов нарушенной структуры при степени влажности $G = 1$

а и б — соответственно для грунтов в состоянии, близком к границе текучести и границе раскатывания

I—I — грунт с $\varepsilon_т = 0{,}6 \div 0{,}9$; *II—II* — грунт с $\varepsilon_т = 1{,}2 \div 1{,}8$; *III—III* — грунт с $\varepsilon_т = 2{,}1 \div 2{,}5$

Значения коэффициентов пористости грунта нарушенной и ненарушенной структуры при различных вертикальных нагрузках могут быть определены в компрессионных приборах[1].

Коэффициент уплотнения в зависимости от естественной пористости образцов ε и границы раскатывания w_p изменяется согласно графику на фиг. 15—9 [5], составленному на основе статистической обработки лабораторных испытаний образцов (Д. Е. Польшин, С. Н. Синельщиков, М. И. Горбунов-Посадов).

На фиг. 15—10 приведены относительные зависимости компрессионных кривых $\varepsilon/\varepsilon_т = f(p)$, по данным В. С. Истоминой, для некоторых грунтов нарушенной структуры при полном заполнении пор водой ($G = 1$), причем верхние кривые (участка *а*) относятся к грунтам в состоянии, близком к границе текучести, а нижние (участка *б*) в состоянии, близком к границе раскатывания. По оси ординат отложены отношения коэффициента пористости при заданном состоянии ε к коэффициенту пористости при границе текучести $\varepsilon_т$, а по оси абсцисс отложены вертикальные нагрузки p.

В компрессионных кривых, построенных в координатах $\varepsilon = f(p)$, имеет место равенство для каждой из компрессионных зависимостей:

$$\varepsilon_{n-1} + ap_{n-1} = \varepsilon_n + ap_n = A, \qquad (15—25)$$

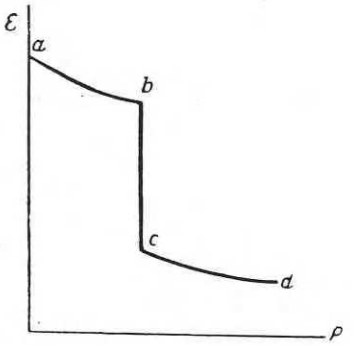
где A — постоянная величина.

Равенства (15—24) и (15—25) могут быть изображены в следующем виде:

$$\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n = a(p_n - p_{n-1}). \qquad (15—26)$$

Эта зависимость (закон уплотнения грунтов [18]) приложима для всех ветвей компрессионных кривых,

[1] На универсальном приборе А. А. Ничипоровича, на приборе И. М. Литвинова и др.



Фиг. 15—11. Компрессионная кривая просадочного грунта при замачивании

как для основной ветви нагрузки, так и для ветви разгрузки (набухания), а также и для последующих ветвей нагрузок и разгрузок.

Просадочные (макропористые) грунты при замачивании характеризуются скачкообразным изменением коэффициента пористости (фиг. 15—11) [19]; участок *ab* соответствует изменению коэффициента пористости для образца ненарушенной структуры (без замачивания), участок *bc* характеризует скачкообразный переход структуры в новое, более устойчивое состояние для данных внешних условий (при замачивании), участок *cd* соответствует компрессионному уплотнению грунта после частичного или полного нарушения его структуры.

Отношение объема макропор грунта к объему его скелета по Ю. М. Абелеву называется коэффициентом макропористости.

Просадочность грунтов $\delta_{пр}$ при заданном давлении p определяется по формуле:

$$\delta_{пр} = \frac{h - h'}{h_0}, \qquad (15—27)$$

где h — высота с естественной влажностью после обжатия нагрузкой p без возможности бокового расширения;

h' — высота того же образца при том же давлении p после замачивания;

h_0 — высота образца с естественной влажностью, обжатого без возможности бокового расширения давлением, равным природному.

По Н. Я. Денисову макропористость грунта может быть характеризована коэффициентом просадочности, определяемом выражением

$$k_{прос} = \frac{\varepsilon_т}{\varepsilon}, \qquad (15—28)$$

где $\varepsilon_т$ — коэффициент пористости при границе текучести;

ε — коэффициент пористости природного грунта.

По Н. Я. Денисову — лёссовидные грунты имеют $k_{прос} < 1$.

15—11. КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Коэффициент бокового давления грунта может быть определен путем выдергивания заложенных в грунт металлических лент в вертикальном и горизонтальном

направлениях и в специальных приборах (например, Н. Н. Маслова [14]).

Коэффициент бокового давления равен:

$$\xi = \frac{dq}{dp}, \qquad (15-29)$$

где dp — приращение вертикального давления;
dq — приращение горизонтального давления.

Величины бокового давления имеют порядок:

для песков $\xi = 0{,}35-0{,}42$;
для суглинков $\xi = 0{,}50-0{,}70$;
для глин $\xi = 0{,}70-0{,}75$.

По данным исследований И. В. Федорова и М. В. Малышева коэффициент бокового давления ξ песчаных грунтов увеличивается с уменьшением плотности грунта, а связных грунтов увеличивается с увеличением влажности и уменьшением структурной прочности грунта.

15—12. МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ

Модуль деформации грунтов выражается формулой:

$$E = \frac{(1-\xi)(1+2\xi)}{1+\xi} \cdot \frac{1+\varepsilon}{a}. \qquad (15-30)$$

Модуль деформации не только для различных видов грунтов, но и для одного и того же грунта может меняться в очень значительных пределах в зависимости от изменения его коэффициента пористости [19].

Модуль деформации для предварительных и ориентировочных расчетов (М. И. Горбунов-Посадов [5])

Таблица 15—13

Модуль деформации грунтов

Виды грунтов	Модуль деформации E в кг/см²	
А. Крупнообломочные грунты		
1. Гравий и галька	650—540	
2. Шебень	650—290	
3. Дресва	420—140	
Б. Песчаные грунты	Плотные	Средней плотности
1. Песок крупный и гравелистый (независимо от влажности)	480	360
2. Песок средней крупности	420	310
3. Песок мелкий:		
а) сухой	360	250
б) влажный и насыщенный водой	310	190
4. Песок пылеватый:		
а) сухой	210	175
б) влажный	175	140
в) насыщенный водой	140	90
5. Супесь:		
а) сухая	160	125
б) влажная	125	90
в) насыщенная водой	90	50
В. Глинистые грунты	В твердом состоянии	В пластичном состоянии
1. Глина	590—160	160—40
2. Суглинок	390—160	160—40

может быть определен по табл. 15—13 (Н. Н. Богословский [2]) или по формуле (15—30) с подстановкой коэффициента уплотнения a из графика фиг. 15—9.

При использовании графика фиг. 15—9 необходимо иметь в виду, что он приводит к величинам модулей деформации E, заниженным по сравнению с действительными величинами (особенно при малых величинах коэффициента пористости), так как этот график получен на основе лабораторных, а не полевых испытаний.

15—13. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Таблица 15—14

Виды грунтов, обладающих соответствующими характеристиками	№ характеристики	Наименование характеристик
Все виды грунтов	1	Удельный вес
	2	Объемный вес
	3	Коэффициент фильтрации
	4	Коэффициенты Пуассона и бокового давления
	5	Модуль деформации или модуль упругости
	6	Химический состав
Все виды грунтов, кроме скальных и полускальных[1]	7	Гранулометрический состав
	8	Коэффициент трения и сцепление
Грунты крупнообломочные и песчаные	9	Угол естественного откоса
Грунты песчаные и глинистые	10	Влажность
	11	Коэффициенты пористости и уплотнения
Грунты глинистые[2]	12	Границы пластичности
Грунты скальные и полускальные	13	Водонасыщение
	14	Твердость
	15	Предел прочности при сжатии[3]
	16	Морозостойкость
	17	Прочность при ударе
	18	Микроскопическая (шлифы)

[1] Определение коэффициента трения или сопротивления сдвигу в зависимости от структуры породы может потребоваться и для пород скальных и полускальных.

[2] Для глинистых макропористых грунтов важной характеристикой являются также коэффициенты макропористости и относительной просадочности, а для грунтов торфянистых—степень их разложения.

[3] Определение прочности при сжатии включает и испытания после 25-кратного замораживания и оттаивания при температурных условиях, соответствующих условиям работы сооружения в натуре, а также определение коэффициента размягчения.

15—14. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ГРУНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

(В настоящей таблице указаны номера характеристик согласно перечню в табл. 15—14)

Таблица 15—15

Стадия проектирования	Класс сооружения	Наименование грунтов				
		скальные и полускальные		крупнообломочные (галечные, гравелистые)	песчаные	глинистые
		оснований сооружений	карьеров для тела сооружений			
Технико-экономический доклад	I	1—3; 6; 13—15	1—2; 6; 13—15; 17	1—3; 6—7; 9	1—3; 6—11	1—3; 6—8; 10—12
	II	1; 2; 15	1—2; 15	1—2; 7; 9	1—2; 7; 9—10	1—2; 7; 10; 12
	III—IV	2; 15	2; 15	2; 7; 9	2; 7; 9—10	1—2; 7; 10; 12
Проектное задание	I	1—6; 13—18	1—2; 4—6; 13—18	1—9	1—11	1—8; 10—12
	II	1—3; 6; 13—15; 18	1—2; 6; 13—18	1—3; 6—9	1—3; 6—11	1—3; 6—8; 10—12
	III	1—3; 6; 13—15	1—2; 13—14; 17	1—3; 6—7; 9	1—3; 6—7; 9—10	1—3; 6—8; 10—12
	IV	1—3; 13—15	1—2; 13—14; 17	1—3; 7; 9	1—2; 7; 9—10	1—2; 7; 10; 12
Технический проект	I	1—6; 13—18	1—2; 4—6; 13—18	1—9	1—11	1—8; 10—12
	II	1—6; 13—15; 18	1—2; 6; 13—18	1—9	1—11	1—8; 10—12
	III	1—6; 13—15	1—2; 6; 13—17	1—3; 6—9	1—3; 6—11	1—3; 6—8; 10—12
	IV	1—3; 6; 13—15	1—2; 6; 13—17	1—3; 6—9	1—3; 6—7; 9—10	1—3; 6—8; 10—12

Примечания. 1. Характеристики макропористых грунтов (коэффициенты макропористости и относительной просадочности) и торфянистых грунтов (степень разложения) определяются опытным путем: 1) при всех стадиях проектирования сооружений I класса, 2) при составлении проектного задания и технического проекта сооружений II и III классов и 3) при составлении технического проекта сооружений IV класса.

2. При составлении рабочих чертежей опытным путем могут определяться те же характеристики, что и при составлении технического проекта, с целью уточнения соответствующих характеристик на отдельных участках сооружений.

3. Опытные определения характеристик грунтов оснований гидротехнических сооружений осуществляются по воз ности на образцах с ненарушенной структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианов П. И., Связанная вода почв и грунтов, Труды Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева, III, изд. Академии наук СССР, 1946.
2. Богословский Н. Н., Основания и фундаменты, Госстройиздат, 1947.
3. Геотехника, Канал Москва-Волга, Госстройиздат, 1940.
4. Герсеванов Н. М. и Польшин Д. Е., Теоретические основы механики грунтов и их практические применения, Госстройиздат, 1948.
5. Горбунов-Посадов М. И., Балки и плиты на упругом основании, Машстройиздат, 1949.
6. ГОСТ 5179-49. Грунты. Метод лабораторного определения влажности.
7. ГОСТ 5181-49. Грунты. Метод лабораторного определения удельного веса.
8. ГОСТ 5182-49. Грунты. Методы лабораторного определения объемного веса.
9. ГОСТ 5183-49. Грунты. Метод лабораторного определения границы раскатывания.
10. ГОСТ 5184—49. Грунты. Метод лабораторного определения границы текучести.
11. Грунты как основание гидротехнических сооружений. Нормы проектирования, Гидроэнергопроект, 1952.
12. Инструкция по проектированию, возведению и эксплуатации насыпных земляных плотин, Водгео, Госстройиздат, 1944.
13. Лебедев. А. Ф., Почвенные и грунтовые воды, изд. Академии наук СССР, 1936.
14. Маслов Н. Н., Прикладная механика грунтов, Машстройиздат, 1949.
15. Ничипорович А. А., Сопротивление связных грунтов сдвигу при расчете гидротехнических сооружений на устойчивость, Стройиздат, 1948.
16. Нормы и технические условия проектирования естественных оснований промышленных и гражданских зданий и сооружений (НиТУ 6-48) (2-е издание, 1950)
17. Приклонский В. А., Грунтоведение. ч. 1. 1949.; ч. II 1952, Госгеолиздат.
18. Строительные нормы и правила; л. II, Гос. издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954.
19. Цытович Н. А., Механика грунтов, Гос. издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951.