И. П. Кусакин

ИСКУССТВЕННОЕ ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

ОНТИ 1935

Кондратенко Н.М
1935 г. Ташкент

ВОЕННО-ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ РККА
им. В. В. КУЙБЫШЕВА

И. П. Кусакин

ИСКУССТВЕННОЕ ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

2-е издание, переработанное и дополненное

ГУУЗ НКТП утверждается в качестве учебного пособия для строительных втузов

ОНТИ 1935
Москва Ленинград

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация

В книге рассматриваются способы борьбы с притоком грунтовой воды при производстве выемок и подземных разработок в насыщенных водою породах путем искусственного понижения уровня грунтовых вод откачкой

Книга может служить пособием при проектировании работ по водоотливу в котлованах и подземных выработках, а также при проектировании, постройке и эксплоатации вертикального постоянного дренажа

При составлении труда использован заграничный и советский опыты в этом новом способе производства строительных работ в водоносных грунтах

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Способ искусственного понижения уровня грунтовых вод получил в последнее время широкое распространение в строительной практике за границей Сравнительная простота этого способа, дешевизна работ и возможность производства понижений на значительную глубину заставили большинство строительных фирм применять способ искусственного понижения во всех глубинных работах, где грунтовые условия позволяли получить наибольший эффект

Несмотря на результаты, достигаемые применением способа искусственного понижения уровня грунтовых вод, в нашей строительной практике этот способ не нашел должного распространения, что объясняется малым знакомством инженерно-технического состава с теорией и практикой этого дела и отсутствием соответствующего оборудования

Примеры из нашей строительной практики показывают, что в целом ряде случаев строительные организации должны прибегать к дорого стоящим работам или даже отказываться от глубинных работ только вследствие неподготовленности к применению понизительных устройств

Настоящий труд инж И П Кусакина представляет сводку всех теоретических и практических материалов по вопросу искусственного понижения уровня грунтовых вод и дает анализ всех условий, при которых этот способ может дать наиболее благоприятные результаты Особенно ценной частью этого труда являются практические предложения автора, основанные на анализе работы ряда выполненных понизительных устройств, что дает возможность использовать эти выводы в нашей строительной практике. При этом необходимо отметить, что имеющиеся у заграничных фирм опытные материалы обычно не публикуются и представляют секрет каждой фирмы, почему накопление у нас собственного опыта является насущной необходимостью

В заключение следует отметить, что труд И П Кусакина, представляющий первую крупную и обстоятельную работу на русском языке, даст возможность ознакомиться с вопросами искусственного понижения уровня грунтовых вод нашим инженерно-техническим работникам, что несомненно окажет известное влияние на широкое применение этого способа в союзной строительной практике.

Проф Н Ушаков

Ленинград
13 августа 1930 г

Безвременно погибшему сыну моему Борису посвящаю.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Грандиозное капитальное строительство в СССР в течение минувшей первой пятилетки выдвинуло на первый план наиболее совершенные способы работ с применением всех тех механизмов, которые выработала и вырабатывает передовая мировая техника. Во всех областях глубинного строительства (гидротехнического, горно-подземного, водопроводно-канализационного, оснований и фундаментов промышленных сооружений и зданий и т. п.) потребовались такие темпы и такая экономия рабочих рук, что старые методы работы в водоносных грунтах с применением открытого водоотлива неизбежно должны были заменяться более совершенным (в отношении скорости работ, экономии рабочей силы, возможности самого широкого применения строительных машин, лучшего качества и безопасности работ) методом искусственного понижения уровня грунтовых вод.

Уже в первой пятилетке способ искусственного понижения стал быстро завоевывать себе место в глубинном строительстве СССР, осваиваться строителями, организационно оформляться и укрепляться, стали создаваться материальная база и технические кадры.

Такие мощные строительные объединения, как Союзводстрой, Индустрой, быстро практически развили этот новый способ на строительстве крупнейших сооружений (Автозавод им. Молотова вблизи Горького, завод им. Дзержинского в г. Каменском, Магнитогорский завод и др.).

Вторая пятилетка с ее московским метрополитеном, каналом Волга — Москва, строительством гидростанций на Волге, Свири и других крупнейших реках, с разработкой новых месторождений каменного и бурого угля (Подмосковный бассейн) и целым рядом важнейших и крупнейших объектов глубинного строительства поставили задачу такого широкого и разнообразного применения способа понижения грунтовых вод, о котором в первой пятилетке не могло быть и речи.

Теперь уже можно сказать, что высокие требования в СССР к качеству строительных работ, к экономии рабочей силы и использованию механизмов не позволят никому на более или менее крупной постройке в водоносных грунтах обходиться старыми способами открытого водоотлива, если возможно и выгодно применить искусственное понижение уровня грунтовых вод.

Практические приемы искусственного понижения уровня грунтовых вод весьма разнообразны в связи с разнообразием гидрогеологических условий, размеров и характера сооружений, темпов строительства, наличия того или иного оборудования и целого ряда специфических местных особенностей. Рациональное применение того или иного приема, определение ко-

личества, размеров и типов предметов оборудования и их взаимного расположения могут быть достигнуты только при сочетании опыта строителя и инженерного расчета, как и во всякой иной области техники.

Предлагаемый труд имеет целью ознакомить советского строителя с применяемыми в настоящее время практическими приемами производства искусственного понижения уровня грунтовых вод, с теоретическими основами и приемами расчета установок понижения уровня грунтовых вод

Первое литографированное издание настоящей книги 1930 г. уже давно разошлось За истекшие 4 года практика и теория понижения сделали заметные шаги вперед, в соответствии с чем настоящее издание требовалось значительно расширить и переработать.

Появившийся в конце 1933 г. перевод книги Кирилейса «Искусственное понижение уровня грунтовых вод» в переработке Зихардта значительно облегчил эту задачу, так как дал возможность не касаться ряда весьма существенных вопросов, как например явления осадки грунта и почвы, примеры понижений с глубинными насосами и др, каковые интересующиеся найдут в книге Кирилейса-Зихардта

К сожалению ряд весьма существенных вопросов отсутствует как в настоящей нашей книге, так в книге Кирилейса и в иностраннои литературе К числу таких вопросов относятся например сопротивление колодцев. приемы осушения мелкопористых глинистых и торфяных грунтов и др, что объясняется главным образом неразработанностью или неполной разработанностью этих вопросов Наконец в предлагаемой книге, как и в книге Кирилейса, остались совершенно не развитыми теория и практика борьбы с напорными водами. Эти вопросы еще мало разработаны и вместе с тем настолько сложны, что должны составить предмет особого труда, появление которого давно ожидается практическими работниками по понижению и глубинному строительству вообще.

Автор считает особо необходимым подчеркнуть, что многие вопросы, затронутые в предлагаемой книге впервые, нуждаются в критическом к себе отношении

Всякие критические замечания, возражения и советы автором будут встречены с полным удовлетворением как способствующие более быстрому освоению теории и практики понижения и успешному дальнейшему усовершенствованию этого способа

И Кусакин

Москва
1934 г

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие к первому изданию 2
Предисловие ко второму изданию 3

Введение 7

Краткая история развития способа понижения 10

Краткий обзор литературы по теории и практике понижения грунтовых вод . . . 13

Глава I. **Основные черты современных установок понижения** 17

§ 1. Колодцы . . . . . —
1. Установка колодцев 26
2. Установка колодцев без бурения . . . . . —
§ 2. Всасывающая труба 30
§ 3. Всасывающий трубопровод 32
§ 4. Насосы 35
§ 5. Напорный трубопровод 37
§ 6. Двигатели . . . . . —
§ 7. Расположение установок понижения 39
§ 8. Ступенчатые или ярусные установки 40
§ 9. Удаление воздуха 45
§ 10. Глубинные насосы 47
1. Эрлифты 48
2. Водоструйные водоподъемники (эжекторы) 51
3. Штанговые поршневые насосы 52
4. Глубинные центробежные насосы с двигателем над устьем колодца . . . 60
5. Глубинные насосы с погружаемым в воду мотором 65

Глава II. **Терминология грунтовых вод** 74

Глава III. **Теория понижения уровня грунтовых вод** 80

§ 1. Основной закон движения грунтовых вод . . . . . —
§ 2. Теория одиночного трубчатого колодца при напорных грунтовых водах . . 85
1. Допущения и ограничения . . . . . —
2. Теория одиночного трубчатого колодца Dupuit-Thiem'a 86
3. Теория Kozeny 88
4. Выводы о теории Dupuit-Thiem'a 95
5. Поправки к формулам Dupuit-Thiem'a 97
6. Полный и неполный колодцы, установление величины H 100
§ 3. Основные уравнения групповой установки понижения напорных грунтовых вод 103
1. Уравнения Ph. Forchheimer'a . . . . . —
2. Подобные установки 107
3. Установки удлиненной формы 109
§ 4. Радиус действия 113
1. Радиус действия одиночного колодца . . . . . —
2. Радиус действия многоколодезной установки понижения напорных грунтовых вод 119

Стр.

§ 5 Теория одиночного трубчатого колодца и групповой установки при напорных водах 125
1. Одиночный колодец . . . . . —
2. Групповая установка 126
§ 6. Производительность колодца E 127
§ 7. Понижение уровня грунтовых вод вблизи открытых водоемов 135
§ 8. Влияние дождя 138
§ 9. Понижение уровня грунтовых вод при слоях различной водопроницаемости . . 140
§ 10. Влияние естественного уклона поверхности грунтовых вод 142

Глава IV. **Классификация грунтов** 147

§ 1. Общие соображения . . . . . —
§ 2. Классификация грунтов по способу образования 150
§ 3. Классификация грунтов по строению (по гранулометрическому составу) . . . 153
§ 4. Свойства грунтов по отношению к воде 158

Глава V. **Предварительные изыскания и исследования** 161

§ 1. Геологические исследования . . . . . —
1. Бурение. План работ. Добывание проб. Документация . . . . . —
2. Механический анализ грунтов 164
3. Полевое сравнительное определение механического состава грунтов . . . 168
4. Геогидрологические разрезы и карты 170
§ 2. Обследование местных особенностей . . . . . —
§ 3. Определение коэфициента водопроницаемости грунта k 172
1. Определение k по формулам . . . . . —
2. Лабораторное определение коэфициента водопроницаемости k 178
3. Полевые способы определения k 180
§ 4. Пробные понижения 189
1. Задача пробных понижений . . . . . —
2. Размеры пробных установок 190
3. Производство измерений . . . . . —

Глава VI. **Проектирование установок понижения** 198

§ 1. Общие соображения . . . . . —
§ 2. Расчет установок понижения уровня грунтовых вод 200
1. Установление величины водопроницаемости k 201
2. Установление радиуса действия установки понижения R 202
3. Установление производительности колодца E 203
4. Общий ход расчета установки понижения уровня грунтовых вод 204
§ 3. Пример расчета 212

Глава VII. **Производство искусственного понижения уровня грунтовых вод** . . . 221

§ 1. Наблюдения и регулирование работы станции . . . . . —
§ 2. Затруднения при понижении и меры их устранения 222
§ 3. Особенности земляных и прочих работ при искусственном понижении . . . 225

Примеры исполненных понижений 226

1. Понижение грунтовых вод при постройке шлюза Flaesheim . . . . . —
2. Понижение уровня грунтовых вод на заводе им. Дзержинского в г. Каменском 233
3. Понижение грунтовых вод на Александерплац 239
4. Понижение грунтовых вод под Лихтенбергским вокзалом в Берлине . . . 241

Заключение 244

Литература 247

ВВЕДЕНИЕ

Во всех областях строительства, связанных с отрывкой глубоких котлованов или с производством подземных работ, наибольшие трудности возникают при водоносности разрабатываемых грунтов.

В настоящее время известны следующие способы производства глубинных работ в водоносных грунтах:

1. Способы открытого котлована с наклонными или вертикальными стенками и с открытым водоотливом.
2. Способы работ с применением сжатого воздуха (кессонный способ, тоннельный способ со щитом).
3. Способ замораживания грунта.
4. Способ цементации грунта.
5. Способ окаменения (силикатизации) грунта.
6. Способ искусственного понижения грунтовых вод.

Если в отдельных случаях и можно себе представить применимость только одного из перечисленных способов, то в большинстве случаев все или несколько способов могут между собой конкурировать. На выбор того или иного способа влияют самые разнообразные условия.

Наиболее распространен благодаря своей простоте способ открытого котлована с открытым водоотливом. Если при отсутствии грунтовых вод заложение откосов соответствует углу естественного откоса сухого грунта, то в водоносных грунтах это заложение значительно увеличивается, а потому увеличивается и объем земляных работ. Во многих случаях (в городах) способ открытого котлована с наклонными стенками совершенно недопустим из-за недостатка площади, а потому заменяется котлованом с вертикальными шпунтовыми стенками и с тем же открытым водоотливом.

Если этот способ может применяться без особых затруднений при небольшой ширине котлована (траншея), то при большой ширине он становится более затруднительным, требуя сложных и не всегда вполне надежных креплений. Сложное крепление, не говоря уже об удорожании работ, настолько стесняет рабочее пространство котлована, что значительно затрудняет и даже совершенно иногда исключает возможность применения необходимых строительных машин.

Вода, проникающая в котлован через щели шпунтовых стенок и со дна, затрудняет и удорожает как земляные, так и остальные строительные работы и часто является причиной недостаточно хорошего качества работ. Поступающая в котлован во время работ вода часто выносит с собою из-за шпунта и со дна частицы грунта, за стенками образуются пустоты, ослаб-

ляется крепление, что угрожает обвалом котлована и является при известных условиях опасным в отношении устойчивости соседних строений.

Большинство углубленных и подземных сооружений должно быть надежно изолировано от проникания внутрь их грунтовой воды.

Основным условием для устройства изоляции является сухость котлована во время производства изоляционных работ, чего при открытом водоотливе (со дна котлована) трудно достигнуть.

Применение металлического шпунта новейших конструкций хотя и ведет к устранению целого ряда крупнейших недостатков котлованного способа с открытым водоотливом, но в экономическом отношении не всегда оказывается приемлемым.

Способы углубления котлованов без откачки воды с удалением грунта многоковшевыми землечерпалками и землесосами при больших открытых котлованах без крепления, а также и грейферными землечерпательными снарядами при котлованах малой площади с вертикальными шпунтовыми стенками, являясь иногда экономически выгодными и допустимыми, в редких случаях (при применении подводного бетонирования) могут исключить необходимость заканчивания котлована под защитой водоотлива. Основное требование при устройстве основания всякого сооружения заключается в том, чтобы грунт под основанием не был нарушен, т. е. не должно быть переборов и взрыхления грунта. Поэтому отрывка котлована под водой, если она вообще выгодна и допустима, должна быть прекращена ранее достижения проектной глубины котлована, после чего должна производиться откачка воды и продолжаться затем для углубления котлована до проектной отметки и для производства всех работ по устройству основания и вообще подземной части сооружения.

В тех случаях, когда недостаточно места для придания откосам котлована того большого заложения, которое требуется для устойчивости их при последующей откачке воды, когда грунт вместе с водой требуется транспортировать на большое расстояние, когда возможность оползания откосов котлована после водоотлива может угрожать устойчивости соседних сооружений, а вертикальное крепление стен после откачки воды из котлована должно испытывать такое давление наружного неосушенного грунта, что перерасходы на крепление сведут на-нет экономию от применения подводного землечерпания, тогда последнее становится невыгодным. Вообще способ подводного землечерпания из котлованов в очень многих случаях может оказаться неэкономичным и почти никогда не исключает необходимости водоотлива кроме случаев применения последующего подводного бетонирования.

Способ подводного бетонирования, состоящий в том, что бетонную массу в свежем, а иногда и в полусхватившемся (способ Киниппле) состоянии в мешках и ящиках по трубам с воронками спускают на дно котлована, заполненного водой, и укладывают слоями, имеет так много недостатков, что может применяться только при устройстве тех оснований, от которых не требуется особой прочности. При подводном бетонировании теряется много вяжущего вещества, получается много бетонной грязи, не схватывающейся и разделяющей всю подводную бетонную кладку на несвязанные слои и даже отдельные куски, причем удаление этой грязи насосами полностью не удается и создает добавочное вымывание цементного раствора. Приспособления для подводного бетонирования громоздки, распределение бетонной массы неравномерно, необходимо участие водолазов, применение арматуры весьма затруднительно, почти невозможно, так что устраивать железобетонные основания и тем более подземные части стен сооружения способом подводного бетонирования не удается, а если и удается, то весьма сомнительного качества.

Ввиду этих недостатков способ подводного бетонирования в открытых котлованах на суше или в водоеме за перемычками почти совершенно вытеснен способом нормальной кладки в осушенном при помощи искусственного понижения уровня грунтовых вод котловане, а если еще может найти применение, то лишь при устройстве таких например сооружений, как портовые молы, где не требуется такой тщательности бетонной кладки, которая оправдала бы устройство ограждающих перемычек и производство водоотлива.

Способы работ с применением сжатого воздуха сопряжены с большими расходами средств и времени, требуют сложного оборудования, особо привычных и выносливых рабочих и связаны с опасностью для их здоровья.

Кессонный способ применяется главным образом для устройства подводных оснований, способ же горизонтального кессона — «способ со щитом» — применяется для тоннельных работ в водоносных грунтах только на достаточно большой глубине.

Однако и из этих довольно узких областей применения способ сжатого воздуха все более и более теперь вытесняется способом понижения грунтовых вод, не сопряженным с вышеуказанными недостатками.

Способ замораживания в отдельных случаях (проходка шахт в глинистых плывунах) имеет неоспоримые преимущества перед всеми другими способами, однако, когда с ним могут конкурировать другие современные способы, уступает им, особенно при выработках с большой площадью. Существеннейшими его недостатками являются большая стоимость оборудования и эксплоатации, а также чувствительность к движению грунтовых вод.

Способ цементации грунта имеет наибольшее применение для прекращения постоянной фильтрации воды через грунт. Так например цементация часто применяется для устранения фильтрации воды под основанием плотин из крупнозернистых рыхлых или трещиноватых скальных пород.

Защита же котлованов или подземных выработок большого протяжения только на время производства работ посредством цементации грунта, при высокой стоимости цемента и производства работ, в большинстве случаев оказывается экономически невыгодной, а потому применяется сравнительно в редких случаях, когда никакой другой способ не может быть применен или оказывается еще более дорогим.

Способ окаменения (силикатизации) грунта состоит в том, что в грунт через скважины нагнетаются особые жидкости, которые во взаимодействии одна с другой и с песчаным грунтом превращают последний в сцементированную породу, не пропускающую воду. Этот способ работ является весьма радикальным в глубинном строительстве, но при его сравнительной новизне пока еще является очень дорогим, а потому применяется для защиты котлованов от притока грунтовых вод в сравнительно небольших объемах и главным образом там, где другие способы не достигают цели или оказываются еще более дорогими.

Способ искусственного понижения уровня грунтовых вод, появившийся впервые в 70-х годах прошлого столетия и долгое время малоизвестный, за последние три десятилетия сделал такие успехи, что стал за границей, в частности в Германии, одним из наиболее распространенных способов глубинных работ в водоносных грунтах. С первой пятилетки он начал усиленно внедряться в практику глубинного строительства СССР, а теперь применение его у нас неуклонно расширяется.

Этот способ заключается в установке группы трубчатых или шахтных фильтрационных колодцев, определенным образом расположенных на тер-

ритории постройки, и непрерывной откачки из этих колодцев притекающей в них грунтовой воды.

В результате более или менее продолжительной откачки первоначальный природный уровень грунтовых вод в пределах площади строящегося сооружения понижается до необходимой глубины, а следовательно подлежащий отрывке грунт до той же глубины освобождается от воды. Отрытый затем в осушенном грунте котлован или подземная выработка при продолжающемся действии колодцев сохраняется в осушенном состоянии до окончания всего сооружения или части его, расположенной ниже природного уровня грунтовых вод. После окончания постройки водоотлив прекращается, колодцы вытаскиваются и вокруг сооружения восстанавливается первоначальный уровень грунтовых вод. Экономичность, простота оборудования, возможность самого тщательного выполнения строительных работ и широкого применения строительных машин, безопасность для соседних строений — вот те главные преимущества способа понижения уровня грунтовых вод, которые способствовали его широкому распространению и непрерывному совершенствованию.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СПОСОБА ПОНИЖЕНИЯ

Существенным отличием способа понижения от открытого водоотлива является то, что в последнем отрывка производится попутно с водоотливом со дна котлована, тогда как в первом отрывке предшествует осушение грунта при помощи заранее устанавливаемых трубчатых колодцев.

Не считая примитивных устройств для такого предварительного осушения грунта, применявшихся еще в древности, начало применения способа понижения в близком к современному виде следует отнести к середине 70-х годов прошлого столетия: впервые в это время понижение было произведено при постройке водоотливного канала в Тегеле и несколько позднее при постройке шлюза в Гольгенау (Северогерманский канал). Правда, там еще не были применены буровые колодцы, вместо них было небольшое количество шахтных колодцев. В 1886 г. известный гидролог А. Тим (A. Thiem) в предместье Лейпцига —Наунгофене при постройке главного водосборного колодца применил понижение уровня грунтовых вод при помощи шести трубчатых колодцев, расположенных вокруг строившегося сооружения; в эти колодцы были опущены всасывающие трубы, которые были присоединены к общему всасывающему трубопроводу, ведущему воду к центробежному насосу.

В начале 90-х годов прошлого столетия под руководством Зейферта (Seyfferth) были произведены работы с понижением грунтовых вод при постройке водопроводных сооружений у оз. Ван и в Юнгферхейде (Германия)

В 1897 г. инж. Бредтшнейдер (Bredtschneider) впервые применил понижение грунтовых вод при постройке канализации в Шарлоттенбурге, причем была достигнута экономия в 50% против применявшегося до того способа работ с шпунтовым ограждением и открытым водоотливом.

В 1894—1896 гг. способ понижения был применен для постройки отдельных участков метрополитена в Будапеште. Начиная с 1900 г, этот способ стал применяться при постройке берлинского метрополитена и скоро завоевал там преимущественное, а затем и исключительное положение.

В 1903—1904 гг. во Франции искусственное понижение уровня грунтовых вод было применено в большом масштабе при постройке метрополитена в плывунах на улице Бельгран в Париже.

Дальнейшая история дает многочисленные примеры понижения грунтовых вод в различных областях глубинного строительства Германии, Франции, Англии, Америки, Швеции, Венгрии, Бельгии, Голландии и др

В дореволюционной России этот способ был мало известен, хотя отдельные случаи его применения и имели место, как например понижение на 3,5 *м* напорного уровня грунтовой воды, произведенное инж. Е. К. Кнорре при постройке водозаборного колодца на текстильной фабрике б. Циндель в 90-х годах прошлого столетия, при постройке Кочетовской плотины на Дону в 1912—1913 гг., при постройке главной насосной канализационной станции в Москве в 1913 г. и некоторые другие.

Первые случаи понижения грунтовых вод ограничивались незначительными глубинами. Так как высота всасывания насосов при неизбежных потерях в трубопроводах не превосходит обычно 5—7 *м*, а в промежутках между колодцами уровень грунтовой воды располагается выше уровня в колодцах, то общее понижение уровня грунтовых вод обычно не превосходит 3—5 *м*. Для достижения более глубокого понижения стали применять так называемое ступенчатое или ярусное понижение. Последний способ состоит в том, что после достигнутого предельного понижения 3—5 *м* производится отрывка осушенного грунта; по достижении отрывкой пониженного уровня грунтовых вод закладывается новая группа колодцев, которая присоединяется при помощи всасывающего трубопровода к установленному на дне котлована насосу, и понижение производится дальше. Обычно с введением в действие этой второй группы колодцев со своими отдельными насосами, расположенными на дне первой выемки, оборудование верхнего яруса не разбирается. а действует совместно со вторым ярусом или является резервом.

Судя по литературным источникам, впервые ярусное понижение было применено в 1892 г. инж. Ф. Принцем (E. Prinz) в Германии. В 1905 г. этот способ был широко использован при постройке и ремонте шлюзов в Фюрстенвальде (Германия).

В 1906 г. Ф. Принцем был описан способ так называемого продольноступенчатого понижения, примененный при постройке метрополитена на участке Зоологише Гартен — Круммерштрассе в Берлине.

Ярусный способ находит широкое применение и в настоящее время как при отрывке котлованов с откосами, так и с вертикальными стенками. Число ярусов может быть различным, смотря по глубине требуемого понижения. Известны случаи четырех-, пяти- и даже шестиярусных понижений.

Наряду с требованием больших глубин понижения часто предъявляется требование наибольшей компактности установки во избежание загромождения котлована большим количеством труб, задвижек, насосных установок и пр.

Применением глубинных насосов, устанавливаемых в глубоких колодцах и подающих воду по напорным трубопроводам, разрешен и этот вопрос.

Постепенное совершенствование конструкции такого рода насосов, начиная от давно известных и по многим причинам неудобных эрлифтов, штанговых поршневых и центробежных глубинных насосов с моторами на поверхности земли, привело в последние годы к типу так называемых Tauchmotorpumpe — погружаемых внутрь колодцев агрегатов, состоящих из центробежного насоса и электромотора трехфазного тока.

Впервые применение насосов с погружаемым мотором имело место при перестройке доков в Киле в 1926 г., а затем в 1926/27 г. — при перестройке здания государственной оперы в Берлине, в 1927/28 г. была применена большая, хорошо оборудованная установка глубинных насосов с погруженным мотором при постройке участка метрополитена вблизи умформерной станции Александерплац (Alexanderplatz) в Берлине. В последние годы способ ярусного понижения все более и более решительно вытесняется безъярусным с применением глубинных насосов.

В СССР после гражданской войны при небольшом еще развитии строительства способ понижения продолжал применяться, так же как и до империалистической войны, в редких, единичных случаях.

В 1922 г. понижение уровня грунтовых вод было применено при постройке опускным способом железобетонного водоприемного колодца диаметром в свету 3,7 *м* для Симоновской водокачки Московско-Казанской железной дороги в Москве. Вся установка состояла из 12 колодцев глубиной 16,75 *м* с внутренним диаметром 100 *мм* и наружным 254 *мм* (с обсыпкой песком и гравием), причем уровень грунтовой воды был понижен на 3,7 *м*, откачка воды производилась эжекторами, общий дебит всей установки не превышал 6 *л/сек*.

В 1923, затем в 1924 и наконец в 1925 гг. в Балахне вблизи г. Горького последовательно было осуществлено по проектам и под руководством проф. М. Е. Кнорре несколько установок понижения грунтовых вод: при постройке водохранилищной земляной плотины и бетонного водослива при ней, при прокладке закрытого водоподводящего канала длиною около 200 *м* и других сооружений для водоснабжения Горьковской ГРЭС. Глубина понижения, достигавшаяся этими установками, составляла от 3,5 до 5 *м*. Колодцы применялись обыкновенные трубчатые с сеткой, насосы — горизонтальные центробежные, присоединенные к общему всасывающему трубопроводу. Число колодцев каждой установки было 15—25.

В 1926 г. понижение уровня грунтовых вод проведено было в Ленинграде для отрывки котлована Василеостровской канализационной насосно-очистной станции, где однако колодцы были не трубчатые, а копаные деревянные.

В 1927 г. под руководством проф М. Е. Кнорре было применено понижение при постройке канализации на Купавинской текстильной фабрике под Москвой с глубиной понижения до 4 *м*.

За последние 5 лет искусственное понижение грунтовых вод стало широко развиваться в СССР.

С 1930 г. начало применять способ понижения грунтовых вод гособъединение Союзводстрой (б. трест Водоканалстрой), когда под руководством автора были проведены первые понизительные работы для постройки насосных канализационных станций в Перове и в Люберцах (под Москвой), причем глубина понижения достигала уже 8 *м*.

В 1931 г. при консультации автора то же объединение применило понижение в большом масштабе на водопроводно-канализационных работах автозавода им. Молотова вблизи г. Горького, а именно:

1. При постройке перекачивательной канализационной станции в виде опускного квадратного колодца 12×12 *м*^{2} при общей глубине 13,50 *м* от поверхности земли и 8,70 *м* от естественного уровня грунтовых вод. Понижение было выполнено посредством 16 трубчатых колодцев диаметром 150 *мм* и глубиною 14 *м*, причем по мере опускания колодца (вслед за понижением уровня грунтовых вод) трубчатые колодцы укорачивались сверху, и таким образом выполнялось ярусное понижение «в себе». Для откачки воды было установлено 4 центробежных насоса диаметром 100 *мм* и 4 таких же запасных, опускавшихся вместе с опускным колодцем. Общий наибольший дебит установки составлял около 70 *л/сек*.

2. При постройке в 80 *м* от р. Оки опускным способом водопроводной насосной станции первого подъема размерами в плане 20×16 *м*^{2} и глубиною дна от естественного уровня грунтовых вод 6,5 *м*. Здесь также было установлено 16 трубчатых колодцев глубиною 17 *м*, диаметром 150 *мм*. 8 центробежных насосов диаметром 100 *мм* и применен тот же прием «ярусов в себе», что и на первой.

3. При постройке части главного канализационного коллектора длиною около 200 *м* при глубине заложения максимум 10 *м* от поверхности земли.

В 1932 г. работы Союзводстроя значительно расширились (водопроводно-канализационные работы в Перми, Астрахани, Москве, Горьком, Дзержинске, Сормове, Ленинграде и др.). В 1933 г. Союзводстрой применил понижение в большом масштабе при постройке крупной водохранилищной плотины в Магнитогорске.

Целый ряд работ с понижением уровня грунтовых вод за период первой пятилетки произведен другими строительными организациями Советского союза, например трестом Индустрой в 1929—1930 гг. было применено понижение в г. Каменском (Украина) при постройке подземных угольных бункеров металлургического завода им. Дзержинского, где было установлено 90 колодцев диаметром 150 *мм* и глубиною 10 *м* в 3 яруса и достигнуто понижение свыше 7,5 *м* в котловане площадью 1350 $м^2$ при общем наибольшем дебите около 90 *л/сек*.

На Новомариупольском металлургическом заводе при постройке угольных бункеров и скипповых ям были применены двухъярусные установки с общей глубиной понижения до 8 *м* с числом колодцев от 15 до 30 в каждом ярусе.

В Подмосковном каменноугольном бассейне уже несколько лет применяется понижение уровня грунтовых вод как главное средство борьбы с плывунами при горноподземных работах.

В течение 1933—1934 гг. искусственное понижение уровня грунтовых вод в большом масштабе применялось при постройке первой очереди московского метрополитена. В настоящее время также в большом масштабе и в различных видах применяется понижение уровня грунтовых вод на нескольких объектах строительства канала Волга—Москва.

В очень крупном, еще небывалом у нас и за границей масштабе проектируется в настоящее время водопонижение для строительства Ярославской гидроэлектрической станции на р. Волге, для Пермской ГРЭС на р. Каме, для разработок Александрийского буроугольного месторождения в Днепропетровской области и др.

Вообще в настоящее время способ искусственного понижения грунтовых вод получил в СССР такое широкое развитие, что трудно перечислить даже крупные установки, не говоря уже о мелких, которые однако до первой пятилетки насчитывались единицами и считались необычными в нашей строительной практике.

Если 5 лет назад в СССР были только первые робкие попытки понижения уровня грунтовых вод, то теперь можно уже сказать, что этот способ занял прочное место в различных областях нашего глубинного строительства.

Нет и не может быть сомнения в том, что еще до окончания второй пятилетки искусственное понижение уровня грунтовых вод сделается в СССР одним из основных способов борьбы с грунтовыми водами во всех областях гидротехнического, горного, тоннельного и водопроводно-канализационного строительства, а также при устройстве глубоко заложенных фундаментов и оснований промышленных и прочих сооружений и зданий.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕОРИИ И ПРАКТИКЕ ПОНИЖЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Первые опыты практического применения шахтных и трубчатых колодцев для осушения грунта перед отрывкой выемок базировались на опыте добывания грунтовых вод из колодцев для водоснабжения.

Теория понижения уровня грунтовых вод, которая позволяла бы производить предварительные расчеты установок, появилась уже впоследствии, когда способ понижения стал применяться в широких размерах.

Первое обстоятельное изложение теории понижения дал В. Кирилейс (W. Kyrieleis) в своей диссертации «Über Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten», 1911 г.

Кирилейс сопоставил существовавшие основные положения о движении грунтовых вод с результатами произведенных на практике понижений, принял для дальнейших своих рассуждений те положения, которые оказались удовлетворительными для практики, и на основании их построил самостоятельную теорию понижения грунтовых вод.

Исходя из закона Дарси для фильтрации воды через песок, а также из подтверждения применимости этого закона для движения воды в естественных песчаных слоях, сделанного Дюпюи (Dupuit), Кирилейс нашел возможным воспользоваться формулами Дюпюи и А. Тима, выражающими явления движения грунтовой воды к шахтным и трубчатым колодцам.

На основании последних формул, а также выведенной Ф. Форхгеймером теоретической формулы, выражающей взаимодействие нескольких одновременно действующих соседних колодцев, Кирилейс разработал самостоятельную теорию и дал общие методы предварительного расчета установки понижения.

Показав на частном примере преимущество многоколодезной установки перед одноколодезной, Кирилейс дальнейшие теоретические выводы посвятил именно групповому расположению колодцев. Он дал уравнение для кругового расположения колодцев, для однорядного, двухрядного и прямоугольного расположения и предложил так называемый «метод подобия», позволяющий использовать опыт ранее произведенных понижений для проектирования новых установок.

Кирилейс затронул также вопросы о понижении грунтовых вод в особых условиях: вблизи открытых водоемов, в условиях напорных вод, в условиях грунтового потока и др.

В главе «Влияние проницаемости подпочвы» Кирилейс произвел краткий по изложению, но довольно широкий по охвату вопроса обзор тех разнообразных особенностей состава и строения водоносных слоев, которые часто в той или иной мере затрудняют как понижение уровня грунтовых вод, так и самые строительные глубинные работы.

Вторую часть своего труда Кирилейс посвятил тем предварительным изысканиям, которые признаются им совершенно необходимыми для проектирования и сооружения более или менее крупных установок понижения. Он изложил вкратце задачи геологических и гидрологических исследований и пробных понижений.

В 1917 г. появилась книга Е. Бергвальда (E. Bergwald) «Grundwasserabsenkung für Gründung von Bauwerken», содержащая описание главнейших моментов работ, связанных с понижением грунтовых вод, начиная с бурения колодцев и кончая установкой насосов и источников энергии.

Более подробно, чем это было сделано Кирилейсом, Бергвальд остановился на методике пробных понижений, причем дал описание некоторых приборов и приспособлений для разного рода наблюдений и измерений. В отношении расчетов Бергвальд ограничился только указанием общих положений теории понижения, выводимых из основного закона Дарси. Высказав далее ряд соображений о значении и объеме необходимых геогидрологических изысканий и дав описание ряда крупных работ с понижением, произведенных до 1917 г., Бергвальд завершил таким образом сводку того опыта, который имелся в то время в области устройства и эксплоатации установок понижения для глубинных строительных работ.

В 1918 г. вышла в свет работа М. Енцвейлера (M. Enzweiler) «Die Grundwasserabsenkungsmethode», посвященная специально понижению грунтовых вод при постройке подводных тоннелей в условиях берлинского грунта. В своих теоретических рассуждениях Енцвейлер исходил из того же закона Дарси-Дюпюи.

В 1924 г. И. Шульце (I. Schultze) опубликовал свой труд «Die Grundwasserabsenkung in Theorie und Praxis», содержавший довольно полное теоретическое освещение способа понижения грунтовых вод и критическое описание практических приемов устройства и эксплоатации установок понижения, которые применялись в то время в Германии.

В теоретической части, исходя из основных законов Дарси-Дюпюи, И. Шульце дал ряд аналитических выражений для тех ограничений и специальных требований понижения, которые в общих чертах уже были намечены Кирилейсом (предельный уклон, понижение под водоемами, влияние дождя и др.).

Не касаясь пока оценки предложенных формул, ниже приводим только общий обзор того нового, что было дано И. Шульце в описываемом труде.

И. Шульце впервые вывел аналитическое выражение для радиуса действия R одиночного колодца как функции продолжительности откачки; он ввел понятие о «производительности колодца» как о том предельном дебите, которого не следует превышать, и вывел аналитическое выражение для определения этой величины; он исследовал вопрос об изменениях пониженного уровня грунтовой воды при остановке и перерывах откачки и наконец предложил элементарный вывод уравнения для многоколодезной установки.

В практической части своего труда И. Шульце дал критическую оценку современных установок понижения в целом, а также отдельных деталей и высказал целый ряд практических указаний в области их эксплоатации.

Подобно Кирилейсу и Бергвальду И. Шульце подчеркнул огромное значение предварительных изысканий и пробных понижений и довольно подробно остановился на методике их.

В заключение в труде И. Шульце приведено несколько примеров исполненных понижений, при помощи которых он стремился доказать справедливость предложенных им выводов и формул.

В начале 1928 г. была опубликована диссертация В. Зихардта (W. Sichardt'a) «Das Fassungsvermogen von Brunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für grössere Absenkungstiefen». В этом труде описаны последние технические достижения в области понижения грунтовых вод при помощи глубинных насосов. В части теоретической новое заключается во введении понятия «захватной способности» взамен «производительности колодца» И. Шульце. Подобно всем своим предшественникам, работавшим в области теории понижения, Зихардт решительно стал на сторону закона Дарси-Дюпюи. Исходя из закона Дарси и принимая выводы Кирилейса и Шульце, В. Зихардт развил расчетные формулы понижения, в которые им была включена ограничивающая величина «захватной способности».

В начале 1930 г. впервые на русском языке вышла литографированная книга И. П. Кусакина «Искусственное понижение уровня грунтовых вод», в которой изложены основные вопросы теории и практики понижения уровня грунтовых вод, произведен практический обзор известных методов определения основных расчетных величин и в частности радиуса действия установки, для определения которого предложена эмпирическая формула, изложены некоторые положения автора по методике предварительных изысканий и исследований и дано сжатое изложение хода расчета установки понижения.

В конце 1930 г. появилась книга Кирилейса в переработке и с дополнениями В. Зихардта «Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten» [1].

В этой книге Зихардт поместил помимо основного содержания книги Кирилейса 1911—1913 гг. и своей книги «Das Fassungsvermögen» выдержки из статей своих и других германских авторов, касающихся главным образом применения и свойств различных глубинных насосов.

Из этой книги особенно отчетливо видно, какой серьезный переворот в практике глубокого понижения уровня грунтовых вод произвело появление глубинных насосов с погружаемым под воду мотором.

Литература по понижению уровня грунтовых вод не исчерпывается только упомянутыми выше трудами. Имеется много журнальных статей, содержащих главным образом описания произведенных работ с понижением, а также трудов, посвященных тем или иным отдельным теоретическим и практическим вопросам понижения. Упомянутые выше труды приведены здесь с целью показать, в каком положении мы застаем теорию и практику понижения грунтовых вод в настоящее время.

Резюмировать это состояние можно следующим образом:

1. В основе существующей теории понижения грунтовых вод лежит закон Дарси-Дюпюи, выражающийся в том, что при движении грунтовых вод средняя скорость этого движения пропорциональна первой степени потери напора на единице длины пути (гидравлическому уклону).

2. В выражениях аналитических зависимостей между искусственно достигаемыми при понижении величинами (количество подлежащей откачке воды, глубина понижения уровня, диаметр, глубина и взаимное расстояние между колодцами) и величинами, характеризующими природные условия (водопроницаемость грунта, мощность водоносного слоя, расстояние строительного участка от ближайшего водоема), введены ограничения, вызываемые специальными требованиями понижения. Таким образом созданы расчетные формулы, которые в большей или меньшей мере удовлетворяют запросам практики.

3. В области предварительных изысканий признается необходимость геологических и гидрологических исследований и пробных понижений, а для производства последних имеется ряд методических указаний.

4. В области технического выполнения найдены способы достижения любых, имеющих практическое значение, глубин понижения. Неудобства многоярусных установок могут быть устранены путем применения глубинных погруженных насосов.

---

[1] В русском переводе: В. Кирилейс Искусственное понижение уровня грунтовых вод, Госстройиздат, М. 1933.

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СОВРЕМЕННЫХ УСТАНОВОК ПОНИЖЕНИЯ

§ 1. КОЛОДЦЫ

Одной из самых существенных частей установки понижения является колодец. Обычно применяемая конструкция понизительного колодца состоит из остова, представляющего собою железную черную или оцинкованную сварную трубу с внутренним диаметром 150 *мм* и более. Цилиндрическая поверхность трубы снабжена круглыми или щелевидными отверстиями, располагаемыми в шахматном порядке.

Если устье колодца находится выше уровня грунтовой воды на несколько метров, то снабженная отверстиями труба имеет обыкновенно длину, не превышающую высоты водоносного слоя над подошвой колодца, а над ней устанавливается глухая «наставная» труба. Нижний конец остова колодца закрывается обыкновенно деревянной или металлической пробкой, снабженной проушиной для зацепления крюка при вытаскивании.

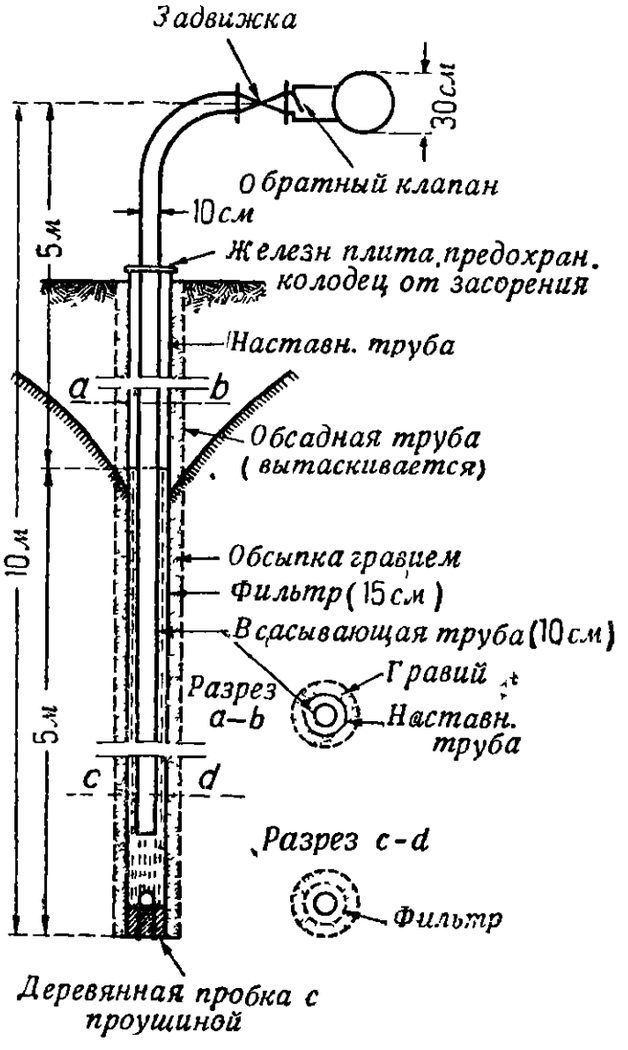


Рис. 1

Снаружи остов обтягивается грубой сеткой или толстой проволокой (3 *мм*), на которую затем натягивается и припаивается фильтрационная ткань (рис. 1). Наиболее употребительна так называемая галунная фильтрационная ткань, представляющая металлическую сетку, частота которой зависит от размеров частиц грунта и обозначается номерами, совпадающими с числом проволок основы, приходящихся на 1 пог. дюйм (рис. 2, *а*). Между основными проволоками протянуты в перпендикулярном направлении тесно прижатые друг к другу проволоки утка.

Кроме галунной ткани существуют еще простая (квадратная) и киперная ткани. Простая ткань (рис. 2, *б*) состоит из переескающихся под прямым

углом проволок и применяется большею частью при грубых песках или гравии или же в качестве подкладки под тонкую ткань.

У киперной ткани каждая проволока огибает сразу две перпендикулярные ей проволоки так, что получается плетение «в елку» (рис. 2, *в*).

Киперная ткань различается и обозначается по толщине проволок и размерам отверстий, простая тоже различается по толщине проволок, но еще обозначается и номерами, обозначающими количество отверстий, приходящихся на 1 пог. дюйм сетки.

И. Шульце рекомендует во избежание порчи тонкой фильтрационной ткани накладывать сверх нее грубую сетку или обматывать спиральной проволокой, но обыкновенно это в практике понижения не применяется, так как сопряжено с удорожанием колодцев и не достигает желаемой цели.

По материалу наилучшая сетка — медная как обладающая наибольшей стойкостью против агрессивных химических соединений в грунтовой воде; из экономии иногда применяется железная оцинкованная сетка, но продолжительность ее службы ограничена (от 2 до 6 месяцев, а при особо кислотных водах и меньше).

Последствия употребления ненадежного фильтра могут оказаться очень тяжелыми: мелкий песок, который должен удерживаться тканью, при раз-

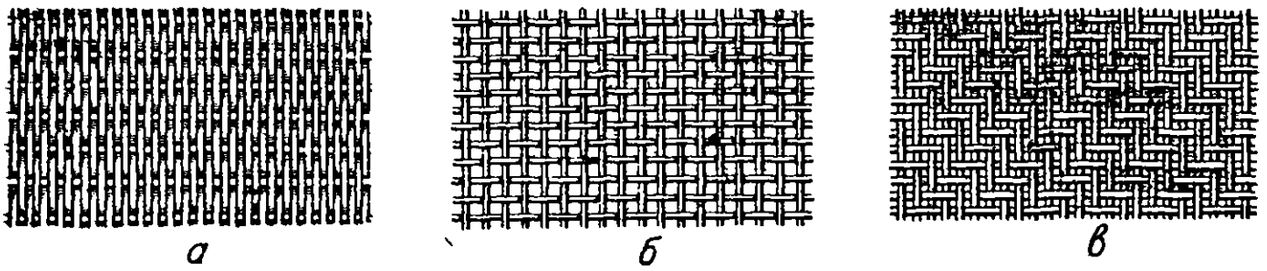


Рис. 2

рушении последней проникает внутрь колодца, вокруг которого создается разрыхление грунта. Это может послужить причиной подмывания почвы и образования трещин в соседних зданиях и сооружениях.

Часто применяемая латунная сетка в отношении кислот менее устойчива, чем медная. Для того чтобы и медная сетка не окислялась, она иногда также оцинковывается. Особенно практична, стойка и не поддается ржавлению сетка из фосфористой бронзы. Так как от частоты сетки зависят как производительность, так и продолжительность действия колодца, то на подбор подходящей ткани надо обращать особое внимание

Помимо кислот представляют для колодца опасность растворенные в грунтовой воде химические соединения, переходящие при тесном контакте с воздухом в нерастворимые, из них особенно неприятны соединения железа и извести. Осаждение на поверхности ткани нерастворимого гидрата окиси железа и углекислой извести способствует закупориванию ткани и вызывает с течением времени все возрастающие сопротивления колодца, так что при известных обстоятельствах приток воды в колодец может совершенно прекратиться. К подобным же результатам приводит содержание в грунте глинистых, органических и илистых частиц. В таком случае прибегают к обсыпке колодца снаружи кольцевым слоем гравия, а вместо мелкой галунной сетки применяют более крупную киперную или простую сетку, которая служит для удерживания гравия Правильнее было бы для возможно длительного действия колодца делать обсыпку несколькими концентрическими слоями, но для этого должен быть значительно увеличен диаметр буровой скважины, а для производства засыпки должны употребляться особые вспомогательные трубы из листового железа или жести, что ведет к удорожанию установки. Если подобное мероприятие можно применить

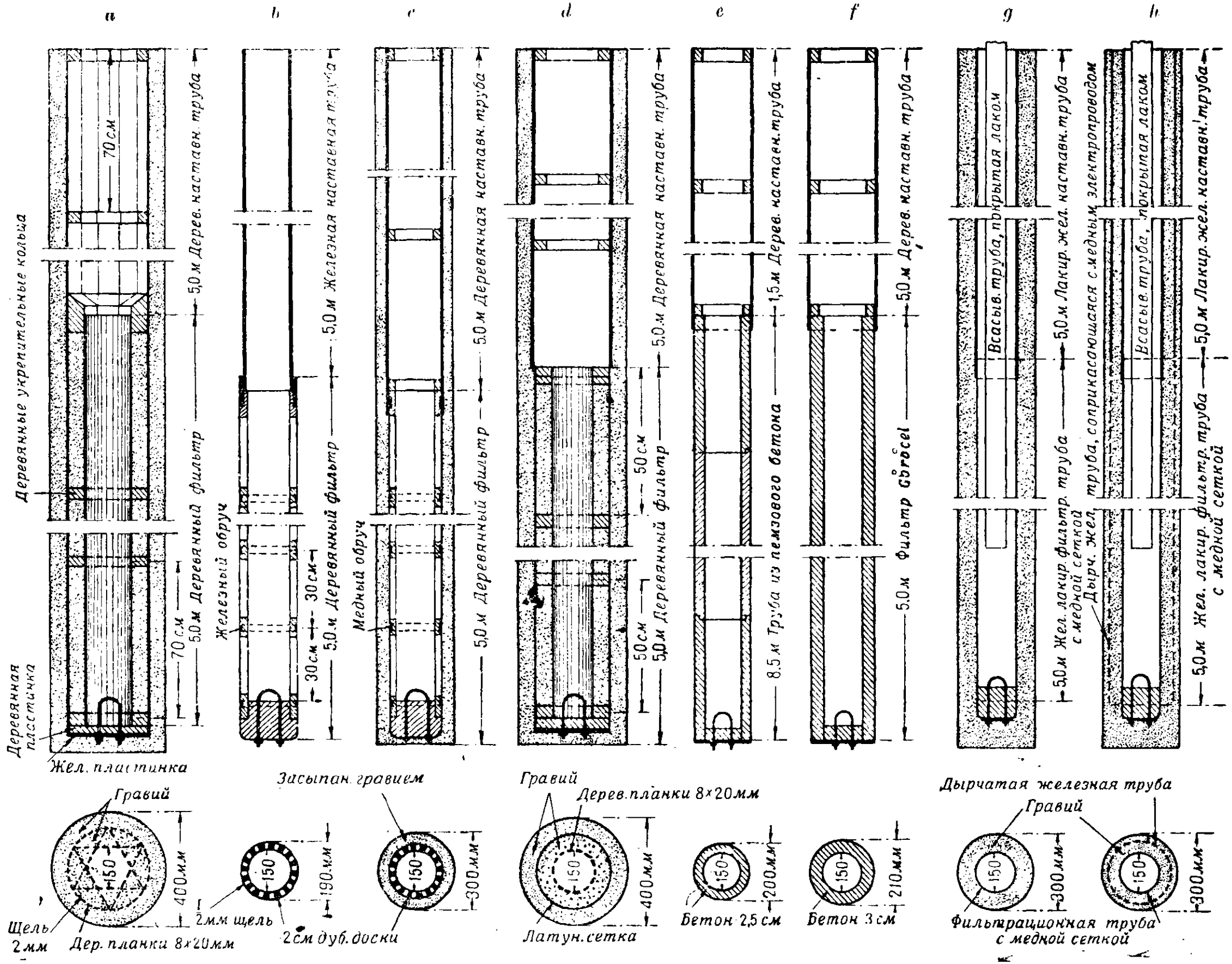

а
б
в
г
е
ж
з
Деревянные укрепительные кольца
70 см
5,0 м Дерев. наставн. труба
Деревянный фильтр
70 см
5,0 м Деревянный фильтр
Деревянная пластинка
Жел. пластинка
Железный обруч
5,0 м Железная наставная труба
30 см
30 см
5,0 м Деревянный фильтр
Медный обруч
5,0 м Деревянная наставн. труба
Деревянный фильтр
50 см
5,0 м Деревянная наставн. труба
50 см
5,0 м Деревянный фильтр
1,5 м Дерев. наставн. труба
из пемзового бетона
5,0 м Дерев. наставн. труба
Фильтр Gabriel
Всасыв. труба, покрытая лаком
5,0 м Жел. лакир. фильтр. труба, соприкасающаяся с медным электропроводом
5,0 м Лакир. жел. наставн. труба
Всасыв. труба, покрытая лаком
Дырч. жел. труба
5,0 м Жел. лакир. фильтр. труба
с медной сеткой
5,0 м Лакир. жел. наставн. труба
Гравий
400 мм
150
Щель 2 мм
Дер. планки 8×20 мм
Засыпан. гравием
190 мм
2 мм щель
2 см дуб. доски
300 мм
Гравий
Дерев. планки 8×20 мм
400 мм
Латун. сетка
200 мм
Бетон 2,5 см
210 мм
Бетон 3 см
Дырчатая железная труба
Гравий
300 мм
Фильтрационная труба с медной сеткой
300 мм

Рис. 3

для колодцев постоянного действия (водоснабжение, вертикальный постоянный дренаж), то для временного понижения это было бы очень невыгодно. Если, как иногда рекомендуется, применить 3 слоя, то при внутреннем диаметре колодца 150 *мм* (6″) и минимальной толщине слоя засыпки 50 *мм* наружный диаметр скважины составит:

$$150 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 2 \cdot 50 = 460 \text{ мм } (18″).$$

Из этого видно, что стоимость колодцев и всей установки должна значительно увеличиться. Поэтому для колодцев установок понижения более приемлемым представляется засыпка одним слоем мелкого гравия или крупного и чистого строительного песка.

Применение железных (даже оцинкованных) труб в качестве остова колодца при наличии в грунтовой воде кислот представляется также не всегда надежным. Асфальтировка труб не дает полной гарантии, потому что она легко повреждается как при установке, так и при эксплоатации колодцев. Наиболее устойчивый материал — медь, но в силу дороговизны ее нельзя рекомендовать для колодцев понижения. Чугун значительно более устойчив, чем железо, а поэтому для колодцев продолжительного действия (водоснабжение) он нашел широкое применение.

Но в понизительных установках, где колодцы должны сделать до полной их амортизации значительное число оборотов, чугунные фильтрационные трубы, чувствительные к толчкам и ударам и более толстые и тяжелые, обычно не находят применения То же подавно относится к керамиковым трубам, хотя и являющимся кислотоупорными.

Что же касается деревянных фильтров, то они при известных условиях заслуживают большого внимания, причем не только в связи с кислотностью воды, но и в связи с их легкостью и простотой устройства, исключающей обязательное употребление проволочных тканей.

При постройке больших шлюзов в Везермюнде (Германия) были произведены испытания фильтров различной конструкции, так как местные условия были довольно неблагоприятны по кислотности воды, по содержанию солей железа и извести, а также по присутствию глинистых тонких прослойков, способствовавших загрязнению обыкновенных фильтрационных колодцев.

На рис. 3 представлены продольные и поперечные разрезы колодцев восьми различных систем, которые там были испытаны помимо обыкновенных железных колец с медной галунной сеткой без обсыпки.

a) Колодец самодельный деревянный. Он состоял из двух фильтров, расположенных один внутри другого, с засыпкой гравием кольцевого зазора между ними. Каждый фильтр составлялся из еловых дощечек шириной 20 *мм* и толщиной 8 *мм* со щелями между ними шириной 2 *мм* Оба фильтра были собраны на деревянных кольцевых кобылках, расположенных на взаимном расстоянии 70 *см*. Дощечки прибивались к кобылкам железными гвоздями. Наставная труба, т. е. та часть колодца, которая не предназначена для фильтрации воды, была составлена из одного ряда дощечек, прибитых снаружи к деревянным кольцам-кобылкам По установке такого колодца в скважину $d = 400$ *мм* образованный между его поверхностью и обсадной трубой кольцевой зазор также был засыпан гравием.

b) Колодец системы Бюге (Buge) и Гейльмана (Heilmann), состоящий из дубовых дощечек толщиною 2 *см* со щелями, расширяющимися внутрь (на наружной поверхности ширина щели равна 0,5 *мм*); дощечки через каждые 30 *см* по длине связаны железными обручами; наставная труба железная; диаметр скважины 200 *мм*.

c) Тот же колодец, но с медными кольцами, обтянутый медной сеткой,

с деревянной наставной трубой и наружной обсыпкой гравием; диаметр скважины 300 *мм*.

d) Деревянный колодец системы Больмана, состоящий из цилиндрического сердечника, составленного из деревянных дощечек 20 × 8 *мм*, прибитых к деревянным кольцам; снаружи сердечник обтянут латунной сеткой с отверстиями в 3 *мм*; кольцевой зазор между сердечником и сеткой заполнен гравием; снаружи также применена обсыпка гравием; диаметр скважины 400 *мм*; наставная труба деревянная.

e) Колодец, образованный трубами из пемзового бетона толщиною 2,5 *см* с деревянной наставной трубой; установлен без всякой обсыпки; диаметр скважины 225 *мм*.

f) Из кизельгурового бетона (системы Gorocel) толщиною 3 *см*; деревянная наставная труба; установлен без обсыпки; диаметр скважины 225 *мм*

g) Обыкновенный трубчатый колодец, но железная фильтровая труба покрыта лаком; сетка медная, снаружи обсыпка гравием; диаметр скважины 300 *мм*.

h) Обыкновенный трубчатый колодец, состоящий из покрытого асфальтовым лаком сердечника и медной сетки; снаружи была установлена еще железная труба с отверстиями и промежуток заполнен мелким гравием; поверх этой трубы был проложен медный провод, по которому во время действия колодца пропускался электрический ток напряжения 1 *в*.

Все колодцы имели внутренний диаметр 150 *мм*, глубину 10 *м*, длину фильтрационной поверхности 5 *м* (кроме колодца «e», который имел фильтр длиной 8,5 *м*).

Колодцы были в работе до одного года, причем результаты оказались следующие.

В отношении з а к у п о р к и ф и л ь т р а, т. е. увеличения сопротивления и уменьшения производительности колодцев, наиболее хорошие результаты дали колодцы с деревянным фильтром и гравийной обсыпкой («a» и «c»). Если наибольшая производительность обыкновенного нового колодца с внутренним диаметром 150 *мм* была 13 *л/сек*, то колодец «a» через один год имел производительность только на 23% меньше максимальной при сопротивлении колодца 3,9 *м*. Колодец «c» через 11 месяцев обнаружил производительность 47% максимальной при сопротивлении 2,8 *м*.

Если обратиться к приведенному на рис. 4 графику, составленному по результатам специально производившихся наблюдений над обыкновенными колодцами, то легко видеть, что обыкновенные колодцы (с железным сердечником, медной сеткой и без обсыпки) обнаруживали с течением времени быстрое возрастание сопротивления при одном и том дебите. Если старая сетка № 8 через две недели работы при дебите 2,5 *л/сек* обнаруживала сопротивление 0,6 *м*, то через 1,5 месяца при том же дебите она имела сопротивление, равное 2,4 *м*.

Если старая сетка № 8 через две недели давала наибольшую производительность колодца 13 *л/сек*, то через 9 месяцев новая давала только 3 *л/сек*. Здесь, конечно, невозможно установить какую-либо точную зависимость между продолжительностью действия и сопротивлением, между продолжительностью действия и производительностью, а равно между дебитом и сопротивлением для одного и того же колодца; для этого, во-первых, очень мало данных, во-вторых, здесь играют первостепенную роль местные природные и искусственные чрезвычайно разнообразные и не поддающиеся учету условия.

Из сопоставления полученных при этом опыте данных представляется однако возможным установить следующее:

1) чем дольше обыкновенный колодец работает в условиях, обнару-

живающих наличие и возможность образования закупоривающих колодец веществ, тем больше становится его сопротивление для одного и того же дебита и тем меньше становится его производительность,

2) для одного и того же колодца с увеличением дебита увеличивается его сопротивление

В Везермюнде обыкновенный колодец через 12 месяцев работы имел настолько малую производительность, что невозможно было судить об изменении его сопротивления с возрастанием дебита

На рис. 4 построена аналогичная кривая для самодельного деревянного колодца с обсыпкой Из этой кривой видно также возрастание сопротивления с возрастанием дебита, но при одинаковом дебите его сопротивление заметно меньше сопротивления обыкновенного колодца, бывшего в эксплоатации в течение более короткого промежутка времени.

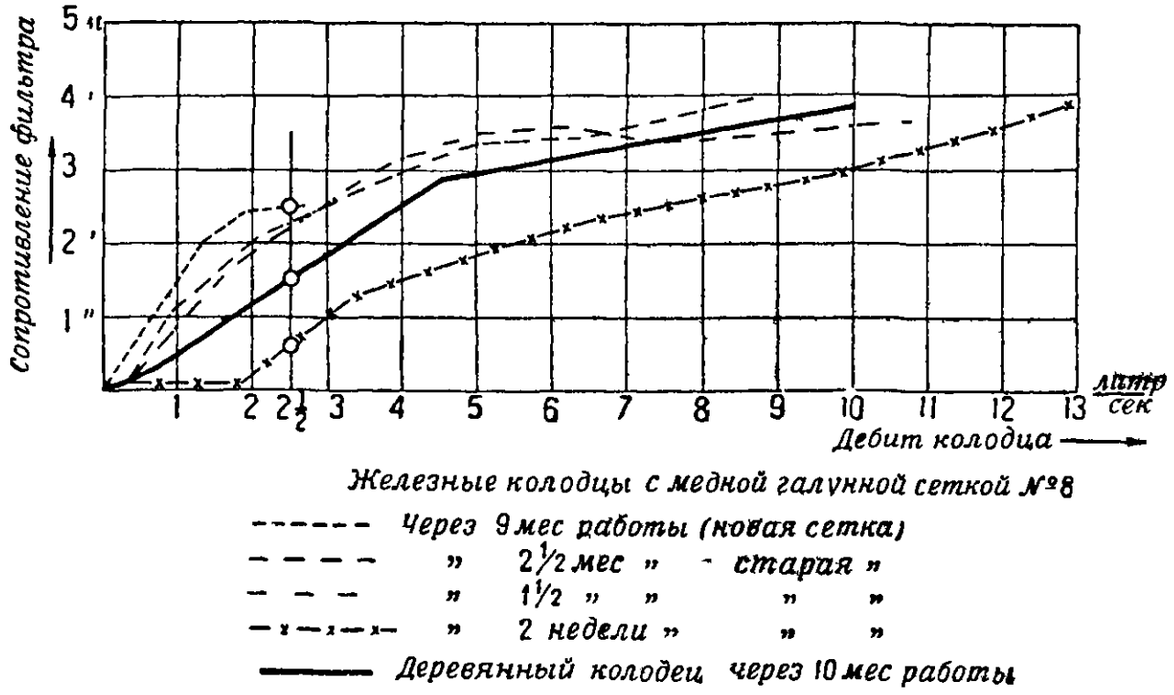


Рис. 4

Так как при понижении уровня грунтовых вод не должен допускаться чрезмерный дебит колодца, ведущий к чрезмерному повышению сопротивления то сравнение различных систем колодцев (в смысле их понижающего эффекта) лучше может быть сделано при нормальных средних нагрузках В установке понижения в Везермюнде средняя производительность каждого колодца была 2,5 *л/сек*. При этой нагрузке деревянный колодец после 10 месяцев беспрерывной работы обнаруживал меньшее сопротивление, чем обыкновенные железные колодцы с медной сеткой после 1,5 и 2,5 месяцев работы

Обратившись далее к явлениям химического действия кислото-содержащих вод на элементы колодцев, приходится считаться с следующими явлениями, обнаруженными при тех же работах в Везермюнде

Колодцы *b* и *e* (рис 3) были вынуты после почти годовой работы в безупречном состоянии несмотря на то, что они не имели никакой обсыпки, не было обнаружено никакого их засорения, разбухания деревянного колодца также не обнаружено Только железные кольца были отчасти разрушены Последний недостаток можно было бы устранить применением медных или латунных колец.

Колодец *a* (рис 3) при вытаскивании рассыпался, так как железные гвозди, которыми были прибиты дощечки, проржавели и разрушились. Остальные колодцы совсем не удалось вытащить

Особенно хорошие результаты при кислотных водах и при содержании в них закупоривающих примесей дали деревянные фильтры.

В Везермюнде грунтовые воды содержали SO_3 — 360 *мг/л*, т. е. 0,036%; содержание окиси железа достигало 29 *мг/л*, или 0,003%.

В результате полугодовой работы части обыкновенного железного колодца с медной сеткой были извлечены в таком состоянии, как изображено на рис. 5. Сетчатая ткань и железный остов колодца были приведены в полную негодность. Зазор между сеткой и остовом был заполнен черным илом, переходящим на поверхности трубы в ко-

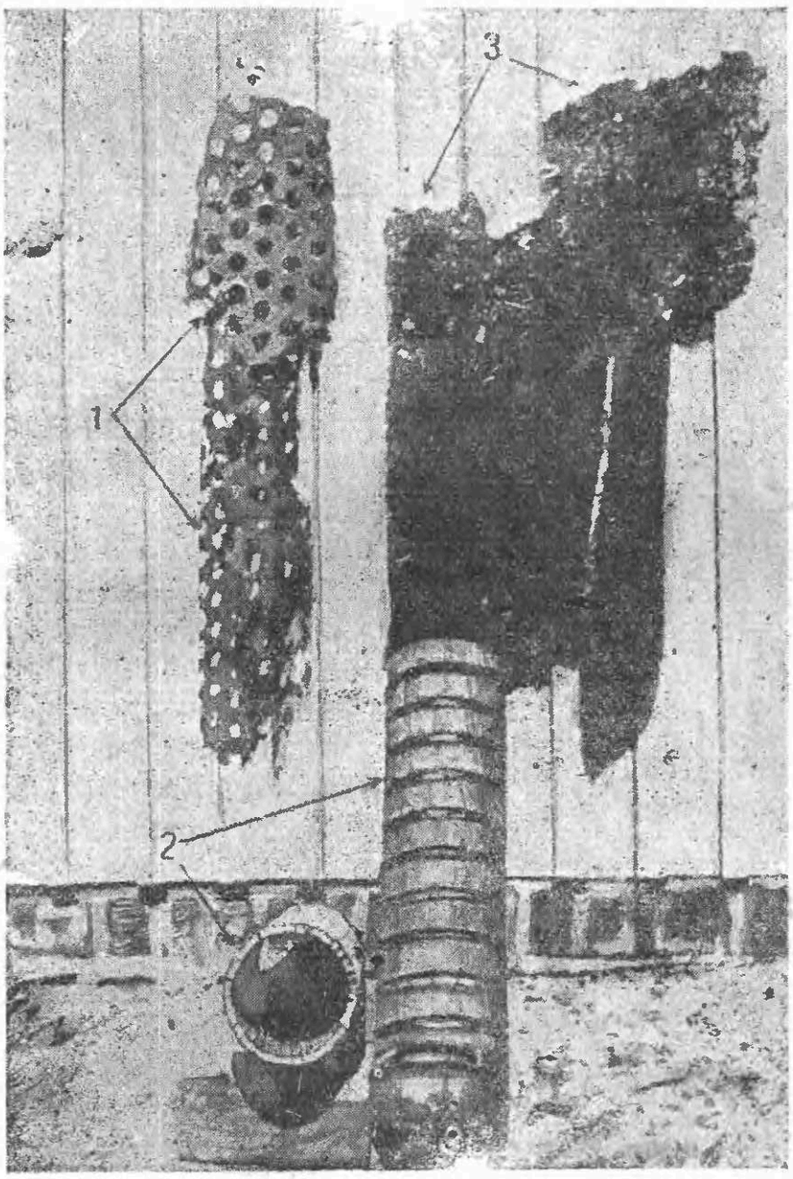


Рис. 5

1. Остов колодца. *2.* Деревянный колодец. *3.* Фильтрационная ткань.

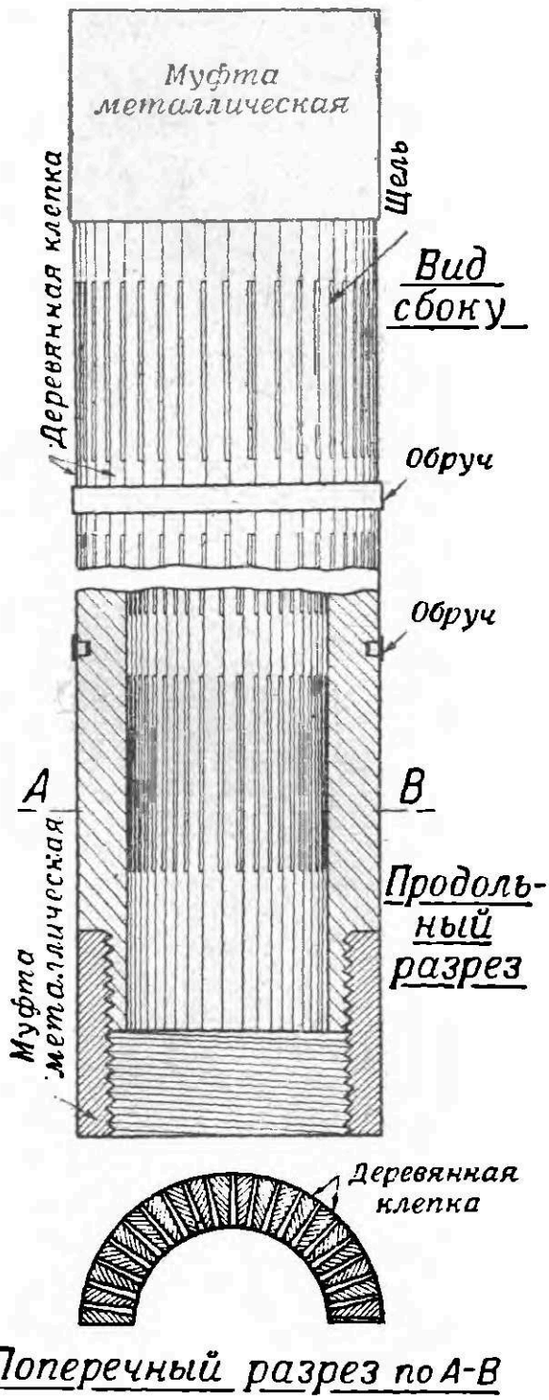


Рис. 6

ричневый. Сетка превратилась в почти совершенно непроницаемый плотный материал. Между тем деревянный фильтр был почти совершенно невредим и чист, если не считать разрушенных железных колец.

Отсюда видно, что в тех случаях, когда воды кислотны и когда имеется опасность засорения сетки, применение деревянного колодца со щелями является целесообразным.

Как фильтрационная, так и наставная части деревянного колодца составляются из отдельных звеньев от 1 до 4 *м* длиной. Каждое из звеньев имеет на концах винтовую нарезку. Соединение звеньев производится при помощи нарезных муфт. Звенья деревянных фильтров имеют на одном

конце насадку с наружной нарезкой, на другом — металлическую же муфту с внутренней нарезкой, при помощи которых и производится соединение звеньев (рис. 6).

Для большей выносливости целесообразнее было бы применение для этих насадок нержавеющего металла (медь, алюминий) или нержавеющих сплавов.

Если в добавление к вышеуказанному учесть бо́льшую выносливость деревянных трубчатых колодцев при перевозках и возможность изготовления на месте работ, то применение их во многих случаях может оказаться весьма целесообразным.

Деревянные фильтры нашли широкое применение при производстве искусственного понижения уровня грунтовых вод для постройки московского метрополитена.

Всякого рода бетонные фильтры тяжелы и малопроизводительны, а потому едва ли могут иметь широкое применение при понижении. Если существует много всяких систем бетонных колодцев для водоснабжения, то там дело идет о стационарных устройствах и применяются обыкновенно бо́льшие диаметры, чем это требуется для понижения. Известно много удачных конструкций бетонных колодцев, но они большею часть так дороги, что применение их в практике понижения грунтовых вод едва ли может иметь место.

Как особая разновидность фильтров без сетки в условиях мелкозернистых грунтов заслуживают внимания разного рода корзиночные фильтры. Один из фильтров такого рода, а именно корзиночный фильтр-колодец системы Гемпель (Hempel), представлен на рис. 7.

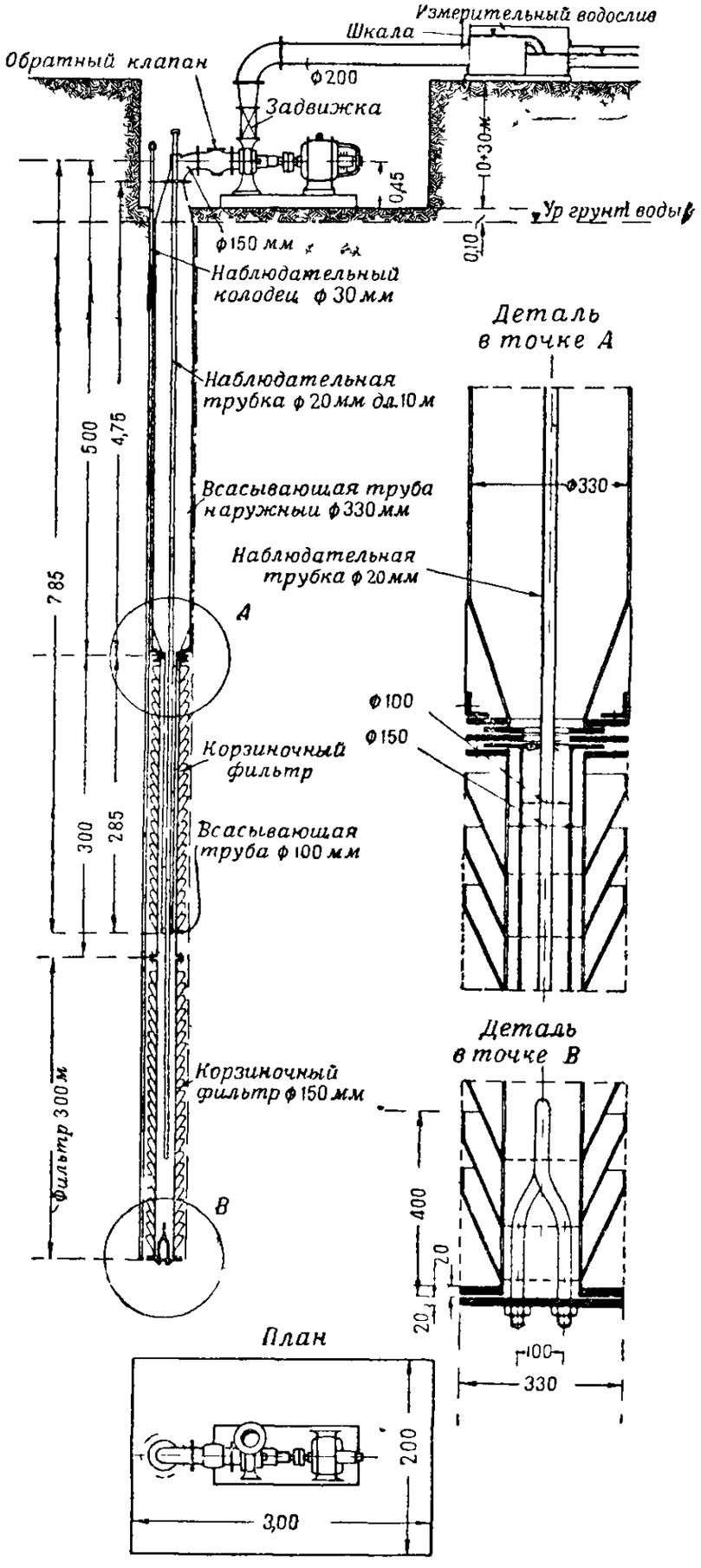


Рис 7

Колодец составляется из отдельных звеньев длиной 3 *м*, соединяемых друг с другом посредством фланцев.

К фланцу самого нижнего звена прибалчивается глухой фланец

с кольцом, за которое зацепляется крюк троса для вытаскивания фильтра из скважины. Каждое звено состоит из дырчатого сердечника диаметром в свету 150 *мм* с расположенными на нем одна над другой корзинками или карманами в виде расширяющихся вверх конусов с верхним диаметром 330 *мм*. До опускания фильтра в скважину, диаметр которой равен 400—420 *мм*, корзинки заполняются просеянным гравием или песком. После установки фильтра в скважину кольцевой зазор между обсадной трубой и фильтром заполняется постепенно песком и по мере этого заполнения поднимаются обсадные трубы.

Преимущества корзиночных фильтров заключаются в возможности произвести обсыпку с правильной сортировкой обсыпочного материала, а следовательно корзиночные фильтры имеют бо́льшую производительность и меньшее сопротивление по сравнению с колодцами с обыкновенной обсыпкой зазора между обсадной трубой и фильтром. В настоящее время известно большое число различных систем корзиночных фильтров, изготовляемых из различных материалов: чугуна, железа, бронзы, а также цементных и керамиковых.

К недостаткам корзиночных фильтров следует отнести сравнительно большую их стоимость, некоторую кропотливость в установке, связанную с заполнением многочисленных корзин гравием или песком, а также затруднительность вытаскивания.

Ввиду этого корзиночные фильтры больше имеют применение в стационарных установках для водоснабжения и только в последние годы начинают проникать в практику понижения уровня грунтовых вод.

Главнейшими факторами, обусловливающими неудовлетворительную работу обыкновенных трубчатых железных колодцев с медной сеткой, являются:

1. Присутствие в грунте большого количества глинистых и илистых частиц, обволакивающих сетку и делающих ее малопроницаемой для воды.

2. Присутствие в грунтовой воде солей железа (в частности закисных углекислых солей), которые в присутствии воздуха (при проходе воды из грунта внутрь колодца) образуют гидрат окиси железа, хлопья которого обволакивают сетку и отлагаются в кольцевом зазоре между сеткой и железным остовом и также в большей или меньшей степени уменьшают водопроницаемость фильтра.

3. Присутствие в грунтовой воде растворимых карбонатов, которые при соединении с углекислотой воздуха образуют нерастворимую углекислую известь, закупоривающую отверстия фильтра.

При наличии подобных факторов желательно применение бессетчатых фильтров. Однако и обыкновенные фильтры (даже и в вышеуказанных условиях) вполне могут применяться при соблюдении некоторых требований к их установке и эксплоатации.

К числу таких требований следует в первую очередь отнести следующие:

1. При очень мелкозернистых и глинистых грунтах устройство одно- или двухслойной обсыпки.

2. Умеренный водоотлив, т. е. откачка из колодцев такого количества воды, при котором скорости при проходе через фильтр не получались бы слишком большими, вымывающими из грунта большое количество мелких частиц.

3. Равномерная откачка воды, при которой устраняются значительные колебания уровня воды в колодце и усиленное омывание стенок фильтра воздухом, в присутствии которого растворенные соли переходят в нерастворимые, отлагающиеся на фильтре.

Если же в грунте не имеется большого количества глинистых частиц

или вышеуказанных соединений железа и карбонатов, то обыкновенные колодцы могут употребляться с достаточной степенью надежности действия.

Совершенно особо следует относиться к таким явлениям, как присутствие в воде серы, сероводорода, хлора и свободных кислот, агрессивно действующих на железо.

В этих случаях надо стремиться к применению колодцев из материалов, не разрушаемых этими агрессивными примесями (преимущественно из дерева).

1. Установка колодцев

Установка колодца начинается с бурения скважины и закрепления стенок ее обсадными трубами. Если колодец предположено ставить без обсыпки гравием, то внутренний диаметр обсадных труб берется на 50—100 *мм* больше наружного диаметра фильтра.

Когда скважина пробурена на требуемую глубину, в нее опускается фильтр. Если нужна засыпка, то после установки фильтра в зазор между ним и обсадной трубой засыпается гравий или песок, и по мере наполнения скважины обсадные трубы постепенно вытаскиваются. После извлечения всей колонны обсадных труб на наставную трубу фильтра навинчивается патрубок и в колодец опускается всасывающая труба или глубинный насос.

2. Установка колодцев без предварительного бурения

Бурение скважин для установки в них фильтров представляет самую трудоемкую и продолжительную работу по оборудованию установок понижения уровня грунтовых вод. С целью ускорения и удешевления работ по понижению уровня грунтовых вод весьма желательно применять при благоприятных условиях установку колодцев без предварительного бурения скважин. При малых глубинах и малом диаметре колодца можно применять забивные колодцы типа Нортон, но при глубинах более 5 *м* и диаметре колодца от 150 *мм* и более этот способ становится затруднительным.

Начиная с 1931 г., госстройобъединение Союзводстрой применяет установку фильтров диаметром от 150 до 200 *мм* и глубиной до 20 *м* в песчаных грунтах посредством струи воды, нагнетаемой под напором 2—6 *ат* в количестве 10—20 *л/сек* со скоростью 10—15 *м/сек* под нижний конец устанавливаемого фильтра.

На рис. 8 схематически представлено приспособление, примененное Союзводстроем в 1931 г. при понижении уровня грунтовых вод на автозаводе им. Молотова в г. Горьком. К обыкновенному фильтру диаметром 150 *мм* снизу присоединяется при помощи винтовой муфты железный наконечник с фрезером. Между этим наконечником и фильтром зажато железное упорное кольцо с кольцевым желобком на верхней поверхности.

На это упорное кольцо устанавливается разбортованным концом железная выбросная труба диаметром 75—100 *мм* и плотно прижимается при помощи прижимного хомута и двух крючьев, закладываемых в круглые отверстия в стенках наставной трубы.

Верхний конец этой трубы при помощи разбортованной переходной шейки приварен к трубе диаметром 200 *мм* с открытым верхним концом. В выбросную трубу, установленную на опорное кольцо и закрепленную прижимным хомутом, опускается нагнетательная труба диаметром 30—50 *мм* с открытым нижним концом и с коленом на верхнем для присоединения к нагнетательному шлангу от насоса или водопроводного крана. Нижний конец этой нагнетательной трубы во время опускания колодца проходит

через отверстие опорного кольца и держится на 15—30 *см* ниже фрезера. На верхний конец нагнетательной трубы надевается обыкновенный буровой поворотный хомут, при помощи которого буровой мастер управляет трубою при опускании колодца.

Когда наконечник фильтра установлен на место в предварительно сделанную неглубокую скважину, по нагнетательной трубе пускают струю воды из водопровода или от многоступенчатого центробежного насоса. Эта струя ударяет в грунт ниже фрезера наконечника, образуя местное разрыхление — воронку размыва, в которую опускается под действием собственного веса весь колодец. Сначала бывает достаточно собственного веса для опускания колодца, но по мере увеличения глубины посадки приходится колодец поворачивать. как при посадке обсадных труб, чтобы к размывающей работе воды прибавить режущую работу фрезера и не допустить зажатия грунтом боковой поверхности колодца. При проходке глинистых прослойков такое вращение колодца особенно необходимо, равно как иногда и дополнительная нагрузка, хотя бы в виде веса рабочих, производящих установку колодца.

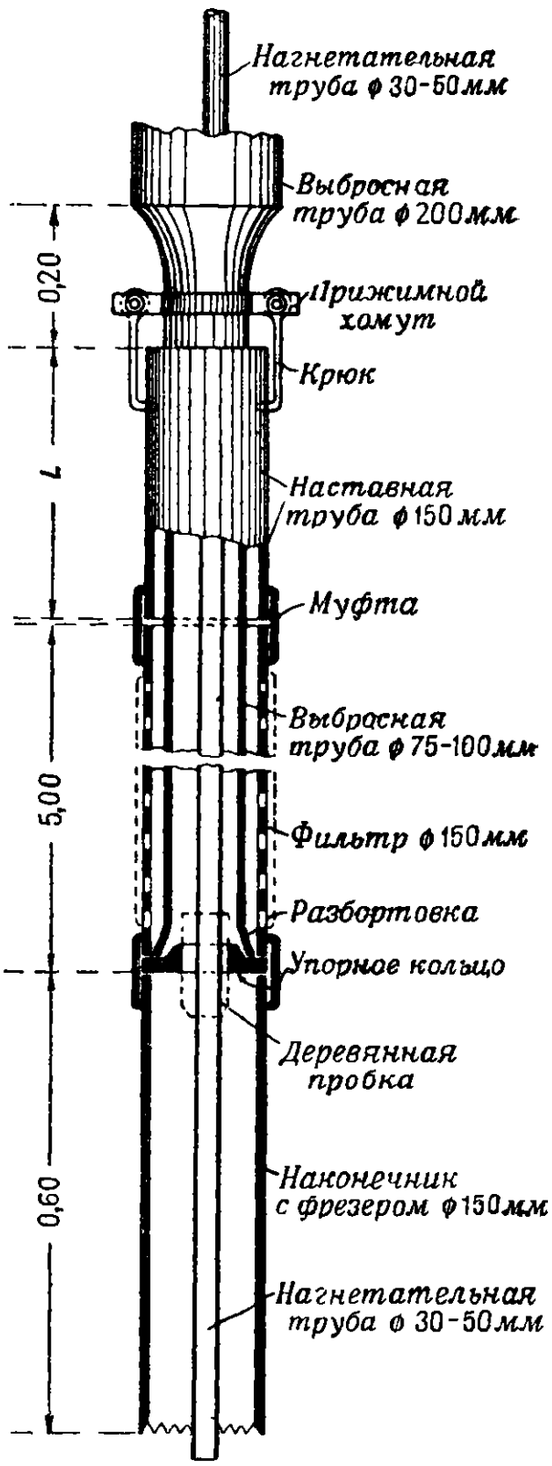


Рис. 8

Если зажатие грунтом столь велико, что трудно поворачивать фильтр и он не опускается, то бывает полезным приподнимание его и затем немедленное опускание. Повторением этих операций несколько раз с одновременным вращением фильтра в большинстве случаев удается преодолеть зажим грунта и продолжать опускание колодца дальше Если же и этот прием не помогает, то приходится рядом с колодцем загонять в грунт гидравлическим способом трубу диаметром 25—37 *мм* и нагнетать через нее воду с одновременным поворачиванием, приподниманием и опусканием колодца.

Подобные затруднения обыкновенно могут появляться после остановки нагнетания воды для наращивания нового звена колодца. Поэтому следует стремиться так организовать работу, чтобы перерыв нагнетания воды был возможно более кратковременным.

Смешанная с размытым грунтом вода со скоростью 2—3 *м/сек* (а иногда и более) поднимается вверх по выбросной трубе и сливается через ее уширенный открытый конец в кольцевой желоб, приваренный к наружной поверхности выбросной трубы, и по сливной трубе или шлангу спускается за пределы места работы. После того как фильтр опущен на требуемую глубину, подачу воды по нагнетательной трубе прекращают и трубу вытаскивают. Затем ослабляют прижимной хомут и вынимают выбросную трубу. Вслед за этим опускают на штанге деревянную конусную заглушку и вставляют ее в отверстие упорного кольца, стараясь ударами по штанге забить возможно плотнее так, чтобы нарезка на вну-

тренней поверхности упорного кольца врезалась в древесину заглушки. После этого колодец можно считать установленным.

Установка такого колодца глубиной от 10 до 20 *м* требует со всеми приготовлениями около 2—3 час. при песчаном грунте и до 5—6 час. при наличии в грунте глинистых прослойков.

На рис. 9 видны фильтры с фрезерным наконечником на стройплощадке автозавода им. Молотова. Среди этих фильтров сложены всасывающие трубы с клапаном, описываемым ниже (§ 2, рис. 12), и отдельные звенья труб разных диаметров.

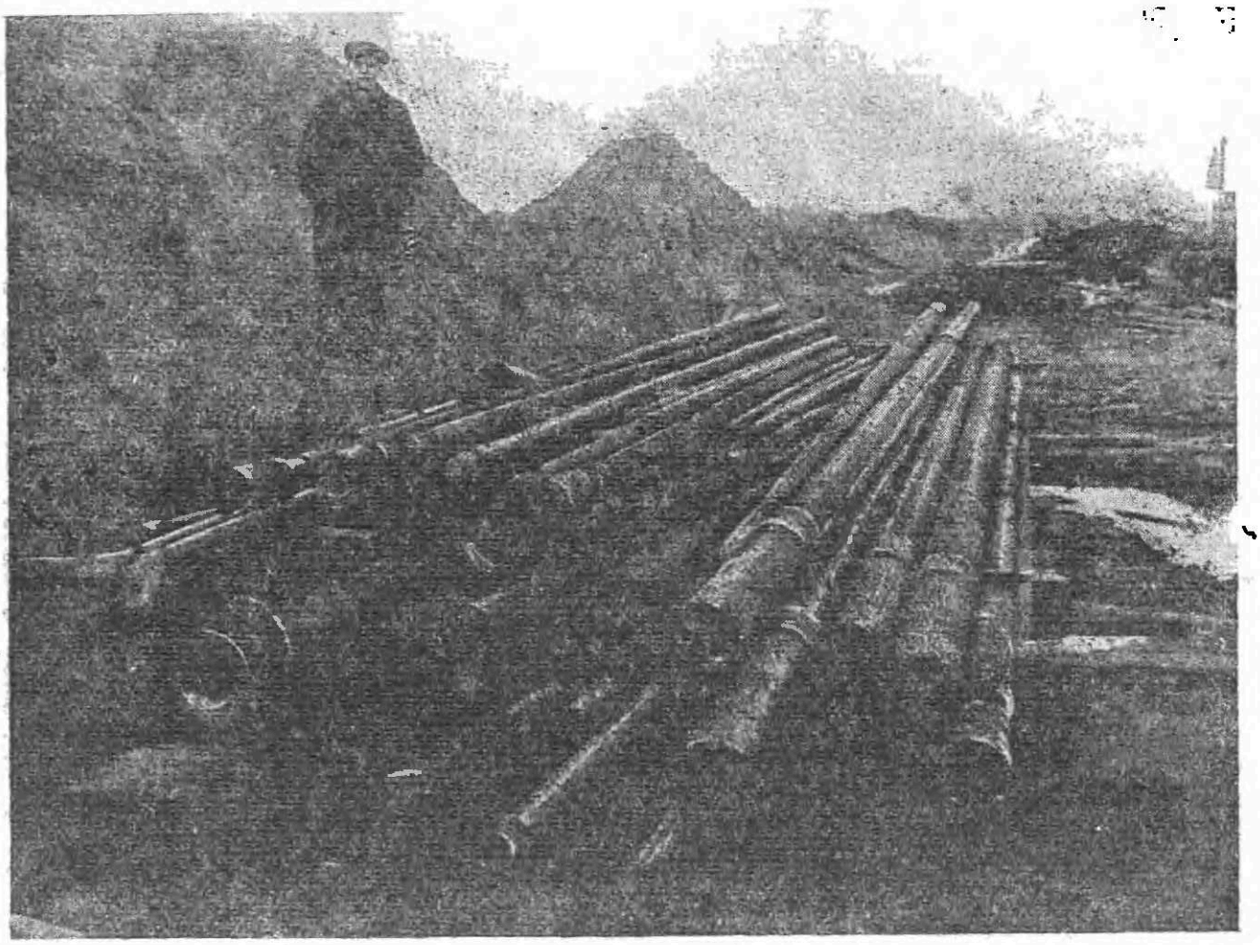


Рис. 9

Одним из слабых мест описанного колодца является упорное кольцо — особенно в части, связанной с закрыванием отверстия в нем деревянной заглушкой.

Если фрезер наконечника врежется в глину или другую плотную породу и углубится в нее, то заглушка устанавливается легко и она даже не крайне необходима. Но если водонепроницаемый слой залегает глубже фрезера, то песчаный грунт после вытаскивания нагнетательной трубы быстро устремляется вверх под напором грунтовой воды и образует грунтовую пробку, которая может не дать возможности забить деревянную заглушку в упорное кольцо; тогда колодец не только не может быть использован полностью, но иногда и совершенно не годится для эксплоатации, так как откачка воды из него может быть сопряжена с выносом грунта и ослаблением основания сооружений.

При грунтах песчаных, легко образующих пробку в трубе, такое приспособление оказывается ненадежным в том отношении, что пробка может легко подняться выше опорного кольца в то время, когда происходит перерыв в подаче рабочей воды для наращивания нового звена фильтра. Тогда приходится затрачивать много времени для выбирания пробки и ее вымывания через верх трубы, а часто эта операция совершенно не удается, так как по мере выбирания или вымывания пробки последняя продолжает снова подниматься и не дает возможности освободить упорное кольцо.

Длина наконечника фильтра с фрезером зависит от высоты грунтовой пробки, которая может образоваться во время вынимания нагнетательной и выбросной труб. На рис. 8 эта длина составляет 60 *см*, что могло быть допущено только для определенных местных условий. В других условиях пробка может образоваться такой высоты и так быстро, что для недопущения подъема ее выше кольца может потребоваться значительно более длинный наконечник. Еще более затрудняется дело, когда подача воды прекращается для на-

винчивания нового звена колодца, представляющего довольно продолжительную операцию. За это время даже при большой длине наконечника опорное кольцо может оказаться погребенным под пробкой Если даже не произойдет последнего, то в длинном наконечнике грунт пробки будет настолько уплотнен, что размыв его струей воды может оказаться довольно затруднительным

Более рационально снабдить опорное кольцо вместо деревянной заглушки автоматически закрывающимся клапаном

Благодаря такому клапану отпадает возможность проникания грунта снизу в колодец, дно которого закрывается автоматически Кроме того такой клапан при удачной его конструкции и хорошем изготовлении должен обладать следующими преимуществами

а) Ввиду отсутствия опасности образования грунтовой пробки внутри колодца длину насадки можно делать меньше, чем в конструкции с забиваемой деревянной пробкой, а это позволит увеличить полезную высоту фильтра.

б) Такой клапан позволит углублять колодец без наращивания новых звеньев в тех случаях, когда потребуется увеличить глубину понижения уровня грунтовых вод без установки новых колодцев.

Особенно выгодно применение системы колодцев, устанавливаемых без предварительного бурения скважин гидравлическим способом при понижении уровня грунтовых вод в населенных пунктах, где имеется водопроводная сеть, из которой в любом пункте можно получить воду под необходимым напором, т е. где отпадает надобность в многоступенчатых центробежных насосах и в специально прокладываемых длинных линиях труб для подачи воды от водоисточника к колодцам для понижения уровня грунтовых вод

Однако здесь необходимо заметить, что в населенных пунктах и вообще вблизи существующих сооружений и зданий необходима известная осторожность если колодцы установить очень близко к фундаментам сооружений, то последние могут подвергаться опасности благодаря перемещениям грунта, которым сопровождается гидравлический способ установки колодцев

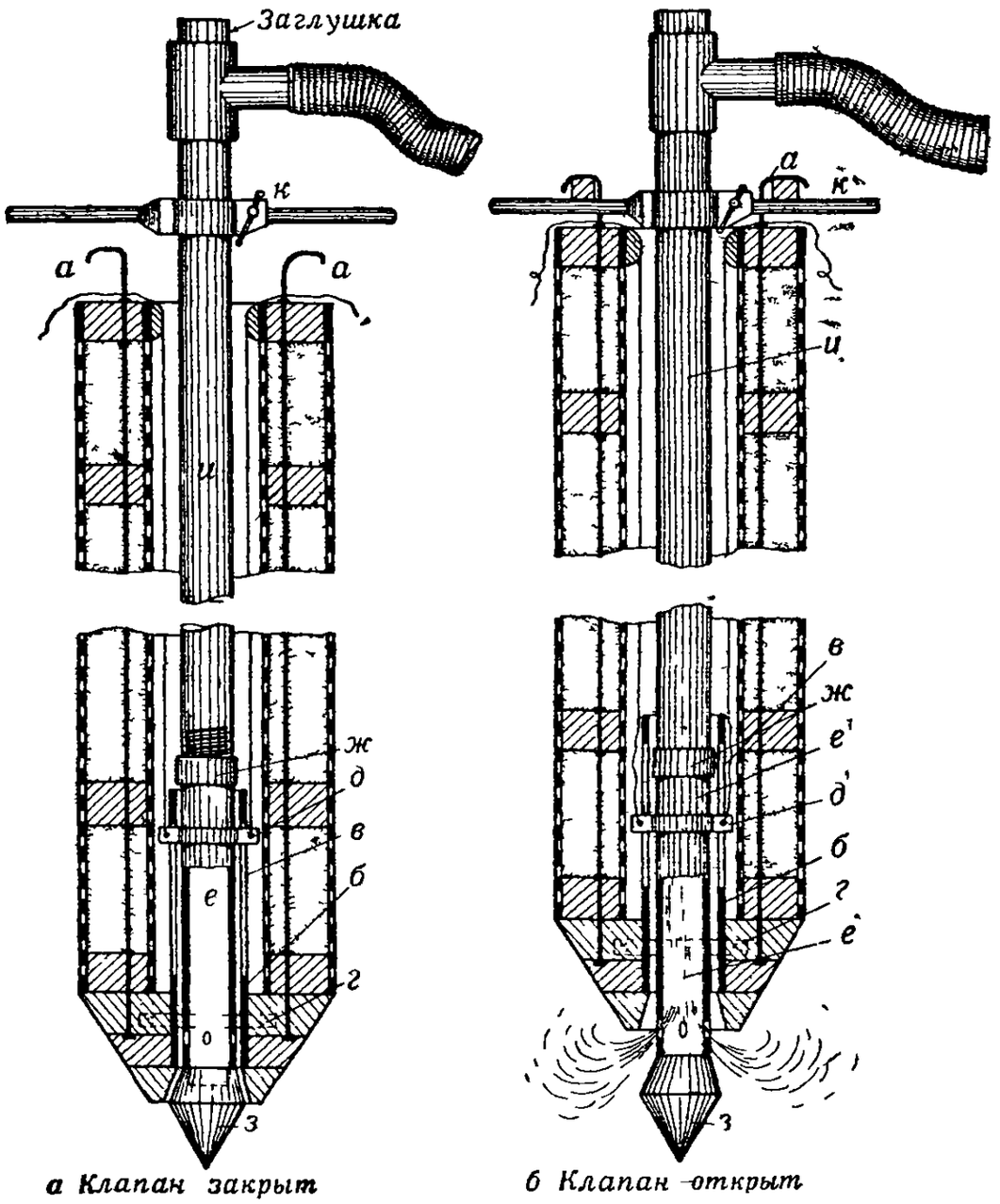
Гидравлическим способом можно опускать и колодцы вместе с наружной обсыпкой как с концентрическим расположением обсыпки, так и фильтры корзиночного типа.

Автором в 1929 г. был сконструирован и применен в виде опыта колодец с обсыпкой и автоматическим клапаном для гидравлической установки при постройке главного канализационного коллектора Васильевского острова в Ленинграде. Этот колодец (рис. 10) имел длину всего 2 и 3 *м*, так как имелось в виду использовать его в качестве зумпфа для откачки воды из траншеи с тем расчетом, чтобы дно этого колодца можно было опускать глубже по мере отрывки траншеи. Колодец был составлен из двух концентрических дырчатых жестяных цилиндров, прибитых гвоздями к деревянным кольцам на расстоянии по оси колодца 0,50 *м*. Сначала к кольцам прибивается дырчатая жесть с внутренней стороны (диаметр внутреннего цилиндра 150 *мм*), затем с наружной стороны, причем наружная обшивка заканчивается только после засыпки зазора между обоими цилиндрами фильтрующим материалом (гравием или крупным песком). Наружный диаметр колодца составлял 400 *мм*. Кольца соединялись между собою тремя железными стержнями, оканчивающимися наверху колодца крюками *а*. Дно колодца было сделано из ряда деревянных колец, образующих вместе конус с каналом в середине, в который вставлен железный патрубок *б* диаметром 100 *мм*, имеющий в верхней части две вертикальных щели *в*, лежащих одна против другой по направлению диаметра сечения патрубка Внизу этот патрубок при помощи хомута *г* зажат неподвижно в деревянном днище колодца. В этой щели вверх и вниз могут передвигаться стяжки хомута *д*, надетого на трубу *е* диаметром 75 *мм*. Эта труба имеет на верхнем конце муфту *ж* с внутренней винтовой нарезкой, а на нижнем — точеный стальной наконечник *з* в виде одного усеченного и другого полного конусов, сложенных основаниями. Несколько выше этого клапана в трубе *е* имеются дыры с наклоном изнутри внаружу, предназначенные для направления струй воды.

Перед опусканием колодца в него опускается нижний навинтованный конец нагнетательной трубы *и* и ввинчивается в муфту *ж*, причем патрубок вместе с трубой *и* вращаться не может благодаря хомуту *д*, который

упирается в края щелей трубы *б*, также неподвижной благодаря хомуту *г*. После того как труба *и* ввинчена, нажимают на хомут и опускают трубу вместе с патрубком *е* и клапаном *з*, который углубляется в грунт Отверстия оказываются ниже колодца, пущенная по наружной трубе вода под напором рырывается струями из этих отверстий и взбаламучивает грунт, разрыхляя его, отталкивая в стороны и открывая путь для опускания всего колодца под действием собственного веса в грунт (рис 10, *б*)

Для того чтобы клапан не мог подняться вверх, хомут *к* прижимается двумя (или тремя) клиньями, подкладываемыми под крючья *а* Такой ко-



а Клапан закрыт *б* Клапан открыт

Рис 10

лодец длиной 2—3 *м* опускался почностью в тощий сутлинок на работах по канализации Васильевского острова в Ленинграде в течение 5—15 мин После установки на требуемую глубину выбивают клинья, удерживающие хомут, и быстро поднимают напорную трубу (не прекращая подачи воды, а только уменьшая ее) до отказа и в таком положении закрепляют при помощи двух тросов привязанных нижним концом к хомуту *д*, а верхним — наматываемых на крюки *а* Клапан *з*, поднимаясь вверх, закрывает плотно канал в днище колодца, и таким образом грунт не может проникнуть внутрь колодца снизу под напором воды (рис 10, *а*)

После закрытия клапана нагнетательная труба выключается окончательно из напорной системы (насоса или водопровода), вывинчивается, вынимается из колодца и вместо нее погружается всасывающая труба для откачки воды из колодца, в каковой она притекает из грунта через боковую фильтрующую поверхность.

Если потребуется опустить колодец на новую глубину, производятся опять те же операции ввинчивания нагнетательной трубы, затем открывания клапана *з* и отпускания колодца на новую глубину гидравлическим способом.

Ясно, что длина колодца рассмотренной системы может быть и более 2—3 *м*. Надо только иметь в виду, что с увеличением глубины колодца и диаметра должны увеличиваться напор и расход рабочей воды.

Следует надеяться, что практика применения гидравлического способа установки колодцев выработает значительно более удачное конструктивное выполнение систем колодцев, первые кустарные образцы которых описаны выше.

§ 2. ВСАСЫВАЮЩАЯ ТРУБА

При употреблении обыкновенных всасывающих насосов в колодец опускается всасывающая труба, не доходящая до дна колодца на 0,5—1 *м*. Эта труба подвешивается при помощи простого хомута, опирающегося на края наставной трубы. При помощи фланцевого тройника с коленом или без него всасывающая труба присоединяется к всасывающему трубопроводу. Во избежание обрыва струи при понижении уровня воды в колодце ниже свободного заборного конца всасывающей трубы последняя иногда снабжается всасывающим клапаном (рис. 11, *а* и *б*).

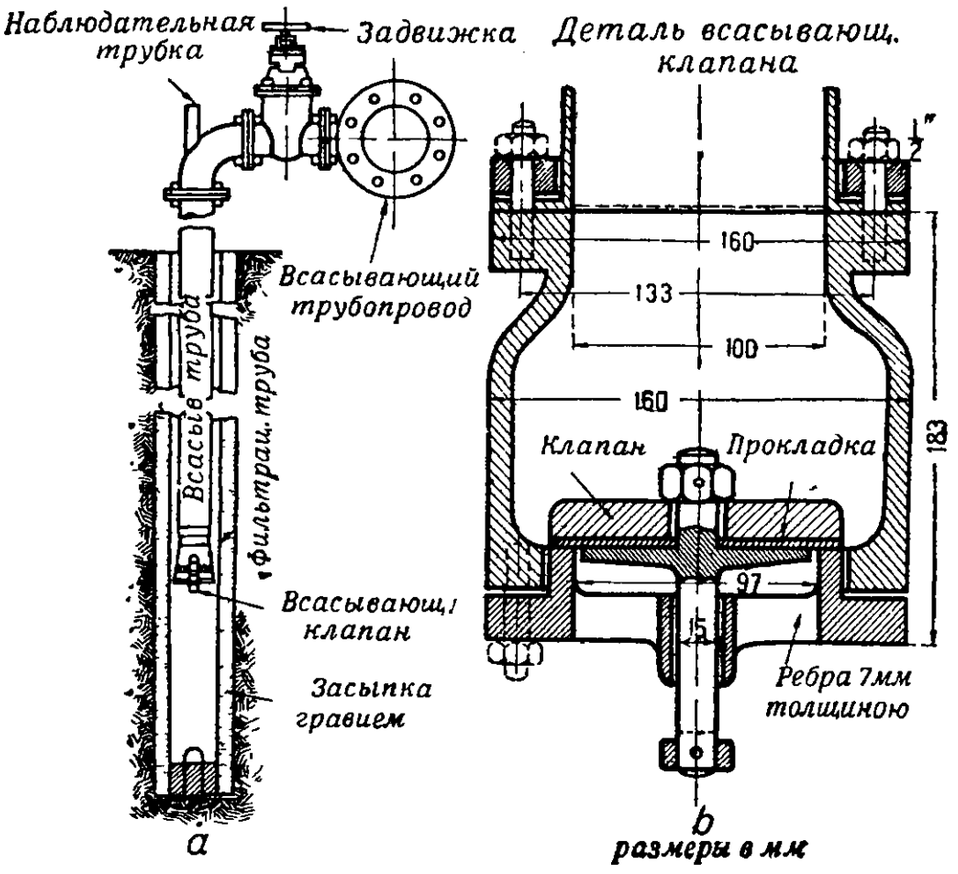


Рис. 11

При понижении уровня грунтовых вод в 1931 г. для постройки насосной станции на автозаводе им. Молотова вблизи г. Горького объединением Союзводстрой был применен всасывающий клапан, представленный схематически на рис. 12. Клапан расположен в дне железного стакана, приваренного к нижнему концу железной всасывающей трубы, и состоит из круглого кожаного диска, прикрепленного заклепками к стержню, расположенному по направлению диаметра дна стакана. Для жесткости и увеличения веса к коже сверху прикреплены заклепками две железные сегментные накладки. При всасывании обе лопасти клапана поднимаются вверх и почти полностью открывают сегментные отверстия. Сопротивление такого

клапана сравнительно невелико как ввиду малого веса, так и незначительного стеснения отверстий в дне стакана. Если для откачки воды применяются насосы нецентробежные или если образование вакуума во всасывающей сети получается при помощи вакуумнасоса, то всасывающие трубы не снабжаются клапанами.

На каждой всасывающей трубе желательно устанавливать задвижку (рис. 11, *а*) для возможности включения и выключения колодца, хотя во избежание больших затрат и образования лишних неплотностей от этого иногда отказываются.

Всасывающая труба не должна быть очень большого диаметра, чтобы не стеснять внутреннего пространства колодца; обычный диаметр ее от 50 до 100 *мм*, хотя в особых случаях может быть как менее 50, так и более 100 *мм*. Она составляется из отдельных звеньев при помощи винтовых муфт на суриковой замазке или фланцев с резиновой прокладкой, но во избежание лишних неплотностей было бы лучше устраивать ее без всяких стыков или со сварными стыками.

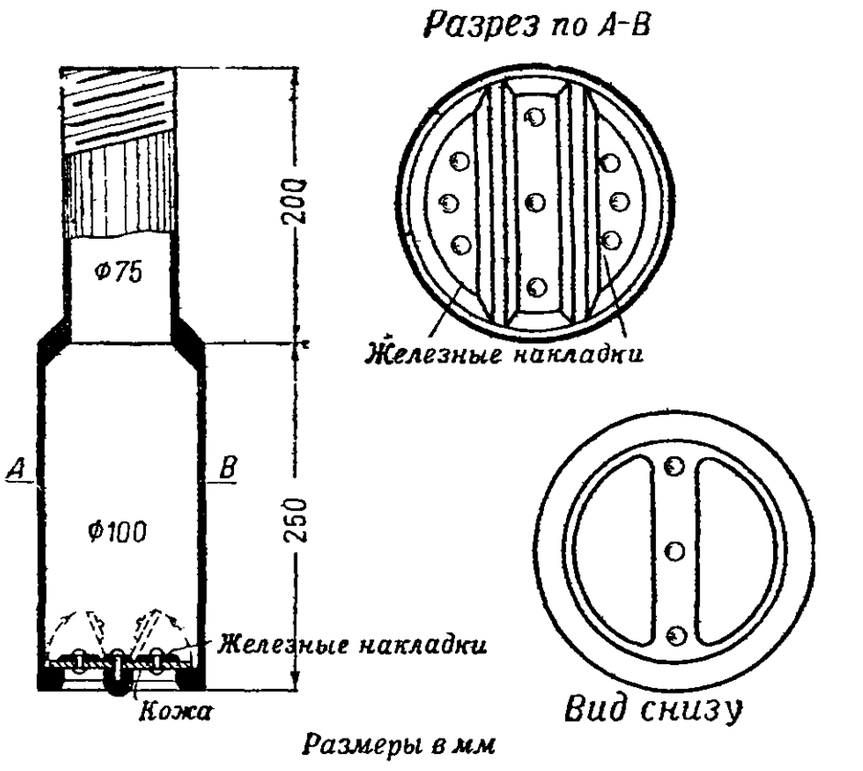


Рис. 12

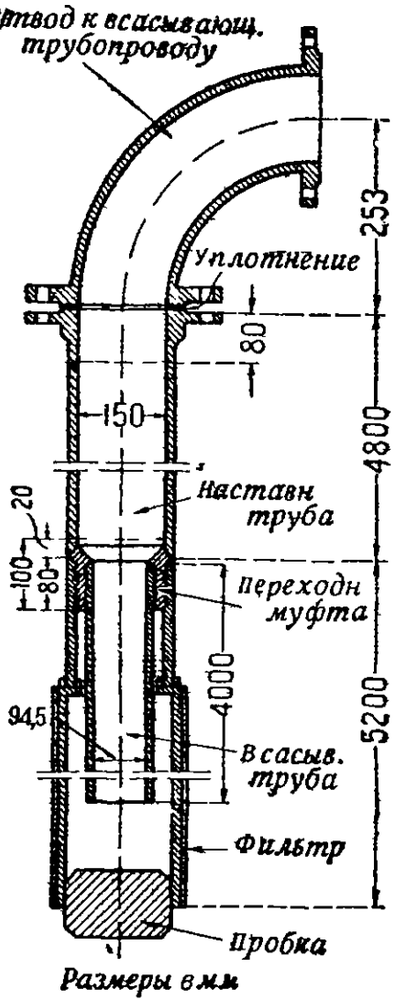


Рис. 13

Германская строительная фирма Siemensbauunion сконструировала колодец, в котором всасывающая труба является продолжением наставной трубы и соединяется с последней при помощи переходной муфты (рис. 13). Этим достигается экономия в погонаже труб, но, с другой стороны, затрудняется наблюдение за уровнем воды в колодце. Если последнее необходимо, то через соединительное с трубопроводом колено пропускается с воздухонепроницаемой заделкой трубка, через которую и производится наблюдение за уровнем.

Такого рода всасывающая труба показана также на рис. 7 для колодцев Гемпель, примененных например при понижении уровня грунтовых вод для постройки канализационной сети г. Ульцена (Германия).

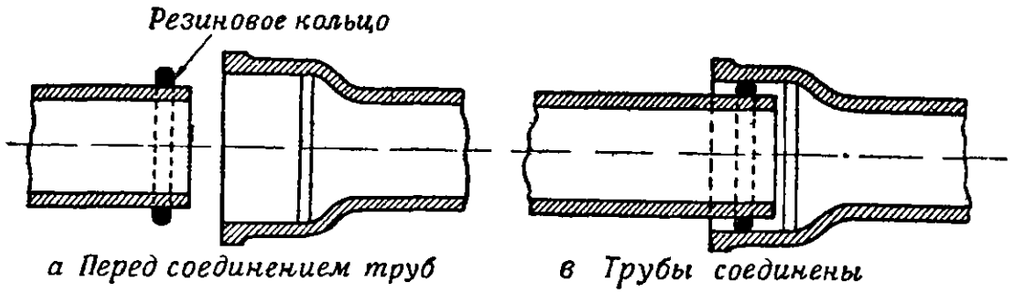
§ 3. ВСАСЫВАЮЩИЙ ТРУБОПРОВОД

Следующим главным элементом обыкновенных установок является всасывающий трубопровод, который может составляться из раструбных или

фланцевых чугунных, из железных фланцевых сварных, из железных муфтовых цельнотянутых (газовых), или наконец из железных труб, соединяемых при помощи автогенной или электросварки.

Раструбные соединения требуют применения уплотнительных резиновых колец (рис. 14) или тщательной зачеканки. Хотя раструбные трубы допускают укладку их с небольшими поворотами без фасонных частей и менее чувствительны к оседанию подкладок под ними, но укладка и разборка их медленны и дороги, благодаря чему они применяются теперь сравнительно редко.

Более распространены в настоящее время всасывающие трубопроводы, состоящие из железных или чугунных труб с надвижными фланцами



а Перед соединением труб *в Трубы соединены*

Рис 14

(рис. 15). Между буртиками двух соседних труб закладывается картонная промасленная или резиновая кольцевая прокладка, которая при сбалчивании фланцев образует непроницаемое стыковое соединение. Стыки такого устройства обладают достаточной плотностью и быстро выполняются.

При нормальных по химическому составу водах предпочтение отдается железным трубам, имеющим по сравнению с чугунными следующие преимущества: легкость, бо́льшую допускаемую строительную длину, благодаря чему уменьшается число стыков, меньшую хрупкость, что дает возможность класть трубы не только на земле, но и монтировать на весу.

Недостатком фланцевых трубопроводов является потребность в фасонных частях и коротких вставках для присоединения колодцев в тех случаях, когда неточность расположения колодцев требует изменения направления всасывающего трубопровода.

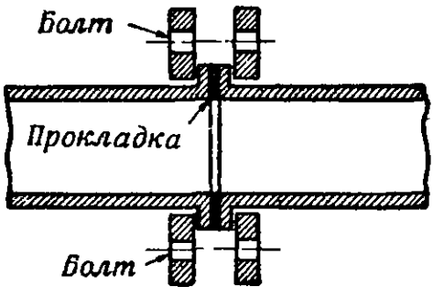


Рис 15

Ввиду этого, а также для достижения большей плотности трубопровода и ускорения монтажа в последнее время все более и более часто применяется соединение отдельных частей трубопровода при помощи автогенной и электросварки.

Для чугунных и особенно для железных труб серьезное значение имеет опасность коррозии их изнутри кислотосодержащими водами. В подобных случаях приходится применять защитные меры.

Чтобы не произошло неприятных обрывов струи во время действия установки, необходимо перед пуском в ход испытать трубопровод под давлением и, если имеются неисправные стыки, переделать последние.

Трубопровод должен укладываться с некоторым подъемом (от 1 · 1000 до 1 · 500, в редких случаях 1 250) к насосу, чтобы пузырьки воздуха, содержащегося в воде или попадающего через отдельные стыки, продвигались в одном направлении с водой и отводились насосом. Если труба уложена неровно, то в вершинах изгибов могут образоваться воздушные мешки, понижающие высоту всасывания и уменьшающие живое сечение труб. Поэтому к прокладке трубопровода следует относиться весьма внимательно,

особенно в тех случаях, когда кроме воздуха можно ожидать скопления выделяющихся из воды растворенных в ней газов.

Всасывающий трубопровод следует располагать так, чтобы возможно было присоединить колодцы простейшим и кратчайшим способом; предпочтительнее располагать его в виде замкнутого кольца, благодаря чему получается выравнивание всасывания в различных частях трубопровода. Кроме того при таком расположении можно в случае надобности при помощи задвижек выключить определенную часть трубопровода. Поэтому полезно иметь на всасывающем трубопроводе местами такие задвижки. Хотя это и повышает стоимость установки и увеличивает сопротивление, зато в случае необходимости устройства дополнительных колодцев можно включить таковые во всасывающий трубопровод, не прекращая действия всей установки. Постановка задвижек особенно рекомендуется тогда, когда можно опасаться неожиданностей, вызываемых сложностью состава и строения грунта, и когда нельзя надеяться на полную надежность предварительного расчета. Впрочем при кольцевом всасывающем трубопроводе, позволяющем выключить на время отдельные участки его, можно заранее и не устанавливать запасных задвижек, так как не составит большого труда установить их по мере надобности.

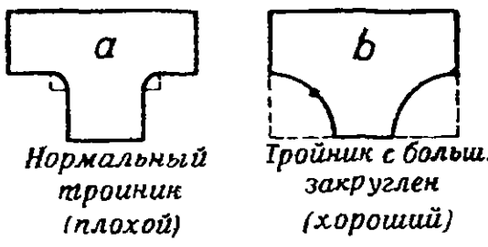
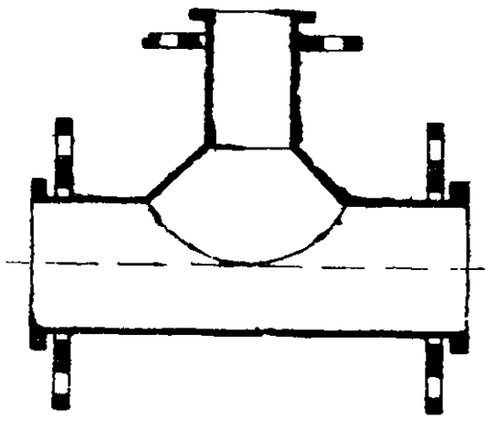
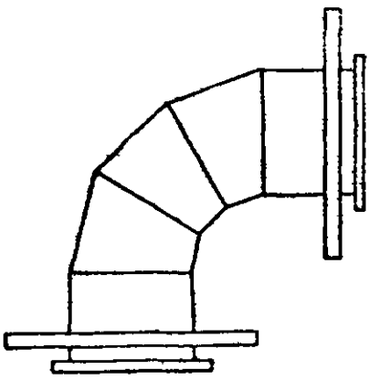


Рис. 16

Если речь идет о крупной установке, то устройство кругового трубопровода одного диаметра особенно целесообразно при действии нескольких насосов, равномерно распределенных по длине трубопровода.

При кольцевых всасывающих трубопроводах (особенно при большой их длине или при наличии в воде газов) установка водопонижения должна быть снабжена вакуумнасосами или другими воздухоудалительными приспособлениями, присоединяемыми к воздухопроводам, отводящим воздух и


Рис 17


Рис 18

газы из повышенных точек трубопровода. При подъемах трубопровода от средин расстояний между насосными станциями к последним удобнее всего воздухопроводы включать во всасывающий трубопровод у самых насосных станций.

Обыкновенно всасывающий трубопровод имеет диаметр от 100 до 300 *мм*. Если по расчету получается большее сечение, то применяют сдвоенный трубопровод, снабженный от места до места короткими поперечными трубами. В отдельных случаях диаметр может быть менее 100 *мм* (50 и даже 25 *мм*).

Для предохранения от разрушительного действия кислот полезно покрывать трубы изнутри чистым гудроном, разогреваемым при помощи паяльной лампы. В Везермюнде был применен такой способ после того, как

было обнаружено, что уже через полгода трубы в отдельных местах насквозь были разрушены кислотой и их приходилось сменять участок за участком. После произведенного гудронирования изнутри новых исправлений трубопровода в большом объеме не потребовалось.

Присоединение всасывающих труб к всасывающему трубопроводу производится обыкновенно при помощи колен и тройников. Если всасывающая труба колодца не имеет всасывающего клапана или конструкция последнего не гарантирует от проникания воздуха во всасывающий трубопровод в случае понижения уровня воды в колодце ниже нижнего конца всасывающей трубы, вследствие чего может произойти обрыв струи во всасывающем трубопроводе и прекращение действия понизительной установки, то необходимо устанавливать на соединительном колене между всасывающей трубой и всасывающим трубопроводом обратный клапан (рис. 1 и 20).

Нормальный тип тройника служит причиною излишних потерь из-за неплавности изменения струи. В Везермюнде с успехом был применен тройник особого типа (рис. 16, *b*), отличающийся от нормального бо́льшим радиусом закругления.

С точки зрения уменьшения сопротивлений во всасывающей сети заслуживает особого внимания изготовление фасонных частей автогенной сваркой. На рис. 17 показан тип тройника, изготовленный на месте работ с помощью автогенной сварки. Таким способом госстройобъединение Союзводстрой, начиная с 1931 г., в широких размерах изготовляет все фасонные части и целые стандартные узлы всасывающей и нагнетательной сети установок понижения уровня грунтовых вод. На рис. 18 показан тип сварных колен, изготовляемых Союзводстроем для своих понизительных работ

§ 4. НАСОСЫ

Насосы, применяемые при понижении грунтовых вод, могут быть самые разнообразные: поршневые, центробежные, пульсометры, водоструйные, мембранные и др. Наибольшее распространение получили центробежные насосы, так как они дают равномерность хода, не имеют уплотняемых частей, отличаются простотой монтажа и ухода и требуют незначительной площади. Высота всасывания их обычно считается от 5 до 7 *м*, но в некоторых новейших конструкциях достигает 8 и даже 9 *м*; высота нагнетания может быть как угодно велика в тех пределах, которые возможны при понижении грунтовых вод. Неудобства их заключаются в затруднительности присасывания воды, для чего при малых установках требуется наполнение всей системы водой, а при более значительных установках необходима установка вакуумнасосов или эжекторов.

Для того чтобы установка работала бесперебойно, необходимо соответствие между количеством откачиваемой из каждого колодца и количеством притекающей к нему грунтовой воды. При слишком большом количестве откачиваемой воды уровень в колодце быстро понижается, и конец всасывающей трубы может выйти из-под воды, захватить воздух и вызвать обрыв струи во всей всасывающей системе. Наилучшим средством против захвата воздуха является достаточная длина всасывающей трубы. При длине последней около 8—9 *м* уровень воды в колодце не может понизиться ниже входного конца трубы, так как высота всасывания не может практически превысить эту величину.

Нередко на водопонизительных небольших установках при малопроницаемом осушаемом грунте производительность установленного центробежного насоса оказывается чрезмерной для данных условий. Если полностью открыть напорную задвижку насоса, то он будет захватывать в течение определенного короткого промежутка времени из всех вместе колодцев установки такое количество воды, которое за это время не успевает притекать

из грунта; в результате установка будет работать неравномерно, рывками, а уровень воды в колодцах понизится настолько, что недостаточно длинные всасывающие трубы могут захватывать воздух, вследствие чего получатся обрывы струи и перерывы в работе установки. Если чрезмерно призакрыть напорную задвижку насоса, то к. п. д. его резко снизится, отчего вообще насос будет работать ненормально.

Во избежание этих явлений прежде всего надо стремиться установить такой насос, производительность которого возможно ближе соответствует предполагаемому общему дебиту обслуживаемой этим насосом части установки.

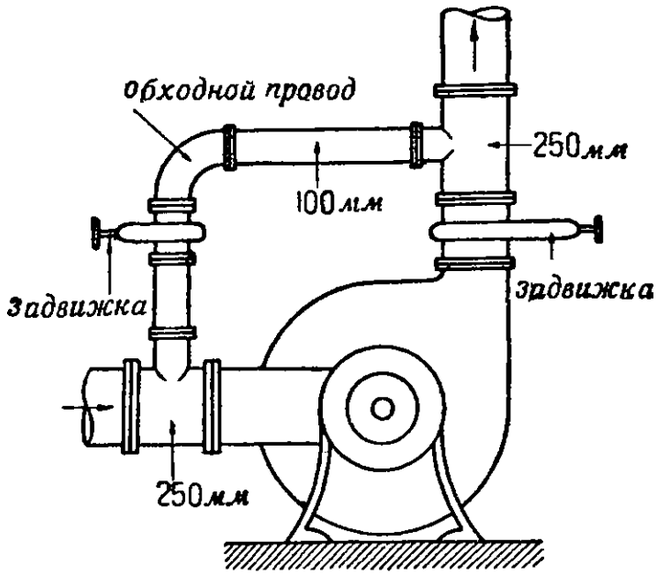


Рис 19

Если по каким-либо причинам это невозможно, то необходимо предусмотреть приспособление для регулировки водопонизительной системы. Для регулировки можно пользоваться обходным трубопроводом (шунтом); когда насос работает нормально, обходный трубопровод закрыт задвижкой; как только путем наблюдения уровня воды в колодцах обнаруживается чрезмерный водоотлив, задвижка приоткрывается и часть воды начинает циркулировать в обходном проводе (рис. 19), так что насос работает отчасти «на себя».

В правильно спроектированной установке для достижения требуемой глубины понижения уровня грунтовой воды из каждого колодца должно откачиваться не больше того количества воды, которое соответствует допустимой его производительности, а следовательно более или менее определенной глубине понижения уровня воды в нем.

Для того чтобы не получилось чрезмерного понижения уровня воды в колодцах, т. е. их перегрузки, необходимо наблюдение за этим уровнем, в особенности при регулировке установки в начальный период действия.

В случае перегрузки отдельных колодцев расход из них можно уменьшить частичным прикрыванием задвижек на всасывающих трубах этих колодцев. Чем более равномерен грунт, тем более можно ожидать равномерной работы всех колодцев. В таких случаях задвижки у каждого колодца менее необходимы и регулирование работы понизительной установки легче.

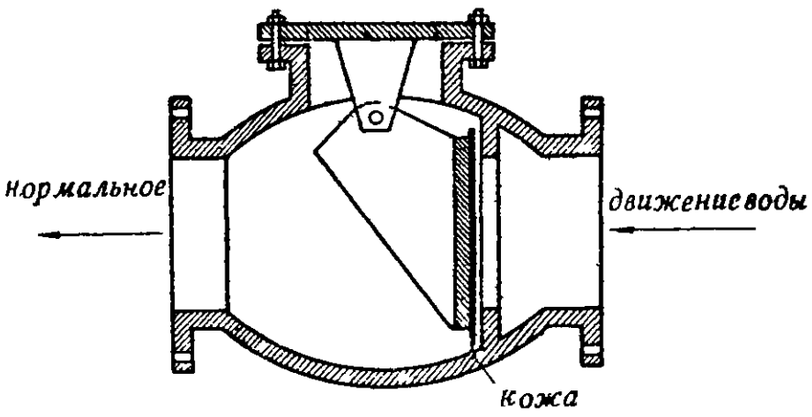


Рис 20

Если насос приводится в движение электромотором, то предпочитают соединение с ним насоса на одном валу.

Однако часты случаи применения ременной передачи и при электрической тяге, что объясняется легкостью установки насосов на любое число оборотов При двигателях паровых и внутреннего горения преимущественно употребляется ременная передача.

Обязательными требованиями, предъявляемыми к центробежным насосам, являются: равномерность хода, простота смазки, легкость регулировки, легкая заменяемость частей.

Для возможности включения и выключения центробежного насоса, а также для регулирования его работы необходимо перед насосом и позади него иметь задвижки.

Кроме того между насосом и напорным трубопроводом необходимо поставить обратный клапан, так как без него при внезапном обрыве струи вода из напорного трубопровода вылилась бы стремительно назад, произведя удар во всасывающем трубопроводе, что особенно опасно для раструбных труб, где может произойти расстройство стыков. На рис. 20 показан схематически один из типов автоматических обратных клапанов.

В зависимости от требуемой высоты подъема воды центробежные насосы устраиваются одноколесные (одноступенчатые) и многоступенчатые. При подъеме воды на высоту до 20 *м* достаточны одноступенчатые насосы.

Поршневые насосы применяются для установок понижения в редких случаях, так как они требуют более сложного обслуживания, чем это возможно на месте постройки. Против них также говорит чувствительность их к уплотнениям. Эти отрицательные свойства недостаточно компенсируются преимуществом легкого приспособления к колебаниям нагрузки и самостоятельного присасывания. При малых установках и непостоянных количествах воды поршневые насосы могут применяться с бо́льшим успехом (в частности при малых опытных установках).

Пульсометры, мембранные насосы и другие системы применяются лишь в редких случаях и здесь не рассматриваются. Подробные данные о различных насосах и водоподъемниках следует брать из специальных справочников и руководств.

§ 5. НАПОРНЫЙ ТРУБОПРОВОД

Длина, расположение и конструкция напорного трубопровода зависят от местных условий и в первую очередь от местонахождения того резервуара или лотка, куда отводится вода.

К напорному трубопроводу не предъявляется таких строгих требований, как к всасывающему трубопроводу. Из экономических соображений его желательно устраивать возможно короче и при первой возможности выпускать в открытый лоток, который отводил бы воду в имеющийся водоприемник.

Напорный трубопровод составляется из фланцевых или раструбных труб, или наконец из звеньев, соединяемых посредством автогенной сварки. Для уменьшения бесполезной работы насоса потери в напорном трубопроводе по возможности должны сводиться к минимуму. Поэтому при большой длине напорного трубопровода надо стараться избегать резких перегибов, сужений и т. д.

Для учета количества откачиваемой воды, который рекомендуется производить при всяких установках, на напорном трубопроводе желательно установить водомер.

§ 6. ДВИГАТЕЛИ

Следующую неотъемлемую часть всякой установки понижения составляет двигатель.

Двигатели могут употребляться различные: локомобиль, дизель, газогенераторный и т. п., но в тех местах, где проводка электроэнергии не сопряжена с большими затруднениями и затратами, наиболее желательными являются электродвигатели.

При возведении крупных сооружений электрическая энергия требуется не только для понижения, но и для других целей: для строительных машин, для станков в мастерских и для освещения территории работ. Поэтому на крупных работах, где нет поблизости постоянного источника электрической энергии или электромагистрали, обыкновенно устраивают временные электрические станции.

Не говоря уже о таких преимуществах электродвигателей, как быстрота пуска в ход, малая потребная площадь, высокий к. п. д., опрятность и т. д, для понижения очень важное значение имеет возможность дробления установки на какое угодно число малых насосных единиц.

Однако из последнего не следует, что надо стремиться к устройству возможно большего количества малых установок. Кроме того что насосы очень малой производительности менее экономичны и менее прочны, слишком большое дробление невыгодно еще и потому, что оно требует более многочисленного обслуживающего персонала, что ведет к удорожанию понижения грунтовых вод.

Вопрос о запасных силовых установках является одним из самых острых в экономике понижения. Если установка запасных насосов уже стала обязательной в практике понижений, то устройство запасной силовой станции еще часто встречает на практике большие затруднения. Разрешить этот вопрос одинаково для всех случаев невозможно, но для всех установок должно соблюдать следующее правило: если установка работает в таких условиях, что в случае длительного прекращения водоотлива могут произойти тяжелые последствия из-за подъема уровня грунтовой воды, то надо иметь запасный источник энергии. Если например установка пользуется током от ближайшей электромагистрали, то на случай прекращения тока у строительства должна быть собственная силовая установка, которая могла бы дать часть требуемой энергии, чтобы поддержать хотя бы частично водоотлив до возобновления нормальной работы.

В качестве запасных желательно иметь такие источники энергии, которые можно быстро пустить в ход. Этому требованию лучше всего удовлетворяют двигатели внутреннего горения.

Из паровых двигателей наиболее удобным являются локомобили.

В соединении с центробежными насосами они выгодны вследствие следующих преимуществ:

1. Подвижность.

2. Соединение в одном агрегате котла и машины дает удобство обслуживания и экономию места.

3. Не требуется высокой трубы, так как тяга может быть усилена продуванием мятым или свежим паром.

4. Топка приспособлена к разным родам твердого топлива (уголь, дрова, солома, торф).

5. Можно допустить большие перегрузки и недогрузки.

6. Удобно изменять число оборотов, что, как известно, имеет большое значение для регулировки водоотлива центробежным насосом.

Что касается двигателей внутреннего горения, то таковыми могут быть для крупных установок быстроходные дизели, а для малых насосных агрегатов — бензиновые и бензоловые двигатели.

Требования, которые предъявляются при понижении грунтовых вод ко всякого рода двигателям, сводятся к следующему: быстрота пуска, простота ухода, наименьшее занимаемое пространство, меньшая чувствительность к отрицательным условиям временных установок, возможность регулировки числа оборотов, допустимость возможно более значительных недогрузок и перегрузок, наибольший к. п. д. и легкость замены отдельных частей.

§ 7. РАСПОЛОЖЕНИЕ УСТАНОВОК ПОНИЖЕНИЯ

Расположение колодцев в плане зависит как от плана будущего сооружения, так и от свойств грунта.

Если представить себе котлован прямоугольной формы с такими длинами сторон, что расположенные по его периметру колодцы при определен-

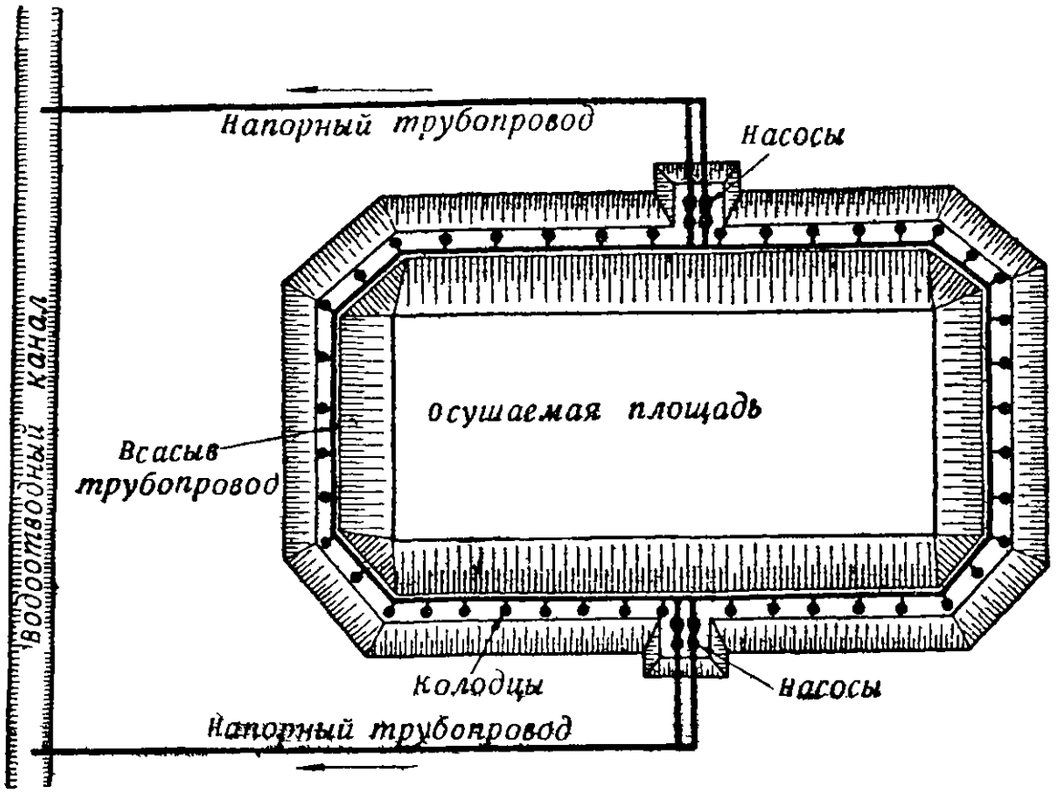


Рис. 21

ном расстоянии между ними обеспечат достаточную глубину понижения уровня грунтовой воды в самой середине котлована, то установка при необходимой глубине понижения 3—4 *м* будет иметь вид, схематически представленный на рис. 21.

При более сложной форме и очень больших размерах котлована в плане такое расположение может не позволить достигнуть желаемого понижения в центре котлована. Тогда придется расположить часть колодцев внутри контура котлована или сгустить колодцы на удаленных от центра участках периметра.

Введением дополнительных колодцев и укладкой всасывающих трубопроводов внутри площади котлована не только стесняется работа в котловане, но и затрудняется устройство водонепроницаемого основания сооружения. Для того чтобы все же достигнуть непроницаемости основания, применяют особые «горшки», при помощи которых достигается возможность заделки отверстий, остающихся в основании после вытаскивания колодцев (рис. 22).

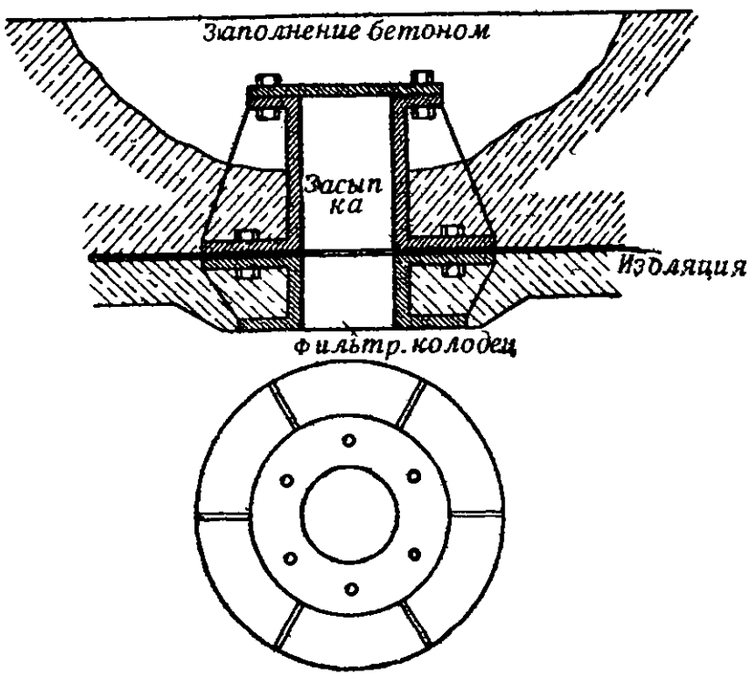


Рис. 22

Что касается числа и расположения насосов, то, как уже говорилось выше, надо сообразоваться с наивыгоднейшими условиями работы установки: для малых установок, имеющих не более 20 колодцев, обыкновенно бывает достаточно двух насосных агрегатов; для установок с бóльшим числом колодцев требуется несколько агрегатов, равномерно распределенных по периметру всасывающего трубопровода (примерно один агрегат на 10—20 колодцев, не считая запасных).

§ 8. СТУПЕНЧАТЫЕ ИЛИ ЯРУСНЫЕ УСТАНОВКИ

Высота всасывания насосов при неизбежных сопротивлениях в них и в трубопроводах практически не превосходит 5—7 *м*. Принимая во внимание возвышение оси насоса над непониженным уровнем (не менее 0,5 *м*), сопротивление колодца и крутизну воронки депрессии, надо считать, что пониженный уровень грунтовой воды в середине котлована располагается

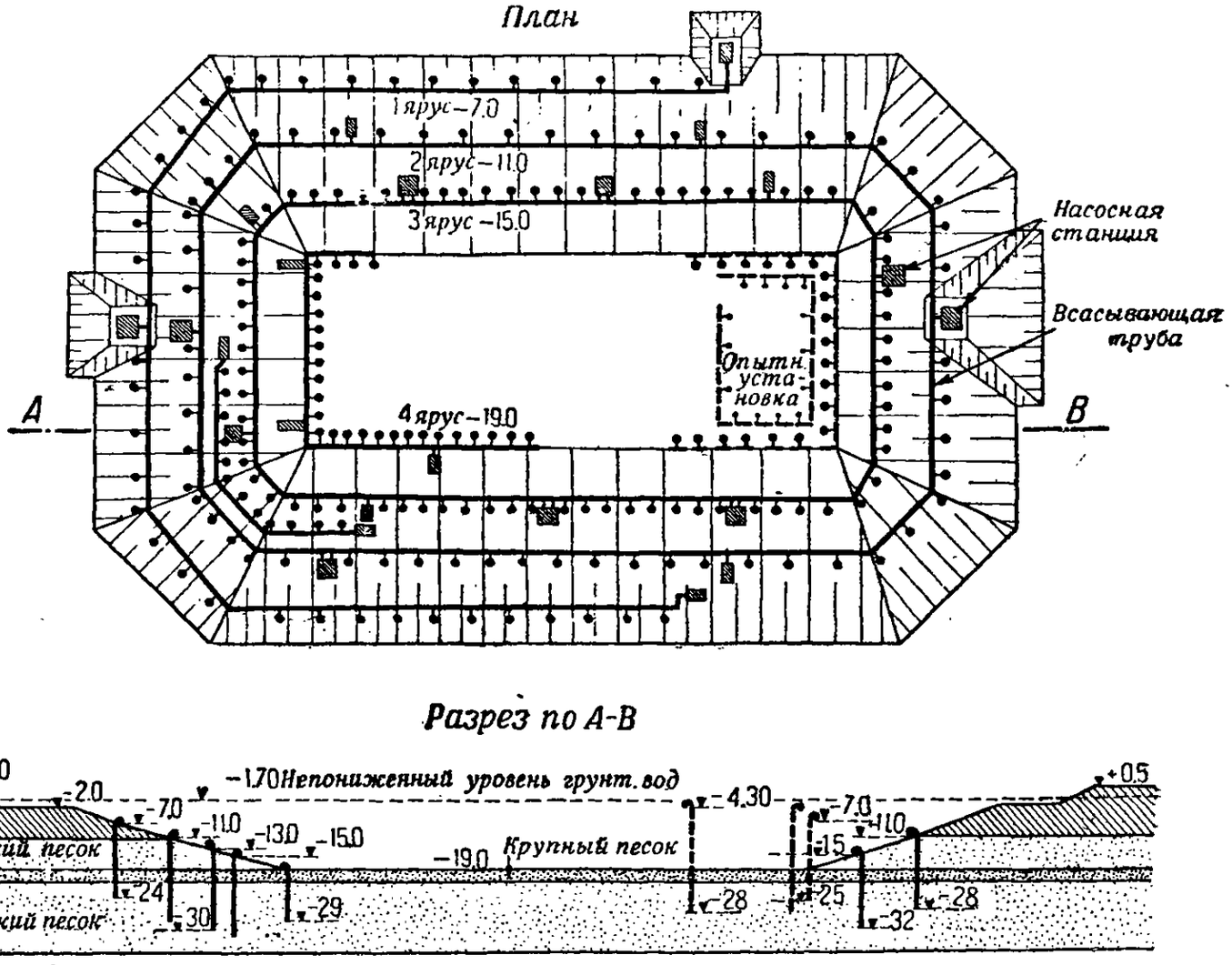


Рис. 23

выше уровня воды в колодцах на 1,5—2,5 *м* (в зависимости от характера грунта, размеров котлована, расстояния между колодцами, конструкции и размеров последних и т. д.).

Следовательно обыкновенным способом можно понизить уровень только на 3—5 *м*, но в практике часто требуется более глубокое понижение. Тогда приходится по достижении понижения на 3—5 *м* и отрывки грунта до пониженного уровня установить новый ряд колодцев, расположить на дне открытой выемки новый трубопровод со своими насосами и при помощи этого второго ряда колодцев понизить еще на 3—5 *м*.

Такой способ понижения называется ступенчатым или ярусным, а вся установка соответственно числу рядов колодцев называется двух-, трех-, четырехярусной и т. д. На рис. 23 представлена для примера четырехярусная установка.

Задача всех верхних ступеней состоит в понижении уровня грунтовой воды до той отметки, на которой располагаются затем устья колодцев следующей нижней ступени. Задача самой нижней ступени состоит в длительном поддерживании уровня на требуемой для окончания всех необходимых строительных работ высоте.

В верхних ступенях часто не устраивают колодцев по всей периферии строящегося сооружения и не прокладывают замкнутого кольцевого всасывающего трубопровода, но самая нижняя ступень в большинстве случаев состоит из полного кольца колодцев и всасывающего трубопровода.

Во многих случаях после пуска в ход нижнего яруса оказывается возможным выключить из действия верхний ярус, но разборка верхних ярусов (вслед за установкой нижних) никогда не желательна, так как под их защитой приходится производить разборку нижних ярусов установки. В тех случаях, когда грунт не представляет совершенно однородной сверху донизу песчаной массы, а переслаивается более или менее мощными водоупорами, тогда совершенно невозможно обойтись без одновременной работы верхних и нижних ступеней. Наконец близость открытых водоемов может сделать совершенно невозможным даже временное выключение верхних ярусов, не говоря уже о разборке их.

Вообще производственный план понижения грунтовых вод в каждом отдельном случае зависит от способа и плана основных строительных работ; поэтому и решение вопроса о порядке устройства, использования и разборки той или иной ступени не может быть одинаково для всех случаев.

Ярусы, оборудованные полным замкнутым кольцом магистрального всасывающего трубопровода, каждый со своими отдельными насосными установками, расположенными также ступенями одна ниже другой, с отдельными напорными трубопроводами — все это требует большого количества предметов оборудования и машин. Если бы оставлять на месте все ступени до конца работ, то достигалась бы полная обеспеченность постройки: в случае остановки одного яруса ближайший к нему вышерасположенный, который при благоприятных обстоятельствах оставался бы без действия, немедленно может быть пущен в ход.

Однако высокая стоимость большого числа предметов оборудования, буровых и монтажных работ, а также значительное и даже в известных случаях недопустимое стеснение рабочего пространства заставляют применять те или иные приемы, ведущие к удешевлению и уменьшению громоздкости многоярусных установок понижения.

К числу таких приемов относятся:

1) комбинация открытого водоотлива с понижением грунтовых вод;
2) неполное выполнение верхних ярусов;
3) продольные ярусы;
4) «ступени в себе».

Один из примеров комбинации открытого водоотлива с понижением уровня грунтовых вод представлен на рис. 24, изображающем в общих чертах установку понижения при постройке шлюза Крюисшанс (Kruisschans) вблизи Антверпена.

Здесь уровень грунтовых вод был понижен при помощи открытого водоотлива на 13 *м*, после чего только было применено понижение грунтовых вод при помощи трубчатых колодцев. Такой прием возможен тогда, когда грунт допускает крутые откосы котлована и когда поблизости нет строений.

Примером неполного выполнения верхних ярусов может служить понижение уровня грунтовых вод при постройке шлюза в Sodertaje (Швеция), где верхние ярусы были устроены только на части площади. Схематически

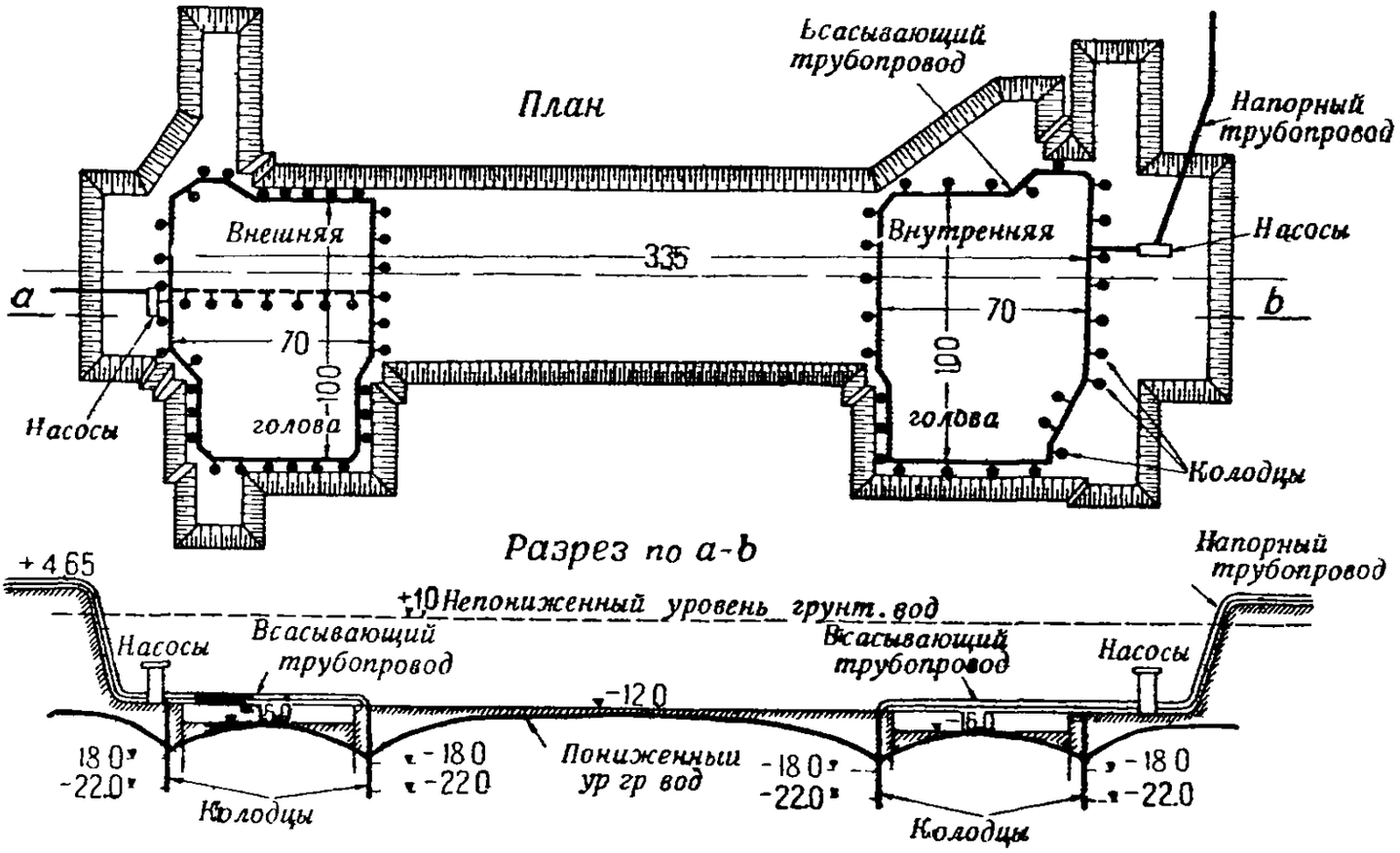


Рис 24

на рис. 25 изображена принятая там система работ. Под защитой понижения первого и второго ярусов была осушена левая часть котлована и только третий ярус, начатый в этой части котлована, был выполнен в виде замкнутого кольца. Развитие кольца шло вслед за отрывкой грунта экскаватором, продвигавшимся слева направо по дну котлована.

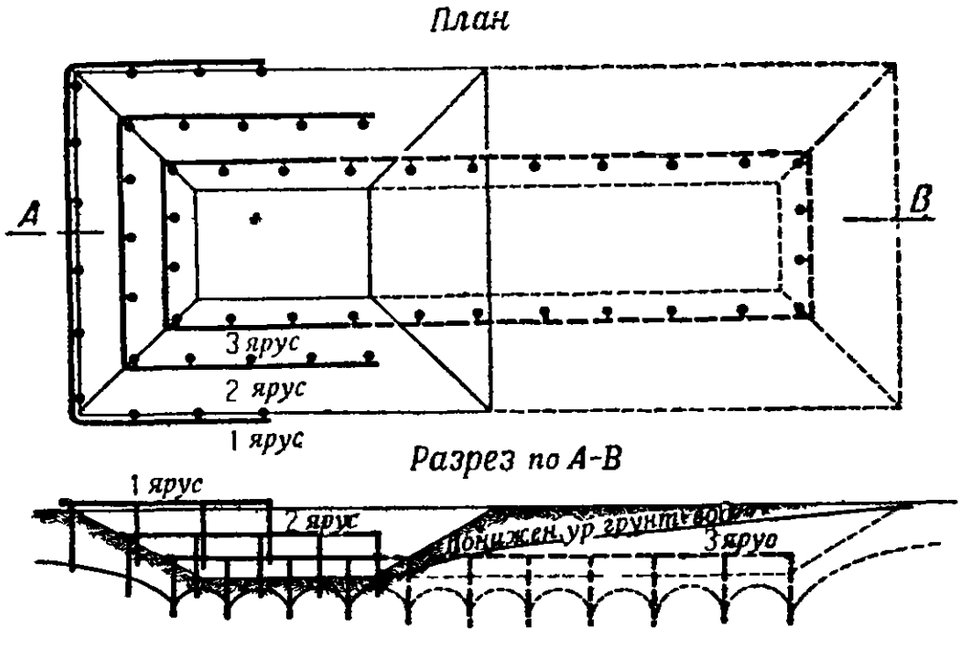


Рис. 25

«Продольные ярусы» были применены еще в 1892 г. Е. Принцем.

Способ этот заключается в том, что сначала под защитой первого яруса производится отрывка грунта на определенном участке (рис. 26) Соседний участок несколько осушается под действием установки понижения первого участка, что позволяет на втором участке произвести отрывку до более низкой отметки по сравнению с отметкой трубопровода первого яруса По достижении на втором участке известного понижения уровня грунтовых вод прокладывается всасывающий трубопровод

второго участка, располагаемыи ниже трубопровода первого участка (уступом)

При действии второго яруса уровень воды опускается еще ниже, причем не только на втором участке, но также на первом и третьем Отрывка тогда продолжается на всех трех участках. Тогда на третьем участке укладывается трубопровод ниже трубопровода второго участка (уступом) и т д

Этот способ с наибольшим успехом применяется при хорошо прони-

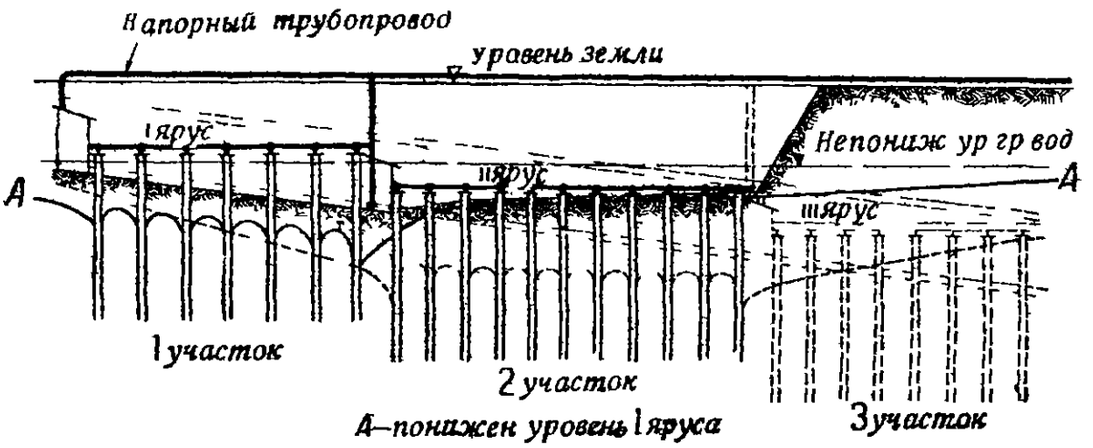


Рис. 26

цаемом грунте и наклонном (в продольном направлении) проектном дне выемки, постепенно разрабатываемой в продольном направлении (например канализация, метрополитен, судоходный канал и т. д.).

При вертикальных стенках котлована для глубокого понижения нашел применение способ так называемых «ступеней в себе».

Этот способ состоит в следующем (рис. 27). Колодцы делаются такой глубины, которая соответствует проектной глубине понижения уровня грунтовых вод, но само понижение производится по частям. Сначала всасывающий трубопровод и насосы располагаются над пониженным уровнем грунтовой воды и производится понижение этого уровня на 3—5 *м*. Вслед за понижением производится отрывка котлована, пока не появится снова грунтовая вода Тогда на этой высоте укладывается новый всасывающий трубопровод и укороченные сверху всасывающие трубы присоединяются к этому новому трубопроводу. Верхний трубопровод разбирается и трубы его идут на дальнейшую укладку трубопровода второго яруса. По достижении новой глубины понижения поступают таким же образом Этот способ дает возможность менее загромождать котлован, чем обыкновенное ярусное понижение, уменьшает общий погонаж бурения, сокращает количество одновременно занятого оборудования и машин, но требует очень хорошего надзора и быстроты переключения колодцев на новый трубопровод.

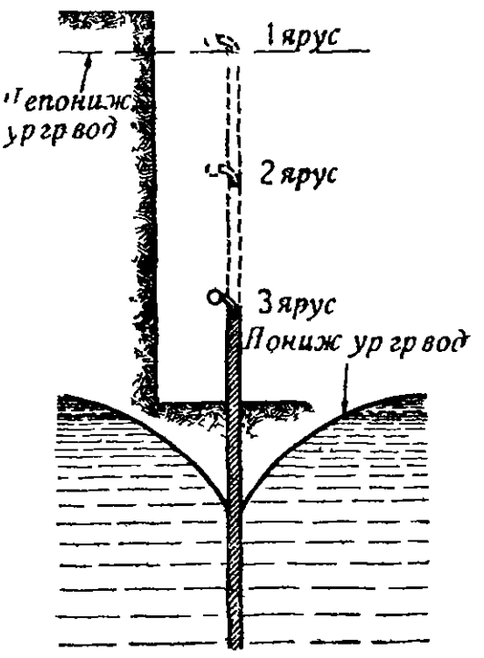


Рис. 27

В случае внезапного прекращения действия насосной установки или усиленного притока воды во время дождей, прорыва воды из соседнего водоема и т п. этот способ сопряжен с опасностью повреждения котлована и соседних сооружений, так как нет верхних ярусов, которые могли бы принять на себя хоть часть работы выведенного из строя или недостаточно мощного нижнего яруса. Особенно большое значение это имеет при напорных водах, так как при остановке водоотлива почти мгновенно восстанавли-

вается естественный напор. Поэтому при применении «ступеней в себе» не только требуется особенно строгий надзор, но и достаточно большой запас водоотливных средств.

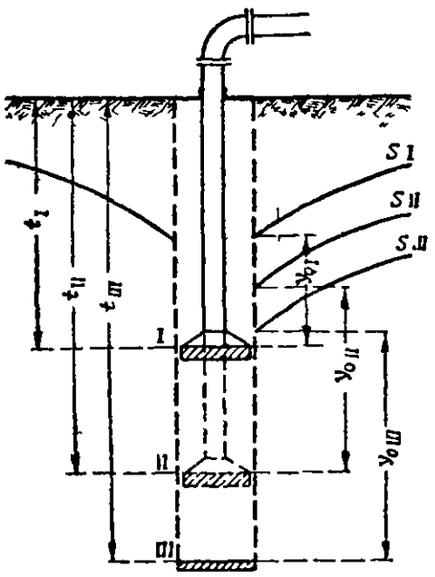


Рис 28

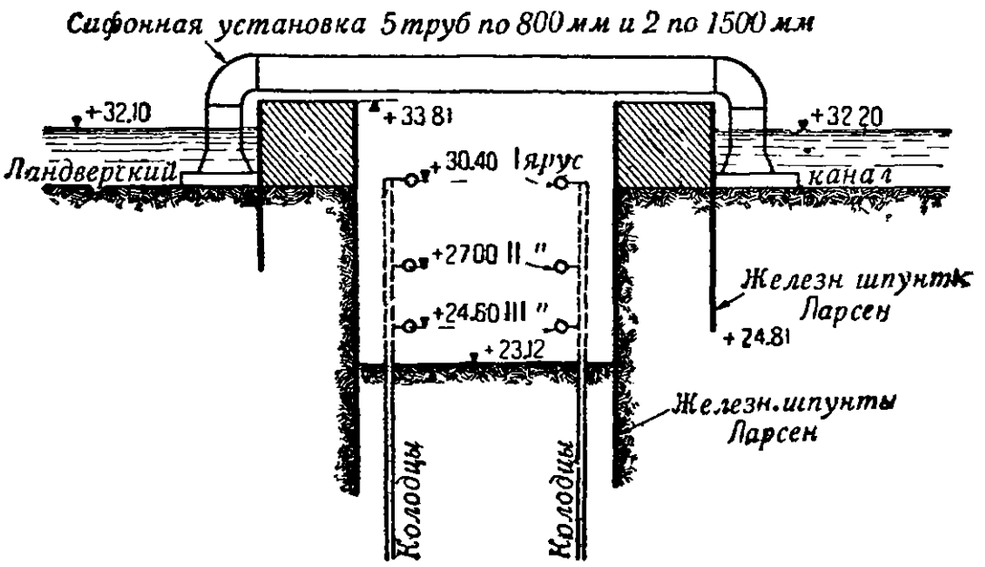


Рис 29

Одним из серьезных недостатков способа «ступеней в себе» является необходимость при понижении уровня в верхних слоях грунта откачивать слишком большие количества воды, так как благодаря большой глубине

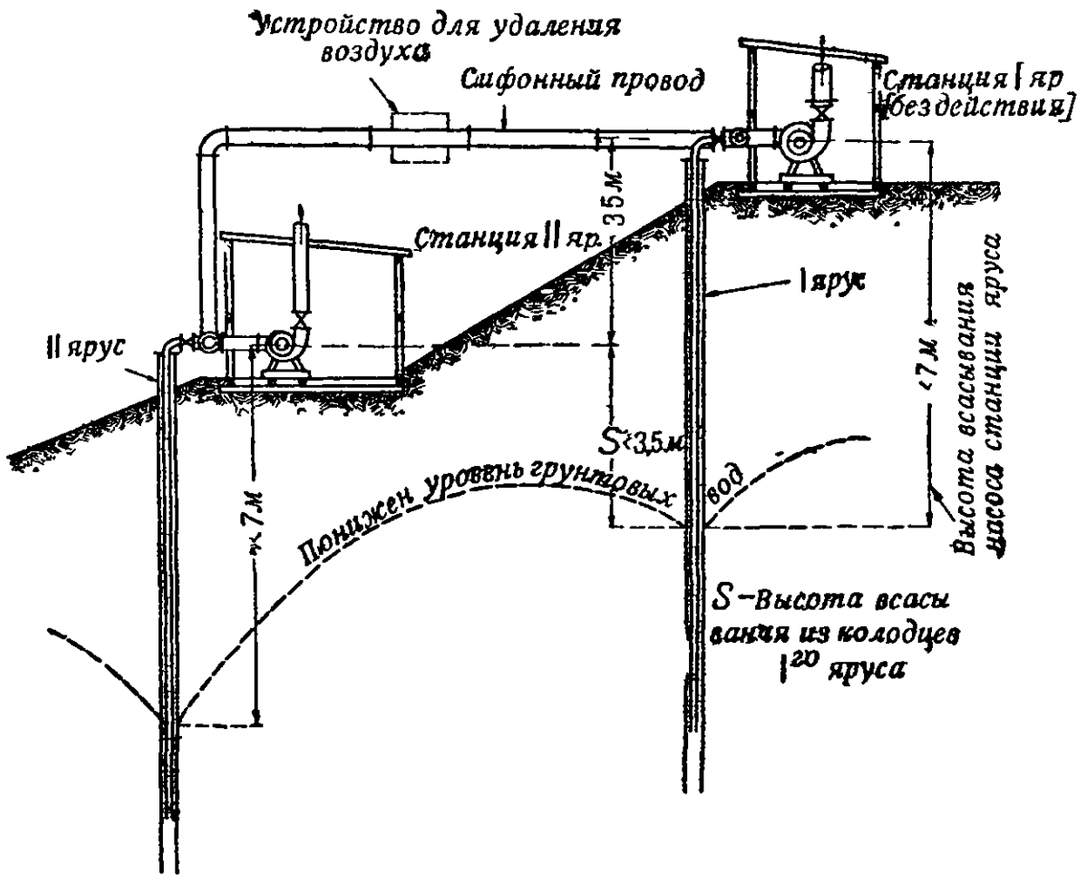


Рис 30

колодцев к последним притекает вода из тех нижних слоев, в осушении которых появляется необходимость только по достижении достаточно большой глубины котлована Таким образом благодаря большой глубине колодцев увеличиваются непроизводительно эксплоатационные расходы. Для устранения этого недостатка фирмой Siemensbauunion разработан особый

диск, герметически отделяющий верхнее рабочее пространство колодца от нижнего, которое временно бездействует. Этот диск опускается в колодец вместе с всасывающей трубой При переключении колодцев на трубопровод следующего нижнего яруса диск вместе с всасывающей трубой передвигается ниже (рис 28).

Пример практического применения «ступеней в себе» схематически представлен на рис. 29.

При устройстве полных ступенчатых установок часто применяют с целью экономии работы насосов сифонное включение колодцев верхнего яруса в трубопровод нижнего При этом однако не рекомендуется убирать насос верхнего яруса, чтобы не подвергать котлован опасности затопления в случае отказа нижнего яруса или усиленного притока воды во время ливня и т. п

Схема сифонного включения представлена на рис 30.

§ 9 УДАЛЕНИЕ ВОЗДУХА

Для пуска в ход (заряжания) сифона и центробежных насосов необходимо прежде всего совершенно удалить из них воздух.

Удаление воздуха из сифонов и всасывающих трубопроводов незначительной длины и малого диаметра можно произвести посредством наполнения их водою при закрытых клапанах и задвижках и при открытом воздушном кране в вершине сифона или — соответственно — в самой верхней точке корпуса центробежного насоса

При этом по мере заполнения трубопровода водой воздух вытесняется в самую высокую точку и оттуда выпускается через отверстие с открытым краном После заполнения водой воздушный кран закрывается и сифон или центробежный насос пускается в ход.

Заполнение водою производится при помощи специального насоса или из водопроводной сети или наконец из нагнетательного трубопровода насоса через обходный трубопровод при закрытой напорной задвижке и открытой задвижке на обходном трубопроводе (рис. 19).

Неудобство такого способа удаления воздуха заключается в неизбежности всасывающих клапанов во всех колодцах и задвижки в нисходящем колене сифона, что вредно отражается на высоте всасывания При больших водопонижательных установках с большой емкостью всасывающей системы труб такой способ удаления воздуха требует значительного количества воды и времени при неизбежном перерыве действия насосов или сифона

Последний недостаток является особо ощутительным благодаря тому, что в процессе работы в сифоне или во всасывающем трубопроводе накопляется воздух, выделяющийся из воды и могущий проникать через отдельные неплотности в стыках трубопровода Если помимо воздуха в воде имеются еще и газы, выделяющиеся при пониженном давлении, то объем скопляющихся в трубопроводе воздуха и газов становится настолько большим, что служит причиной обрыва струи всасываемой воды и следовательно прекращения работы установки. Для восстановления нарушенной работы приходится снова наполнять водой трубопровод и вытеснять воздух и газы, т е работа установки понижения будет итти с перебоями, которые в некоторых случаях (например при напорном режиме грунтовой воды) могут оказаться совершенно недопустимыми

Поэтому сколько-нибудь крупные установки вообще, а мелкие — при отсутствии всасывающих клапанов в колодцах должны иметь приспособления для периодического или непрерывного удаления воздуха и газов из вершин сифонов или соответственно из повышенных пунктов всасывающих трубопроводов без перерыва откачки воды из колодцев. Эти же при-

способления используются и для пуска в ход сифона или бессифонной установки с центробежными насосами.

Если количество воздуха не слишком велико, то в сифонных установках можно применить беспрерывно действующий воздухоудалитель Линдлея, сущность которого заключается в сужении нисходящего колена сифона, благодаря чему скорость движения воды в этом колене увеличивается по крайней мере вдвое и вода увлекает с собою пузырьки воздуха. Чтобы скорость была достаточно велика ($\geqslant 2$ *м/сек*) и при небольшом расходе воды, нисходящий конец разделен на две трубы. В этом случае при большом расходе действуют обе трубы, а при малом расходе одна из труб выключается. Для пуска в ход (заряжания) этого воздухоудалителя в вершинах его нисходящих ветвей устраиваются снабженные кранами воздухоотводные трубки, по которым воздух и газы или выпускаются в атмосферу, или засасываются тем или иным аппаратом для откачки воздуха (паровым или водяным эжектором, вакуумнасосом)

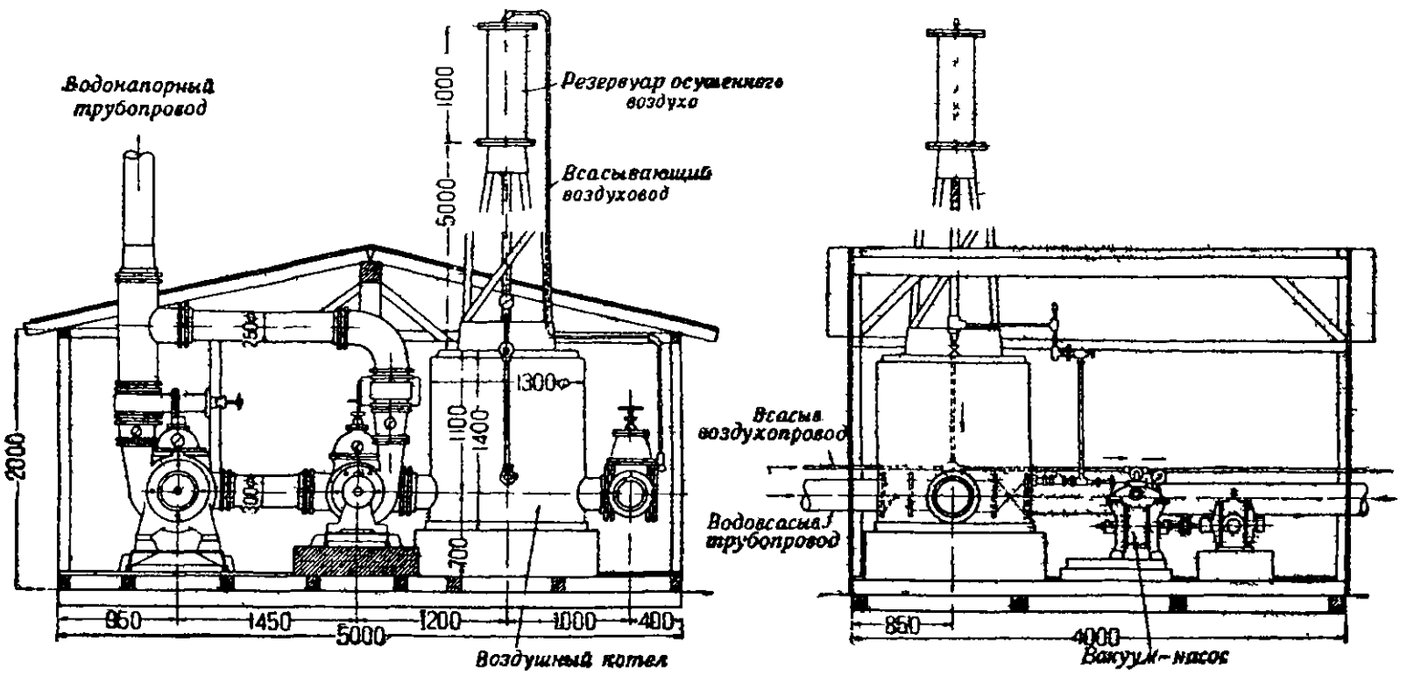


Рис. 31

В малых установках водопонижения для заряжания сифонов и пуска в ход центробежных насосов, а также для постоянного отвода воздуха и газов во время работы установки можно применять автоматические воздухоудалительные аппараты различных типов, описание которых можно найти во многих трудах [1].

Наиболее надежным для пуска в ход и для постоянного удаления воздуха из сифона или всасывающего трубопровода является вакуумнасос. Для наиболее продуктивной работы вакуумнасоса желательно присоединять его посредством воздухопровода не непосредственно к всасывающему трубопроводу, а к установленному в последнем прибору для отделения воздуха и газов от воды, такой прибор становится не только желательным, но и необходимым при так называемых «сухих» вакуумнасосах, т. е. предназначенных только для воздуха и газов, но не смеси последних с водой.

Воздухоотделительные устройства бывают различных конструкций, но основною частью всех их является воздушный котел или колпак, сообщающийся внизу с водовсасывающим трубопроводом, а вверху — с воздухопроводом, по которому воздух и газы засасываются вакуумнасосом.

---

[1] а) Н. Н. Гениев, Водоснабжение, изд. 1931 г.
б) E. Prinz, Hydrologie, изд 1924 г. и русский пер

На рис. 31 представлена схема воздухоотделительной установки системы Siemensbauunion. Подлежащая освобождению от воздуха вода попадает в воздушный котел, в котором мелкие подвижные пузырьки воздуха соединяются в крупные и поднимаются к крышке; отсюда они попадают через трубу высотою около 5 *м* в герметически закрытый сверху резервуар осушенного воздуха. Пузырьки воздуха и газа, которые при движении по вертикальной трубе частично освобождаются от воды, в верхнем резервуаре окончательно осушаются и отсюда поступают по воздухопроводу в вакуумнасос. На рис. 32 представлен фотоснимок описанной воздухоотделительной установки при понижении уровня грунтовых вод во время постройки шлюза в Вемельдинге (Голландия). Насосы для откачки воды и вакуумнасос помещаются в видном на переднем плане деревянном

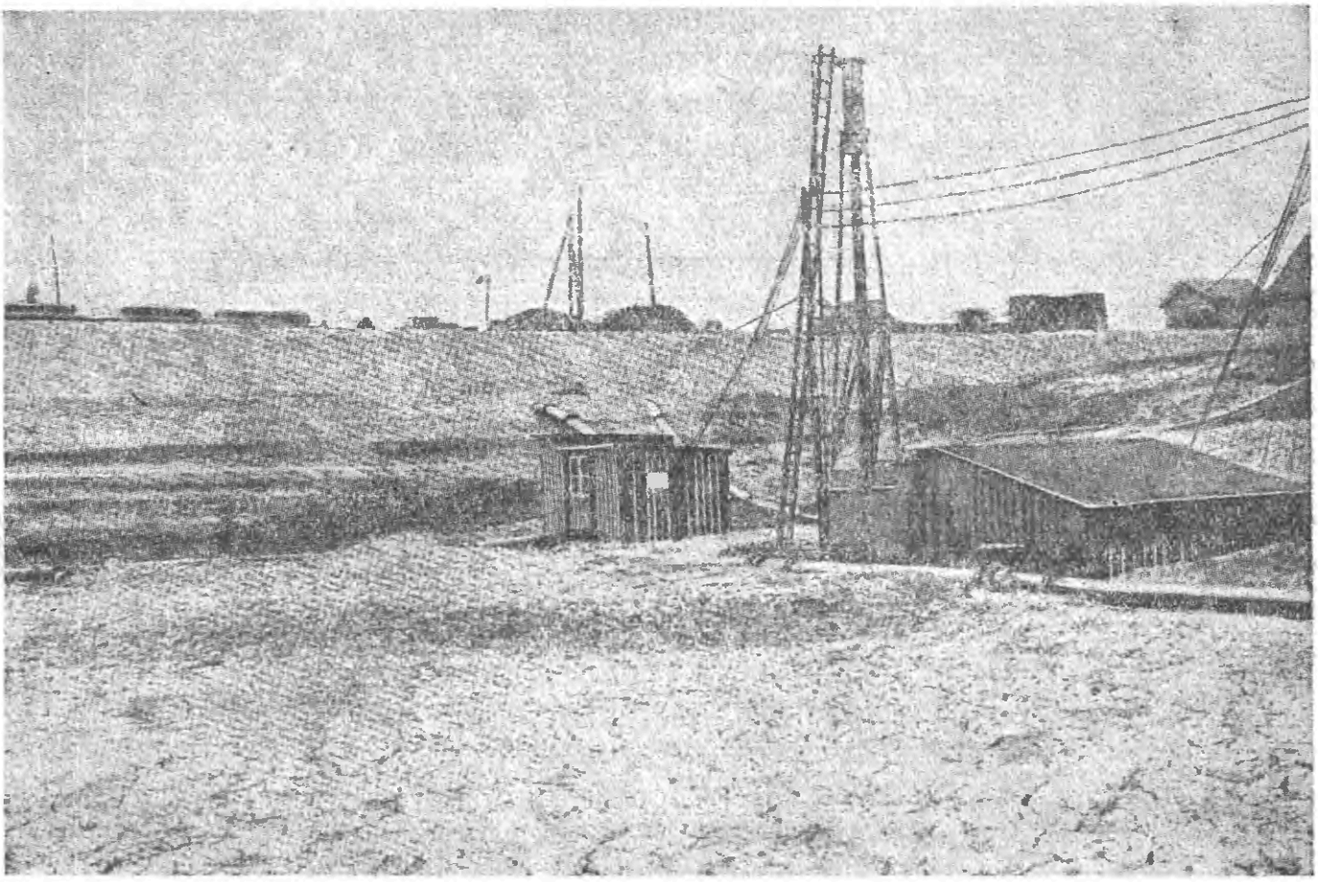


Рис. 32

закрытом помещении, воздухоотделитель и отходящий от него воздухопровод видны слева от этого помещения.

Если грунтовая вода не содержит газов, агрессивно действующих в соединении с водой на металл (сернокислый ангидрид, хлор и т. п.), и если при этом применяется вакуумнасос мокрый, т. е. допускающий отсасывание неосушенного воздуха, то нет надобности устанавливать описанное выше воздухоотделительное устройство с осушителем воздуха, а достаточно иметь невысокие собиратели воздуха в виде вертикальных отростков труб с заглушкой, в которой имеется отверстие для присоединения воздухопровода, по которому воздух отсасывается вакуумнасосом.

§ 10. ГЛУБИННЫЕ НАСОСЫ

Как ни разнообразны способы упрощения ступенчатых установок понижения, последние все же обладают целым рядом очень серьезных недостатков, из которых главными являются стеснение места и большое количество оборудования.

Применение ступенчатого понижения в котлованах с вертикальными стенками из-за тесноты становится иногда совершенно невозможным. Еще более тяжелые условия для ступенчатого понижения создаются при всякого рода углубительных работах под существующими сооружениями и зданиями. Не меньшие затруднения создаются при напорных водоносных слоях, когда надо создать значительное понижение пьезометрического давления, чтобы вода не прорывалась через утоненную и ослабленную водоупорную кровлю водоносного слоя.

В таких случаях прибегают к глубокому понижению одноступенчатого типа, возможному благодаря применению глубинных насосов: 1) эрлифтов, 2) водоструйных водоподъемников, 3) штанговых поршневых насосов, 4) глубинных центробежных насосов с двигателем над устьем колодца, 5) глубинных насосов с двигателем, погружаемым ниже уровня воды в колодце.

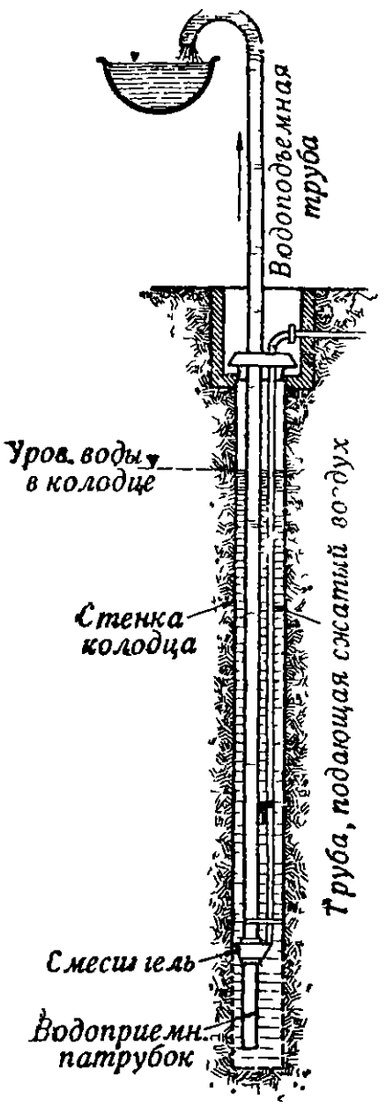


Рис. 33

Подробное описание всех этих типов насосов выходит за рамки настоящей книги. Для выбора типа и размеров насоса для каждого частного практического случая понижения грунтовых вод необходимо обращаться к помощи специальных руководств по насосам и водоподъемникам. Здесь же приводится самая общая сжатая характеристика вышеперечисленных типов глубинных насосов, поскольку это необходимо для выбора самой системы установки понижения грунтовых вод в зависимости от конкретных условий: требуемой глубины понижения уровня грунтовых вод, способа производства земляных и прочих строительных работ, наличия в распоряжении строительства того или иного насосного оборудования и источников энергии, возможности устройства надежных фундаментов для насосных агрегатов и т. д.

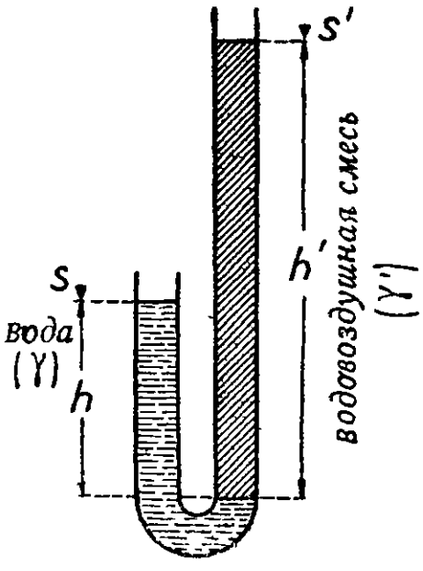


Рис. 34 а

1. Эрлифты

Принцип действия эрлифта (маммут-насоса) основан на образовании при смешении сжатого воздуха с водой водовоздушной смеси, удельный вес которой меньше удельного веса воды (рис. 33).

Если оставить в стороне динамические усилия, которые развиваются благодаря порывистому движению водовоздушной смеси, то эрлифты можно представить в виде U-образной трубки с двумя жидкостями (рис. 34 а). Равновесие выражается уравнением:

$$h\gamma = h'\gamma',$$

где h — высота столба воды, γ — удельный вес воды, h' и γ' — соответствующие величины водовоздушной смеси. Если имеется отверстие в правом колене ниже уровня водовоздушной смеси, то последняя будет изливаться из этого отверстия.

Так как удельный вес водовоздушной смеси γ' обычно составляет не

менее 0,5, то $h_1 \leqslant 2h$, т. е. для возможности работы эрлифта необходимо расположение смесителя (рис. 33) ниже динамического уровня воды в колодце на глубину не менее глубины этого уровня относительно самого верхнего конца водоподъемной трубы.

Во избежание же прорыва части сжатого воздуха непосредственно через столб воды в колодце без смешения с водой и связанного с этим понижения к. п. д. эрлифта желательно смеситель погружать ниже динамического уровня более, чем на глубину последнего относительно вершины водоподъемной трубы.

По различным практическим данным наиболее экономичная зависимость между высотою h подъема воды от динамического уровня и наименьшей глубиной погружения смесителя (форсунки) эрлифта под динамическим уровнем h', а следовательно и наименьшей глубиной колодца H, выражаются следующими таблицами.

Таблица 1

Данные компрессорной фирмы Sullivan

Высота подъема h в *м*	8	15	20	25	30	35	40	45	50
h' в *м*	20	28	30	35	37	40	44	48	52
H в *м*	28	43	50	60	67	75	84	93	102

Таблица 2

Данные Ивенса

Высота подъема h в *м*	8	15	30	45	60
h' в *м*	24	39	54	67,5	78
H в *м*	32	54	84	112,5	138

Из сравнения этих таблиц видно, что глубина колодца для наивыгоднейшего действия эрлифта должна быть для малых высот подъема в 3 раза и для больших высот подъема в 2,5 раза больше высоты подъема, но ни в коем случае не менее двойной высоты подъема.

Сжатый воздух вырабатывается компрессором и подается через аккумулятор в смеситель (форсунку) эрлифта под определенным давлением, соответствующим высоте подъема воды.

Определение потребного количества сжатого воздуха для подъема в единицу времени определенного количества воды при определенной высоте подъема производится по таблицам или эмпирическим формулам, составленным на основании практических наблюдений.

Из нижеследующей табл. 3 инж. В. А. Пушечникова видны приблизительные отношения объема воздуха при нормальном атмосферном давлении (q_2) к объему поднимаемой воды (q).

Более подробные данные и существующие эмпирические формулы здесь не приводятся и могут быть найдены в специальных трудах и справочниках.

Таблица 3

Высота подъема в *м*	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\frac{q_2}{q}$ (по заграничным данным) .	1,66	2,1	2,52	2,92	3,3	3,67	4,03	4,41	5,6	6,5

Размеры водоподъемной и воздушной труб обычно рассчитываются в зависимости от требуемой производительности эрлифта, высоты подъема, рабочего давления компрессора и системы эрлифта. Исходными данными являются скорость водовоздушной смеси у смесителя $v_1 = 2{,}5—3$ *м/сек* и скорость смеси у излива $v_2 = 6—7$ *м/сек*. Тогда площадь сечения водоподъемной трубы будет определяться так:

$$a_2 = \frac{q + q_2}{v_2},$$

где q — производительность эрлифта в *м³/сек*, q_2 — количество воздуха в *м³/сек*, определяемое по эмпирическим формулам или таблицам (см. например ориентировочную табл. 3). По вычисленной a_2 находят подходящий диаметр водоподъемной трубы. Диаметр воздушной трубы обычно в 2—3 раза меньше водоподъемной.

Для ориентировочного представления о производительности эрлифтов с различными диаметрами ниже приведена таблица опытных данных для высоты подъема около 30 *м*.

Таблица 4

Производительность эрлифта при высоте подъема около 30 *м*

Диаметры труб в *мм*		Производительность системы в *л/сек*		Примечание
водоподъемной	воздушной	первой	второй	
25	12	0,4 — 0,5	—	Первая система
38	19	1,3 — 1,5	—	Воздушная труба расположена рядом с водоподъемной (рис. 33)
50	25	2,25— 3,25	1,5— 2,4	
62	25	3,8 — 4,0	3,0— 3,5	Вторая система
75	32	5,5 — 6,0	4,2— 5,0	Воздушная труба расположена внутри водоподъемной концентрически
100	38	12,5 —13	6,3—10	
125	38	16 —18	13 —15	
150	50	23 —30	17 —24	

Отношение объема потребного воздуха к объему поднимаемой воды зависит не только от высоты подъема воды, от конструкции форсунки и диаметров водоподъемной и воздушной труб, но и от степени правильности эксплоатации эрлифта.

Если по оси абсцисс отложить массы потребляемого воздуха, а по оси ординат — количество поднимаемой воды, то кривая сначала будет подниматься, а затем по достижении известного максимума, соответствующего вершине кривой, количество поднимаемой воды начинает уменьшаться (рис. 34 б).

Следовательно для откачки определенного количества воды можно было бы ограничиться меньшим из двух количеств потребляемого воздуха и тем достигнуть удовлетворительного к. п. д. эрлифта. Однако на практике в большинстве случаев стремятся не столько к получению наивыгоднейшего к. п. д., сколько к откачке из одного колодца возможно большего количества воды, чтобы при возможно меньшем количестве колодцев добиться желаемого понижения уровня грунтовых вод. Поэтому обыкновенно расходуют воздуха больше, чем требуется для получения наивыгоднейшего к. п. д.

Если при максимальной подаче воды к. п. д. эрлифта теоретически не превышает 37%, то на практике обычно он не превосходит 20—25%.

Эрлифты обладают многими ценными качествами: простотой устройства и ухода, отсутствием движущихся и трущихся частей, легкой приспособляемостью к изменениям дебита колодцев, возможностью увеличения и уменьшения глубины понижения уровня грунтовой воды в отдельных местах (путем надлежащей регулировки подачи воздуха к соответствующим колодцам). Вместе с тем эрлифты имеют также и значительные недостатки: высокую стоимость установки (компрессорная станция, воздухопроводы), неизбежный перерасход сжатого воздуха, а следовательно малый к. п. д. и наконец необходимость применения чрезмерно глубоких скважин, а отсюда — преувеличенный дебит установки.



Рис. 34 б

Наиболее крупное понижение уровня грунтовых вод с применением эрлифтов было произведено до войны 1914 г. при постройке тоннелей под р. Шпрее у Яновицбрюкке (Janowitzbrücke) и Инзельбрюкке (Inselbrücke) для метрополитена в Берлине, причем получились следующие результаты:

а) к. п. д. всех вместе эрлифтов колебался от 0,12 до 0,20;

б) при взаимодействии эрлифтов и центробежных насосов к. п. д. эрлифтов падал до 0,07;

в) при понижении уровня воды в колодцах от 9 до 12 *м*, считая от поверхности земли, глубина колодцев составляла 25 *м*, т. е. в 2—3 раза больше глубины динамического уровня.

2. Водоструйные водоподъемники

(эжекторы)

Принцип действия водоструйного эжектора (рис. 35) состоит в том, что при прохождении нагнетаемой воды снизу вверх с большою скоростью через сужение *d* трубы *a* создается вакуум, а вода из колодца через коническую трубку *e* засасывается, смешивается с нагнетаемой водой и выбрасывается через трубу *a* на поверхность под тем напором, который устанавливается по миновении водою сужения *d*. Вода нагнетается поршневым или центробежным насосом, находящимся на поверхности земли, в напорный трубопровод и далее вниз по вертикальной наружной трубе *b* до коробки *n*, где меняет направление течения на противоположное, устремляется вверх через сужение *d* и, смешавшись здесь с откачиваемой колодезной во-

дой, поднимается по внутренней трубе *a*. Напор $H_к$, под которым подается рабочая вода, в несколько раз больше высоты подъема воды эжектором H, причем чем больше отношение рабочего напора к высоте подъема $\frac{H_k}{H}$, тем меньше расход рабочей воды для подъема определенного количества воды. По данным завода Кертинга (Германия) 1 *л* рабочей воды может подать количество воды, указанное в табл. 5 [1].

Таблица 5

$\frac{H_k}{H}$	2	3	4	6	9	12,5	20	30	50	75	100
Подача воды в *л*	0,3	0,7	1,0	1,4	2,0	2,5	3,3	4,4	6,0	7,5	9,0
Коэфициент полезного действия η	0,15	0,23	0,25	0,23	0,22	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,09

Достоинства эжекторов заключаются в отсутствии каких-либо движущихся частей, в простоте конструкции, монтажа и ухода, в надежности действия даже при воде грязной, с илом и песком.

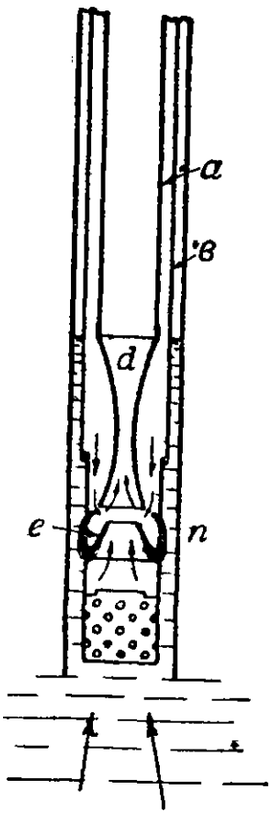


Рис. 35

Недостатками эжекторов являются весьма низкий к. п. д. и необходимость толстостенных напорных трубопроводов для подачи рабочей воды (при больших $\frac{H_к}{H}$) или же несоразмерно большого сечения (при малых $\frac{H_к}{H}$).

Поэтому эжекторы в современном своем виде для сколько-нибудь крупных установок понижения грунтовых вод применения не получили и даже для малых установок применяются в исключительных случаях: при низкой стоимости энергии, при краткосрочности действия и малых размерах установки, при наличии на строительстве временно свободных труб и наконец за неимением или невозможностью своевременного получения глубинных насосов другого типа. У нас известны едва ли не единственные два случая применения эжекторов в очень малых понизительных установках, а именно при постройке в 1922 г. водозаборного колодца Симоновской водокачки Московско-Казанской железной дороги в Москве, где были установлены 12 эжекторов Кертинга производительностью каждый до 0,5 *л/сек* при напоре рабочей воды 6 *ат*, и также в Москве на одной небольшой установке, проведенной под руководством М. Е. Кнорре.

Тем не менее отмеченные выше достоинства эжекторов сделали бы применение их весьма желательным, если бы путем усовершенствования конструкции удалось повысить их к. п. д. и избежать очень высоких рабочих напоров

3. Штанговые поршневые насосы

Штанговые поршневые насосы бывают: а) однопоршневые или одинарного действия; б) двухпоршневые или двойного действия; в) трехпоршневые или тройного действия.

[1] Проф. А. А. Сурин, Водоснабжение, ч. II, изд. 1932 г.

Штанговые насосы состоят из следующих основных частей: подводного подвесного цилиндра, подвесной нагнетательной трубы, штанг и верхнего подъемного механизма.

На нижнем конце цилиндра простого действия (рис. 36) имеется отверстие с всасывающим клапаном *a*, ниже которого расположена всасывающая труба На верхнем конце цилиндр при помощи муфты *b* присоединяется к подвесной нагнетательной трубе *c*, оканчивающейся над устьем колодца тройником-сальником *d*. В цилиндре движется поршень *e* с клапаном *f* К верхнему концу поршня присоединен шток поршня *g*, соединяемый за пределами цилиндра при помощи муфты со штангой. Штанга, состоящая из круглых сплошных или трубчатых толстостенных звеньев, соединяется при помощи муфты со штоком *i* лебедки.

Подвесная нагнетательная труба состоит из газовых или буровых звеньев, соединяемых при помощи обыкновенных нарезных муфт Внутренний диаметр подвесной трубы выбирается несколько больше внутреннего диаметра цилиндра для возможности извлечения или установки поршня без извлечения цилиндра и самой подвесной трубы

Верхний подъемный механизм (лебедка) состоит из основной рамы *h*, сальниковой коробки *d*, штока *i*, шатуна *m*, кривошипного механизма *n* и приводных колес *p*.

Насосная лебедка имеет или ременную передачу от любого двигателя, или зубчатую от мотора, непосредственно установленного на лебедке (рис 37).

Схема действия однопоршневого штангового насоса следующая· когда поршень поднимается вверх (рис. 36), клапан его *f* закрыт и под ним образуется разреженное пространство Под давлением столба воды в колодце всасывающий клапан *a* открывается вверх и вода поступает в цилиндр под поршень При обратном движении поршня вниз клапан его *f* под давлением воды снизу открывается и вода переходит в часть цилиндра над поршнем, в то время как всасывающий клапан оказывается закрытым под давлением воды в цилиндре.

При новом подъеме поршня происходит снова всасывание воды под поршень, тогда как последний давит снизу вверх на воду, находящуюся над ним, и вытесняет ее по нагнетательной трубе на дневную поверхность.

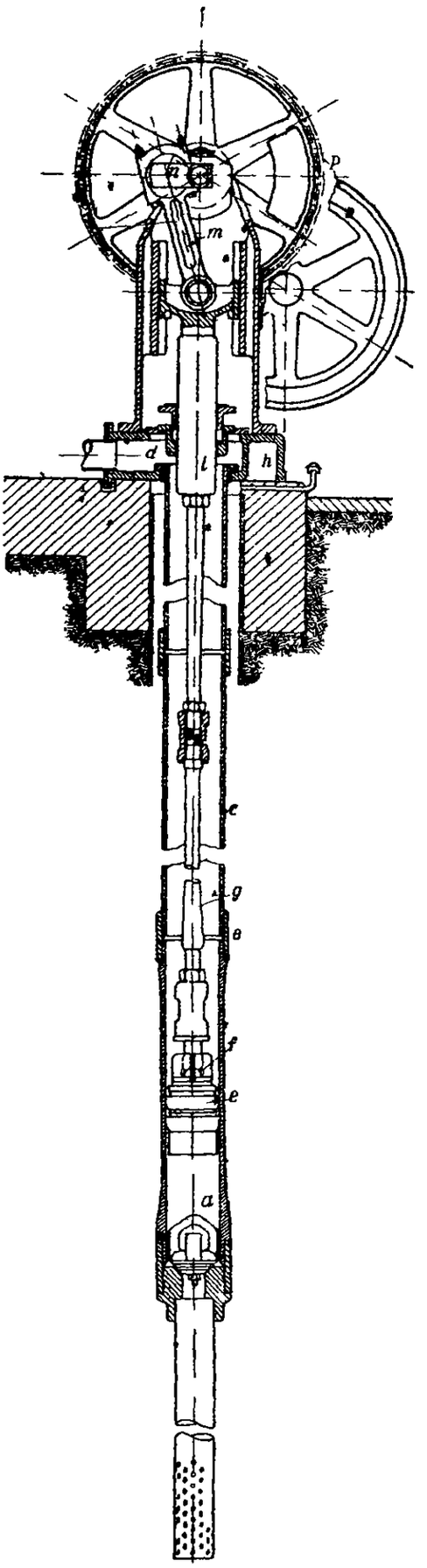


Рис. 36

Переход поршня из самого верхнего положения подъема к началу опускания и от самого нижнего положения опускания к началу подъема

сопряжен с гидравлическими ударами, вызывающими сотрясения и добавочные напряжения в штангах и приводном механизме, что вредно отражается на прочности последних. Благодаря тому что вес штанг и других движущихся частей при ходе поршня вниз направлен в сторону движущего усилия, а при ходе поршня вверх — прямо против него, требуется различная затрата работы для движения поршня вверх и вниз, а это приводит к неравномерному ходу насоса, к появлению сил инерции, вызывающих также добавочные напряжения в штангах и приводном механизме, и к снижению к. п. д.

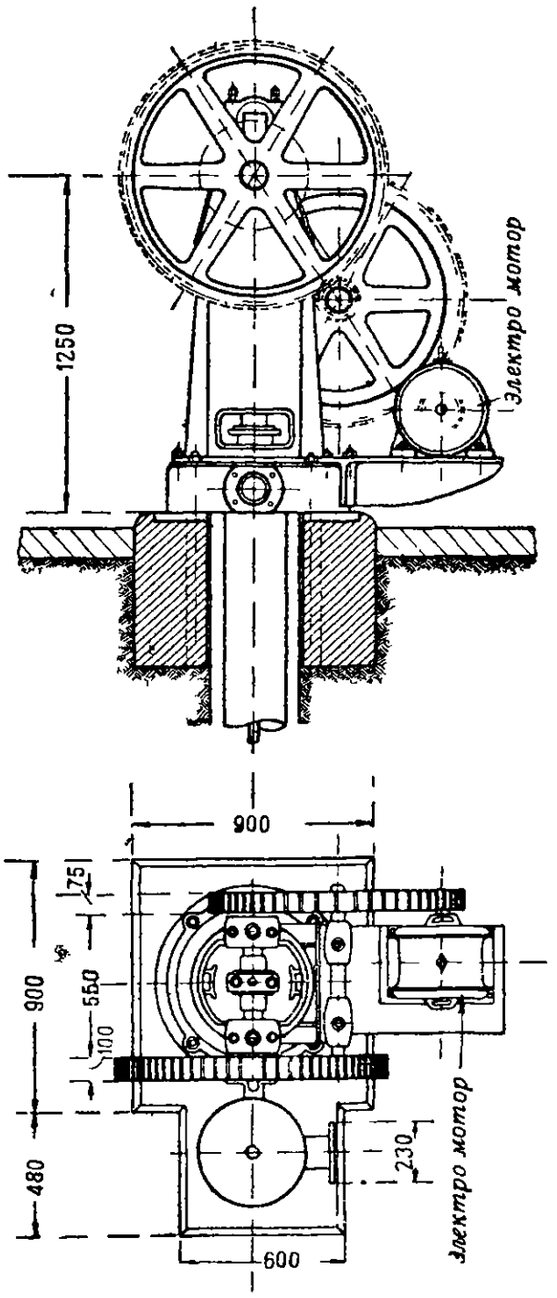


Рис. 37

Эти недостатки ослаблены (но не устранены) в штанговых насосах двойного действия, цилиндр которых (рис. 38) имеет всасывающий клапан *c* и два поршня *a* и *b* с клапанами, открывающимися вверх. Шток верхнего поршня пустотелый, через него проходит шток нижнего поршня.

Действие насоса происходит следующим образом. Поршни *a* и *b*, расположенные один выше другого, движутся благодаря особому устройству приводного механизма в противоположных направлениях: один поршень *a* движется вверх и выталкивает воду в нагнетательную трубу, в то время как нижний поршень *b* движется вниз, перепуская воду из нижней части цилиндра в пространство между обоими движущимися поршнями. Когда поршень *a* дойдет до высшего положения и поршень *b* — до низшего, они меняют движение на противоположное, т. е. поршень *a* начинает двигаться вниз, перепуская воду в верхнюю часть цилиндра, а поршень *b* движется вверх, образуя вакуум под собой, благодаря чему вода из колодца всасывается под поршень *b*.

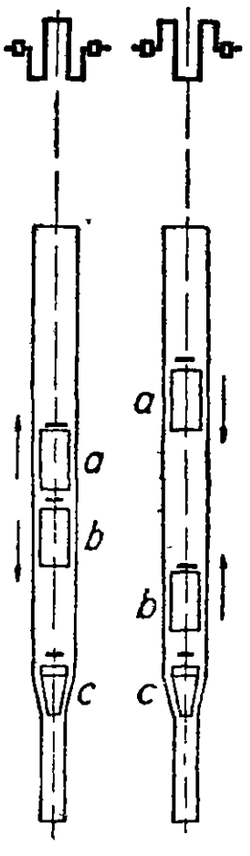


Рис. 38

Подвесная нагнетательная труба для цилиндра двойного действия не отличается от такой при цилиндрах простого действия. Штанги при этих насосах двойные: наружные трубчатые (обычно газовые трубы) и внутренние полнотелые. Наружные штанги соединяются со штоком верхнего поршня, а внутренние — со штоком нижнего поршня.

Приводная лебедка (рис. 39) имеет кривошипный механизм *a* в виде коленчатого вала для приведения в движение внутренних штанг и на том же валу — внешние диски или зубчатые колеса *b* и *c* с пальцами, посаженными под углом 180° к кривошипу внутренних штанг для приведения в движение наружных штанг через два боковых шатуна *d* и поперечной

траверсы *e* с направляющими Поперечная траверса имеет сальник *f* для пропуска штока внутренних штанг.

На рис 39 представлена лебедка насоса двойного действия с непосредственным приводом от электромотора

Ввиду большой массы движущихся штанг и возникающих поэтому значительных сил инерции число двойных ходов поршней штанговых насосов обыкновенно невелико, а именно 20—30 в 1 мин, и лишь при небольшой глубине колодцев может быть увеличено до 35—40.

Благодаря описанному выше взаимно противоположному движению поршней и взаимному уравновешиванию двух колонн штанг двухпоршневых насосов к. п. д. их вообще больше, чем однопоршневых. При одном и том же числе оборотов рабочего вала лебедки и длине хода каждого поршня производительность двухпоршневого насоса значительно больше (почти вдвое) производительности однопоршневого насоса с таким же диаметром цилиндра.

Для характеристики размеров, предельной высоты подъема и производительности однопоршневых и двухпоршневых насосов в табл. 6 и 7 приведены данные, заимствованные из каталога одной из американских фирм

Приведенные в таблицах данные, понятно, не являются всеобщими (различные заводы изготовляют эти насосы с несколько иными данными), но для решения общего вопроса о применении того или иного типа и размеров насоса в каждом конкретном случае эти данные вполне достаточны

Из приведенных таблиц видно, что двухпоршневые штанговые насосы значительно более производительны и имеют гораздо большую высоту подъема, чем однопоршневые при одних и тех же габаритных размерах.

Сравним однопоршневые и двухпоршневые насосы почти одинакового наружного диаметра и хода поршня.

Однопоршневый — ход поршня 500 *мм*, наружный диаметр цилиндра 128 *мм*.

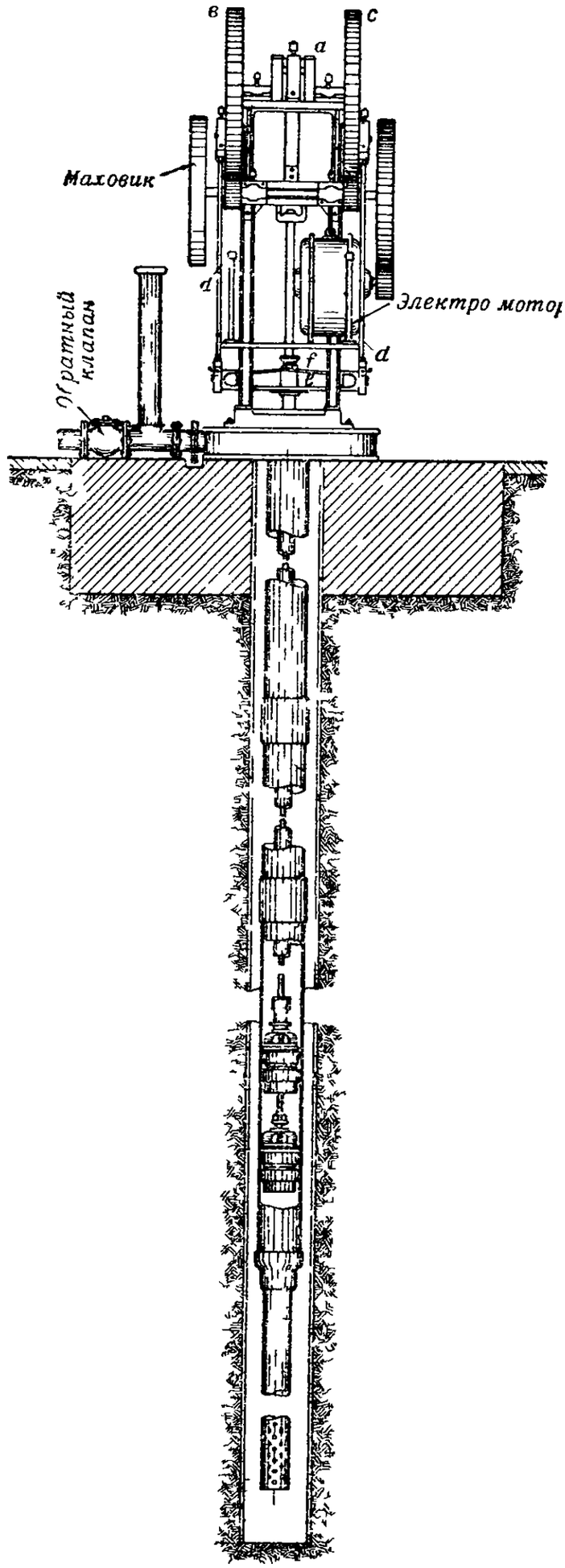


Рис 39

Таблица 6

Насосы однопоршневые

Размеры цилиндра, в *мм*			Число ходов в минуту *n*	Высота подъема в *м*	Производительность в *л/сек*	Вес приводного механизма в *кг*
ход поршня	внутренний диаметр	наружный диаметр				
350	56	87		100	0,35	
	69	96		82	0,52	
	80	106		67	0,70	
	90	130		48	0,87	
	103	142		40	1,05	
	109	153		30	1,35	164
	132	180	30	22	2,00	
500	69	96		82	0,75	
	80	105		67	1,00	475
	93	128		52	1,35	
	103	143		45	1,65	
	109	153		37	1,85	
	132	180	25	30	2,70	

Таблица 7

Насосы двухпоршневые

Размеры цилиндра в *мм*			Число ходов в мин. *n*	Высота подъема в *м*	Производительность в *л/сек*	Вес приводн. механизма в *кг*
ход поршня	внутренний диаметр	наружный диаметр				
450	93	128		150	2,30	
	118	160		127	3,70	
	144	184		97	5,50	
	166	220		60	7,30	2214
	194	235	25	45	10,00	
450	194	235		160	10,00	
	220	275		142	13,00	
	235	300		105	14,50	
	285	350	25	67	21,00	4150

Двухпоршневый — ход 450 *мм*, диаметр цилиндра 128 *мм*.

Производительность первого 1,35 *л/сек*, второго — 2,30 *л/сек*, т. е. почти вдвое больше.

Таким образом двухпоршневый насос при одинаковом наружном диаметре и вдвое большей длине цилиндра отличается производительностью, почти в 2 раза большей однопоршневого.

Если прибавить к этому значительно более плавную работу двухпоршневого насоса, ослабление гидравлических ударов и расстройства нагнетательных труб и клапанов, то для глубоких колодцев с большой высотой подъема и большим дебитом преимущество остается за двухпоршневым насосом

Так как двойная длина цилиндра двухпоршневого насоса по сравнению с однопоршневым не имеет отрицательного значения для глубоких колодцев, тогда как увеличение диаметра цилиндра, а следовательно и колодца весьма существенно затрудняет и удорожает производство понижения уровня грунтовых вод, то и с экономической стороны при большом дебите преимущество остается за двухпоршневым насосом. В самом деле, если необходимо обеспечить откачку воды из колодца в указанном выше количестве 2,3 *л/сек*, то пришлось бы применить однопоршневый насос с наружным диаметром 180 *мм*. Таким образом диаметр колодца пришлось бы увеличить почти в 1,5 раза при замене двухпоршневого насоса однопоршневым. С другой стороны, при малом дебите колодца преимущество остается за однопоршневым насосом, а при очень малом дебите (мелкозернистый водоносный слой, разведочная скважина малого диаметра) двухпоршневый насос был бы совершенно непригоден или малопригоден, так как уменьшение числа ходов связано с необходимостью устройства промежуточной передачи приводного механизма, с неполнотой наполнения цилиндра, с толчкообразным наполнением и опорожнением скважины водой и связанными с этим отрицательными влияниями на насос, фильтр и т. д.

Помимо этого следует считаться с более сложным устройством и большей стоимостью приводного механизма двухпоршневого насоса, с необходимостью более сложного его монтажа и со значительно большим весом этого механизма: приводной механизм однопоршневого насоса диаметром 128 *мм* и ходом поршня 500 *мм* весит 475 *кг*, тогда как приводной механизм двухпоршневого насоса того же наружного диаметра при ходе поршня 450 *мм* весит 2214 *кг*. Для установки такого приводного механизма требуется гораздо более надежный фундамент, чем для однопоршневого, и вообще его монтаж значительно сложнее.

Из приведенного сравнения одно- и двухпоршневых насосов вытекает, что в зависимости от той или иной конкретной обстановки оба типа могут найти применение: при малых дебитах и высотах подъема придется применять однопоршневые, при больших (сравнительно) дебитах и высотах подъема — двухпоршневые.

Штанговые насосы могут быть также и трехпоршневые, обеспечивающие еще большую производительность.

При постройке некоторых участков метрополитена в Берлине были применены еще до империалистической войны 1914—1918 гг. трехпоршневые насосы системы Сименс-Шуккерта. Но ввиду сложного устройства, сложности монтажа и ухода эти насосы при понижении уровня грунтовых вод дальнейшего широкого применения в Германии не получили.

Для установок понижения уровня грунтовых вод особо существенным недостатком штанговых поршневых насосов является необходимость установки сложного приводного механизма с двигателем над устьем каждой скважины. Для установки приводного механизма требуется устройство надежного фундамента, обеспечивающего постоянное горизонтальное и строго центрированное положение фундаментной плиты. Кроме того ввиду большого количества движущихся частей приводной механизм должен быть защищен от дождя и пыли особой будкой.

Самая сборка насосного агрегата и установка его в скважине представляют также большое неудобство в обычных условиях производства временного понижения уровня грунтовых вод.

Сложность монтажа и ухода, частая порча при небольшом к. п. д. являются причинами того, что поршневые штанговые насосы не имеют широкого употребления при понижении уровня грунтовых вод. Эти отрицательные свойства штанговых насосов стали особенно заметны с появлением центробежных глубинных насосов с погружаемым в воду электромотором.

Однако стоимость этих последних столь высока, а чувствительность их к воздействию воды при современных конструкциях так велика, что поршневые штанговые насосы еще будут находить применение в практике глубокого понижения уровня грунтовых вод наряду с другими типами глубинных насосов.

При постройке московского метрополитена однопоршневые штанговые насосы нашли очень широкое применение. Этому благоприятствовали весьма малые дебиты колодцев, с одной стороны, и применение облегченного приводного механизма, легко устанавливаемого над скважиной и смонтированного на деревянной станине — с другой.

В общих чертах лебедка московского Метростроя (рис. 40 а) имеет следующее устройство. Роль кривошипного механизма выполняет диск *а*

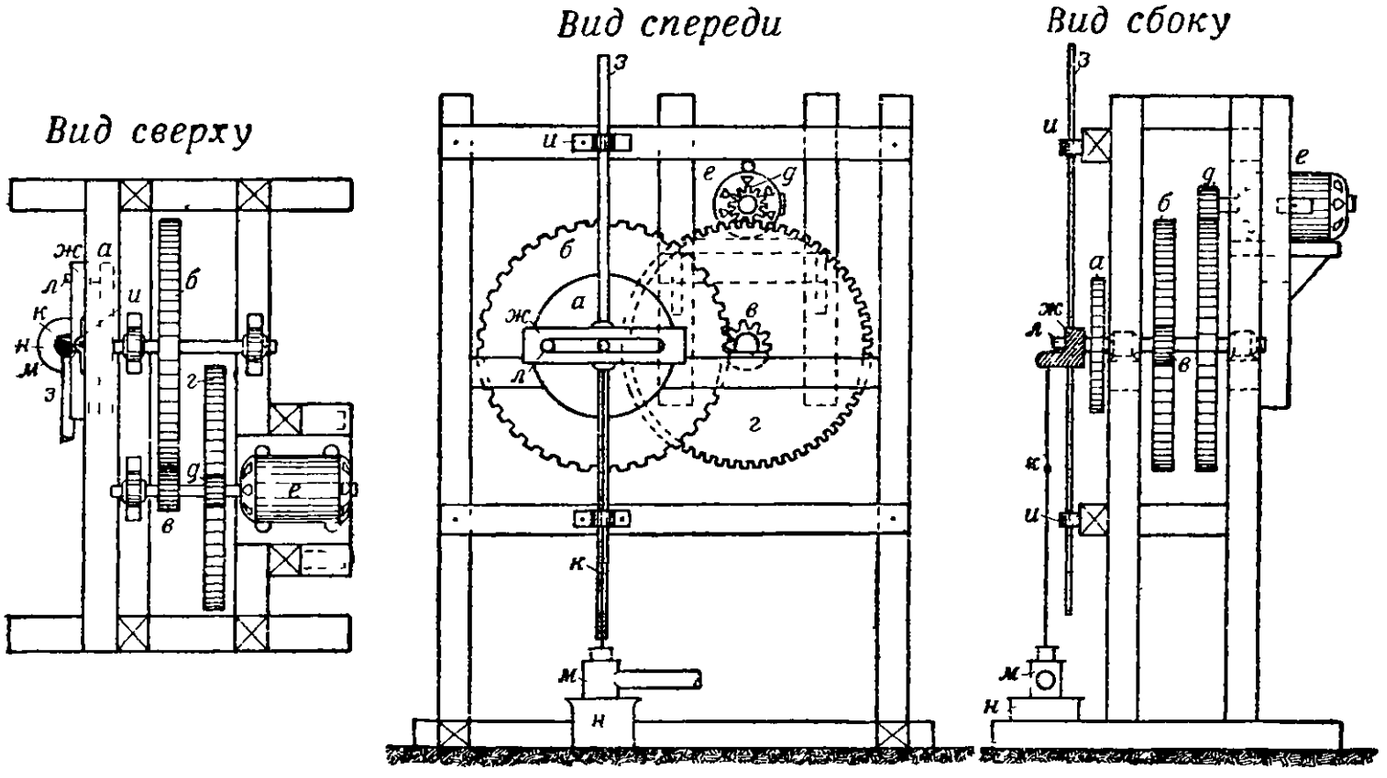


Рис. 40 а

с эксцентрично укрепляемым на нем пальцем *л*, свободно скользящим в горизонтальной щели траверсы *ж*, которая благодаря направляющим стержням *з*, скользящим в муфтах *и*, может свободно перемещаться вертикально вверх и вниз, поднимая и опуская штангу поршня. На одном валу с диском *а* насажено зубчатое колесо *б*. Это колесо, а вместе с ним и диск *а* получают вращение от шестеренки *в*, насаженной на общий вал с зубчатым колесом *г*. Последнее имеет зубчатое сцепление с шестеренкой *д*, наглухо насаженной на валу электромотора *е*. К траверсе *ж* прикреплена штанга насоса *к*, проходящая через сальник подающей трубы *м*, опущенной в колодец *н*. Подшипники обоих валов передаточных колес, электромотор и муфты *и* укреплены на станине, составленной из деревянных брусков.

Действие насоса заключается в следующем.

Электромотор *е*, развивающий большое число оборотов, заставляет при помощи шестеренки *д* вращаться с меньшим в несколько раз числом оборотов зубчатое колесо *г*. Насаженная на общем валу с последним зубчатая шестеренка *в* приводит в движение зубчатое колесо *б*, делающее число оборотов, еще в несколько раз меньшее, чем колесо *а*. С таким же числом оборотов вращается диск *а*. Палец *л* увлекает за собой траверсу *ж* вверх и вниз, причем траверса перемещает-

ся без поворота, что обеспечивается вертикальным движением направляющих *з* в муфтах *и*. а вместе с тем возможностью горизонтального перемещения пальца *л* вдоль щели траверсы *ж*. Траверса при своих движениях вверх и вниз увлекает за собой штангу *к*, заставляя то подниматься, то опускаться поршень насоса и подавать воду, выбрасываемую через подъемную трубу *м* с отростком, отводящим воду в водоотводный лоток.

Диаметры колес подбираются так, чтобы число двойных ходов поршня было 20—35 в 1 мин. Эксцентриситет пальца диска может изменяться путем передвижки пальца в специальной щели диска и закрепления его в требуемом положении, обеспечивающем ту или иную длину хода поршня (от 20 до 40 *см*). Сравнительная простота сборки и обслуживания и возможность изготовления в механических мастерских строительства позволили Метрострою применить эту лебедку в очень широких размерах.

На строительстве канала Волга — Москва был применен в 1934 г. приводной механизм (рис. 40б) в виде жестких тяг *а* с коленчатыми рычагами *б*, посредством которых один электромотор *в* с лебедкой *г* приводит в движение до 8 штанговых однопоршневых насосов, установленных в колодцах *д* для понижения уровня грунтовых вод.

Приводимая в движение от электромотора лебедка при помощи своего кривошипного механизма передвигает попеременно в одну и другую сторону горизонтальную тягу, составленную из газовых труб.

В определенных местах к тяге при помощи шарнира *е* присоединяются верхние концы коленчатых рычагов первого рода. точка опоры которых шарнирно присоединена к концу *ж* железной полосы или стержня, вбитого в сваю *з*, прочно забитую около соответствующего колодца. Другой конец каждого коленчатого рычага соединен шарнирно с головкой *и*

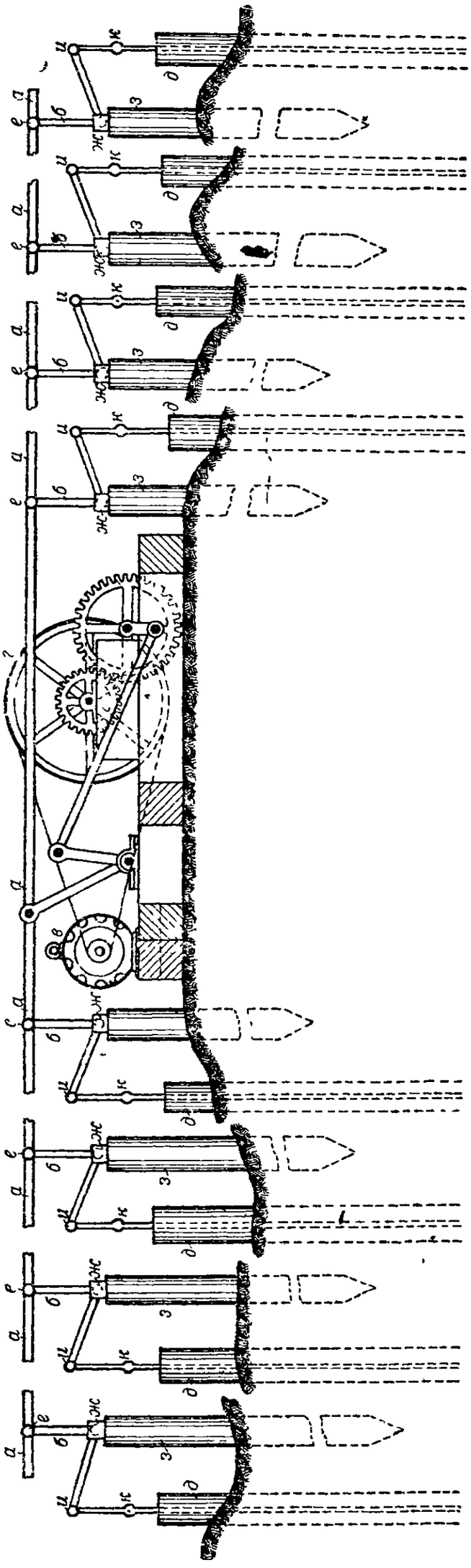


Рис. 40 б

шатуна, другой конец которого также шарнирно соединен со штангой насоса *к*.

При движении горизонтальной тяги влево штанги и поршни насосов, расположенные слева от лебедки, опускаются вниз, в то время как штанги и поршни насосов справа от лебедки поднимаются вверх. При обратном движении тяги (направо) штанги и поршни совершают обратное движение. При таком устройстве привода происходит взаимное уравновешивание штанг левой и правой от лебедки частей установки, благодаря чему получается выравнивание работы насосов и уменьшаются вредные силы инерции.

4. Глубинные центробежные насосы с двигателем над устьем колодца

Для откачки воды из глубоких колодцев применяются центробежные насосы с вертикальным валом, соединяемым посредством длинного трансмиссионого вала с вертикальным валом установленного над устьем колодца электромотора (рис. 41, *а* и *б*) или горизонтального шкива, получающего вращение посредством ременного привода от электромотора или какого-либо другого двигателя (рис. 41, *в*).

Центробежный насос, подвешенный на своей нагнетательной трубе к станине электромотора или к хомуту над устьем колодца, опускается в последний ниже статического и даже нередко ниже динамического уровня воды. Как видно из рис. 41, *б*, трансмиссионный вал помещается внутри нагнетательной трубы насоса, соединяется вверху посредством эластичной муфты с валом мотора (или промежуточного приводного механизма), внизу посредством нарезной муфты — с валом насоса и снабжен несколькими направляющими подшипниками (в виде спицевых колес), зажатыми между фланцами нагнетательной трубы.

Вертикальный трансмиссионный вал составляется из отдельных звеньев длиною 2—2,5 *м*, соединяемых посредством нарезных муфт; промежуточные ведущие подшипники располагаются также на 2—2,5 *м* друг от друга, так что каждое звено имеет свой подшипник. Трансмиссионный вал представляет одну из самых чувствительных деталей насоса: он должен быть достаточно прочен и вращаться без сильного дрожания, а поэтому и подшипники должны быть возможно более эластичны, а вместе с тем прочны, чтобы хорошо сопротивляться истиранию.

В современных конструкциях бронзовое тело подшипника выстилается внутри высоко эластичной резиной, а на вал в пределах подшипника надевается бронзовая букса.

У нас насосы этого типа были долгое время известны под названием насосов «Фарко», так как в России их впервые начал изготовлять французский завод «Фарко». Насосы типа «Фарко» принадлежат к так называемым радиальным насосам, так как лопатки их колес так расположены, что вода выходит из колеса в радиальном направлении.

Число насаженных друг над другом на общем валу и в общем кожухе колес бывает два, три и более, соответственно чему различают насосы двух-, трех- и многоступенчатые. Откачиваемая вода проходит последовательно с одного колеса на следующее, приобретая на каждом добавочный напор.

Число ступеней зависит от требуемой высоты подъема и конструкции насоса. В среднем можно считать одну ступень на каждые 10—15 *м* подъема (при насосах с наружным диаметром корпуса до 400 *мм*).

Старые модели насосов этого типа имеют довольно большой наружный диаметр при сравнительно небольшой производительности. По данным наших заводов наименьший наружный диаметр корпуса насоса 280 *мм* при производительности 6—10 *л/сек* и при наименьшем необходимом диаметре колодца 350 *мм*, а насосы производительностью 25—30 *л/сек* требовали наименьшего диаметра колодца 450—500 *мм*; к. п. д. достигал 50—60%.

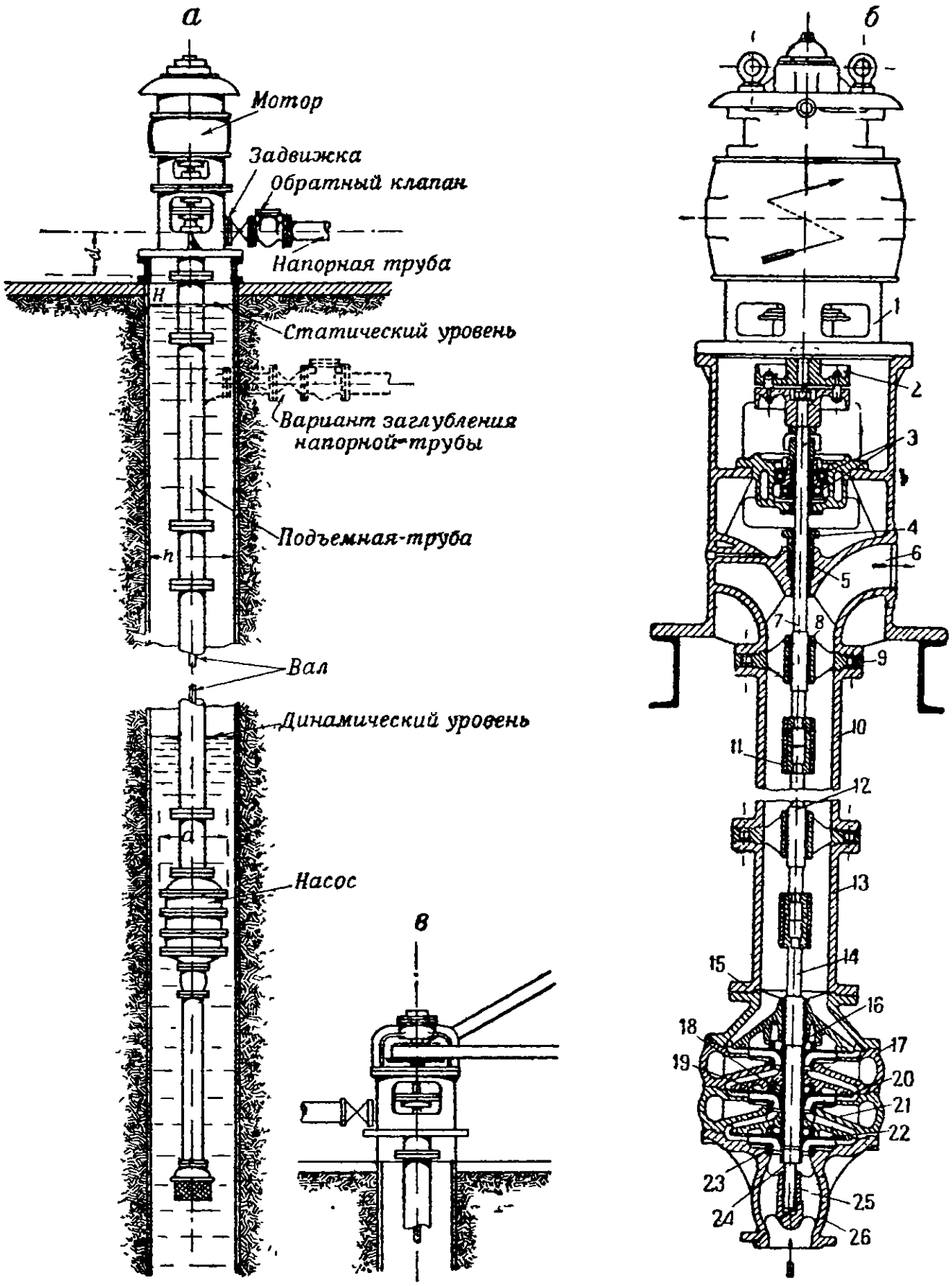


Рис. 41.

Обозначения к рис. 41, *б*. *1* — вертикальный электромотор. *2* — эластичная муфта. *3* — шариковый подшипник. *4* — сальник. *5* — опорная букса. *6* — станина мотора с нагнетательным патрубком. *7* — вал станины мотора. *8* — направляющий вкладыш промежуточного подшипника. *9* — промежуточный подшипник. *10* — длинная подвесная нагнетательная труба. *11* — соединительная муфта вала. *12* — трансмиссионный вал. *13* — короткая подвесная нагнетательная труба. *14* — вал насоса. *15* — напорная крышка насоса. *16* — Направляющая трубка. *17* — секция корпуса насоса. *18* — направляющая трубка. *19* — рабочее колесо насоса. *20* — направляющий аппарат. *21* — распорная гильза. *22* — заднее сменное кольцо. *23* — переднее сменное кольцо. *24* — гайка вала. *25* — направляющий вкладыш подпятника. *26* — всасывающая крышка насоса.

По сравнительно недавним данным (1925—1928 гг.) лучшие германские заводы выпускали радиальные насосы, производительность которых составляла 5 *л/сек* при наименьшем диаметре колодца 250 *мм*, 15 *л/сек* при наименьшем диаметре колодца 350 *мм* и 25 *л/сек* при диаметре колодца 400 *мм*.

Такие большие габаритные размеры являются одним из главных препятствий к применению этих насосов в практике искусственного понижения грунтовых вод, где желательно обходиться колодцами возможно меньшего диаметра и по возможности меньшим их числом за счет увеличения до известного предела их дебита.

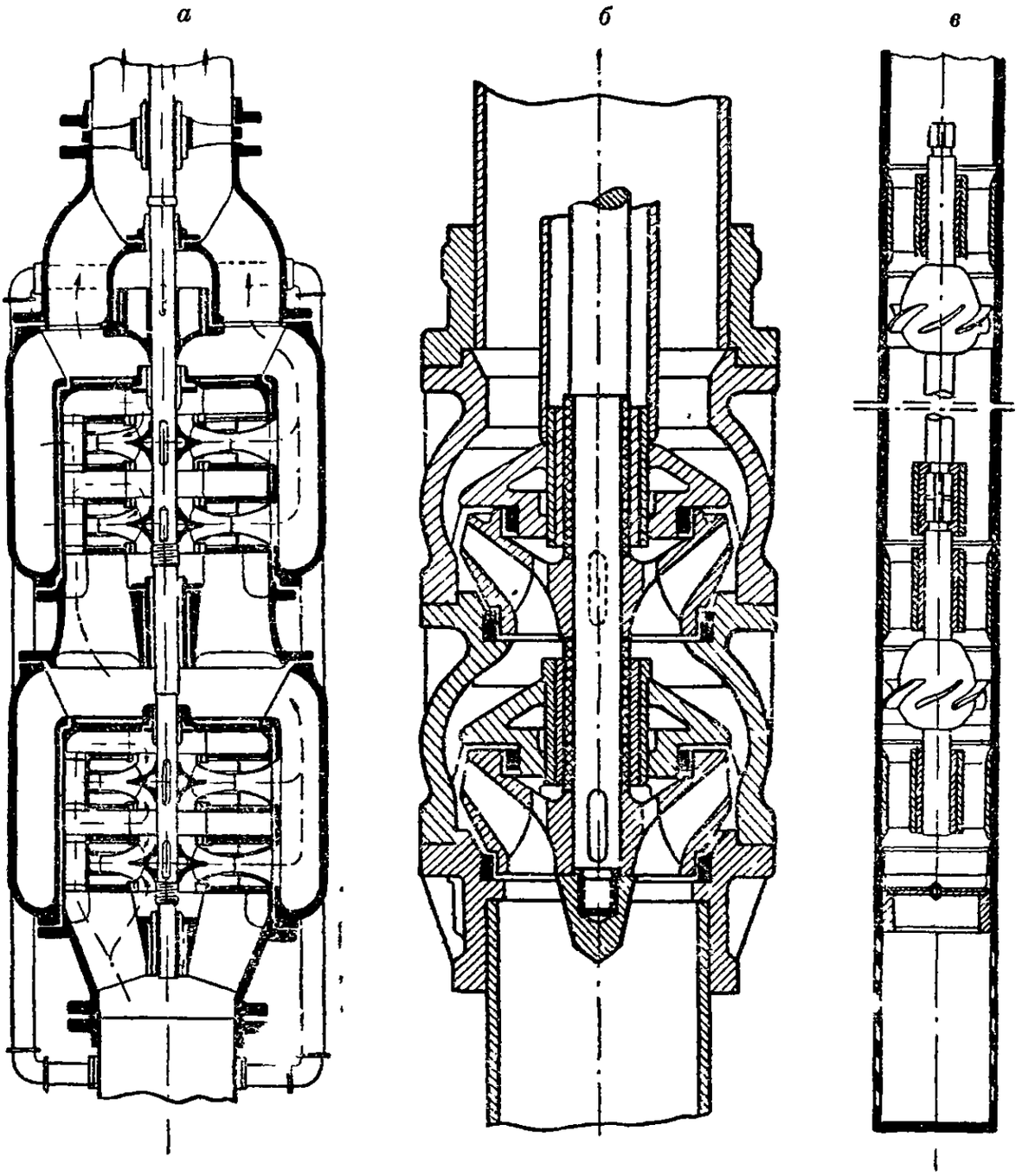


Рис. 42.

В результате усовершенствования конструкций колес и других деталей некоторым заводам удалось значительно уменьшить наружный диаметр радиальных насосов и повысить производительность. В целях дальнейшего уменьшения диаметра и повышения производительности в последнее время стали строить радиальные насосы с параллельно работающими двумя и даже тремя колесами в каждой из последовательных ступеней (рис. 42, *а*), а также полуаксиальные насосы с лопастями, наклоненными под острым углом к вертикальной оси (рис. 42, *б*), и аксиальные или пропеллерные, в которых вода движется в направлении оси насоса (рис. 42, *в*).

Для общего представления о новейших усовершенствованных радиальных, полуаксиальных и аксиальных глубинных центробежных насосах с мотором над устьем колодца приводится табл. 8, составленная по данным иностранных заводов.

Таблица 8

Наименьший диаметр колодца в *мм*	100	150	200	250	300	350	400
Производительность усовершенствованных радиальных насосов в *л/сек*	—	7—10	12—15	16—20	20—28	30— 40	40— 50
Производительность полуаксиальных и аксиальных насосов в *л/сек*	5—7	10—15	20—30	35—50	55—75	80—110	120—170

Примечание Не использованы некоторые данные как вызывающие сомнения; некоторые данные округлены или взяты средние из данных нескольких заводов.

Аксиальные насосы при малом наружном диаметре и большой производительности отличаются быстроходностью, но малой высотой подачи на одну ступень (от 2 до 4 *м*). Поэтому при сравнительно небольших высотах подъема они имеют большое количество ступеней. В качестве примера укажем, что завод Зульцера в 1927 г. для откачки воды из колодца диаметром 200 *мм* и высоты подъема до 30 *м* строил аксиальные насосы с 10—12 ступенями.

Для того чтобы обеспечить подъем воды из колодца не только до устья последнего, но и выше, в последнее время (приблизительно с 1929 г.) стали строить насосы с разделением подъема: до устья колодца воду поднимает многоступенчатый аксиальный насос в общем корпусе, опускаемом в колодец, а выше устья — насаженный на общем валу под самым электромотором радиальный насос большего диаметра.

К. п. д. новейших насосных агрегатов рассмотренного типа составляет от 50% для малого диаметра до 65% и даже выше для большого диаметра.

Для понижения уровня грунтовых вод на строительстве канала Волга — Москва в настоящее время применяются помимо насосов разных конструкций отечественного производства глубинные центробежные насосы с разделением высоты подъема завода Ергардт (Ehrhardt) и Земер (Sehmer) в Саарбрюкене. При высоте подъема до 40 *м* эти насосы имеют до 8 ступеней в общем корпусе, опускаемом в колодец, и одну ступень большего диаметра над устьем колодца под самым электромотором или соответственно под приводным шкивом (применяются и те и другие). Вал нижнего насоса соединяется с валом верхнего насоса и вертикального электромотора посредством трансмиссионного вертикального вала с промежуточными подшипниками, имеющими внутреннюю прокладку из особой эластичной резины.

При наружном диаметре опускаемого в колодец корпуса 185 *мм* эти насосы свободно помещаются в колодцах диаметром 250 и даже 200 *мм* и обеспечивают откачивание воды из каждого колодца до 25 *л/сек*.

Рассмотренные насосы, несмотря на значительные усовершенствования, приведшие к уменьшению их наружного диаметра и увеличению производительности, обладают рядом недостатков, особенно важных именно в практике понижения грунтовых вод. Главным недостатком является длинный промежуточный вал с большим количеством подшипников, которые

благодаря дрожанию вала подвержены сравнительно быстрому износу и замене новыми, что в свою очередь сопряжено с необходимостью извлечения агрегата из колодца с разъединением звеньев подвесной нагнетательной трубы и самого вала. Ввиду довольно значительного веса вала для подъема агрегата необходима установка над колодцем подъемного приспособления, а сама операция подъема, разборки, сборки и опускания агрегата требует довольно много времени, что особенно нежелательно в процессе производства основных строительных работ. Для установки вертикального электромотора или станины приводного шкива требуется достаточно прочный и устойчивый фундамент.

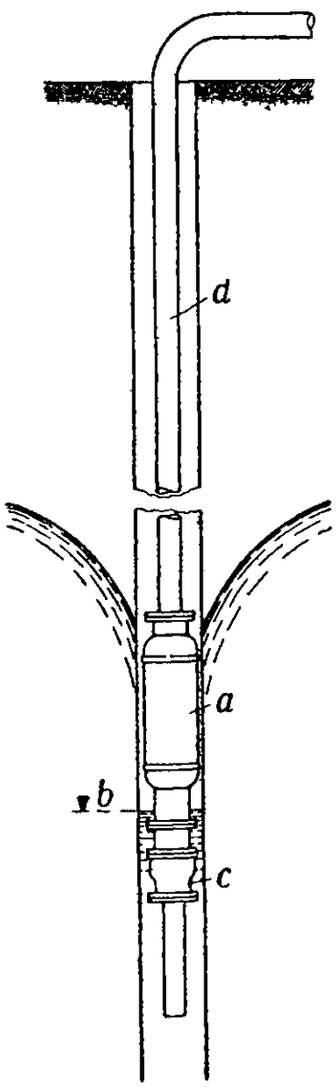


Рис. 43

a — мотор, *b* — уровень воды в колодце, *c* — насос, *d* — напорная труба насоса.

Для защиты мотора от непогоды, загрязнений и случайных ударов, вполне возможных на стройке, а также для размещения контрольно-пусковых приборов необходимо строить над каждым колодцем будку иногда с люком в крыше и подъемным приспособлением, что не только удорожает установку, но в большинстве случаев создает нежелательное стеснение рабочего пространства. Поэтому насосы рассмотренного типа есть смысл применять только в тех случаях, когда колодцы расположены на значительных взаимных расстояниях, когда количество откачиваемой воды из каждого колодца в единицу времени достаточно велико (10 *л/сек* и более), когда колодцы расположены не внутри котлована, и надстройки над ними не мешают производству работ, когда остановка и подъем одного насоса для смены подшипников или для устранения других неполадок не могут вызвать серьезных осложнений, связанных с подъемом уровня грунтовой воды, и наконец при отсутствии других, более подходящих насосов.

Для устранения вышеуказанных недостатков рассмотренных насосов в последние 15—20 лет стали строить и применять при понижении уровня грунтовых вод глубинные центробежные насосы с электромотором, погружаемым в самый колодец и соединяемым с насосом коротким валом

Завод Сименс-Шуккерт в Нюренберге (Германия) в двадцатых годах приступил к изготовлению насосных агрегатов, известных под названием глубинных «эльмонасосов», состоящих из соединенных посредством короткого вала вертикального насоса и электромотора, опускаемых в колодец и подвешенных к нагнетательной трубе, опирающейся посредством хомута на верхний обрез наставной или обсадной трубы (рис. 43).

Этот тип глубинного центробежного насоса устраняет необходимость фундамента и длинного промежуточного вала и благодаря этому значительно лучше удовлетворяет запросам временных установок для понижения уровня грунтовых вод. Однако первоначальная конструкция эльмо-насоса полностью не разрешала задачи, так как мотор должен был находиться всегда выше уровня воды в колодце. Так как последний в установках понижения подвержен значительным колебаниям, то, во-первых, требуется по мере понижения уровня воды в колодце постепенное опускание агрегата с наращиванием сверху подвесной нагнетательной трубы, а во-вторых, в случае уменьшения по той или иной причине или прекращения подачи воды насосом и вызванного этим быстрого подъема уровня воды мотор окажется под водой, что сопряжено с его выходом из строя, так как незащи-

щенная от воды обмотка статора будет сожжена. Этот существенный недостаток эльмо-насоса был устранен в результате дальнейших усовершенствований, приведших к типу центробежных насосов с погружаемыми моторами. Параллельно с усовершенствованием эльмо-насоса велась разработка погружаемых в воду насосных агрегатов также другими заводами и конструкторами как в Германии, так и в других странах.

5. Глубинные насосы с погружаемым в воду мотором

Многочисленные попытки усовершенствования глубинных центробежных насосов привели к конструкциям, которые позволяют опускать весь агрегат, т. е. насос вместе с мотором, ниже поверхности воды в колодце. К числу таких агрегатов относится насос «Реда».

В этой конструкции мотор соединен при помощи вертикального вала с вертикальным центробежным насосом, расположенным выше мотора. Мотор помещается в особом кожухе, наполненном маслом, и имеет только одно отверстие с сальником для соединения вала мотора с валом насоса.

Недостаток первых образцов этой конструкции состоял в том, что набивка сальника пропускала воду внутрь кожуха мотора и последний не мог работать. Этот недостаток был устранен тем, что было устроено приспособление для постоянного поддержания противодавления масла в кожухе мотора, для чего на поверхности земли располагался масляный насос-пресс, соединенный с внутренностью кожуха мотора резиновой трубкой.

Подобный же принцип был использован фирмой Гарвенсверке (Garvenswerke) в Ганновере в так называемом U-насосе, в котором для создания противодавления в моторе, находящемся над насосом, использован сжатый воздух, подаваемый из воздушного компрессора в кожух мотора посредством воздухопровода (рис. 44).

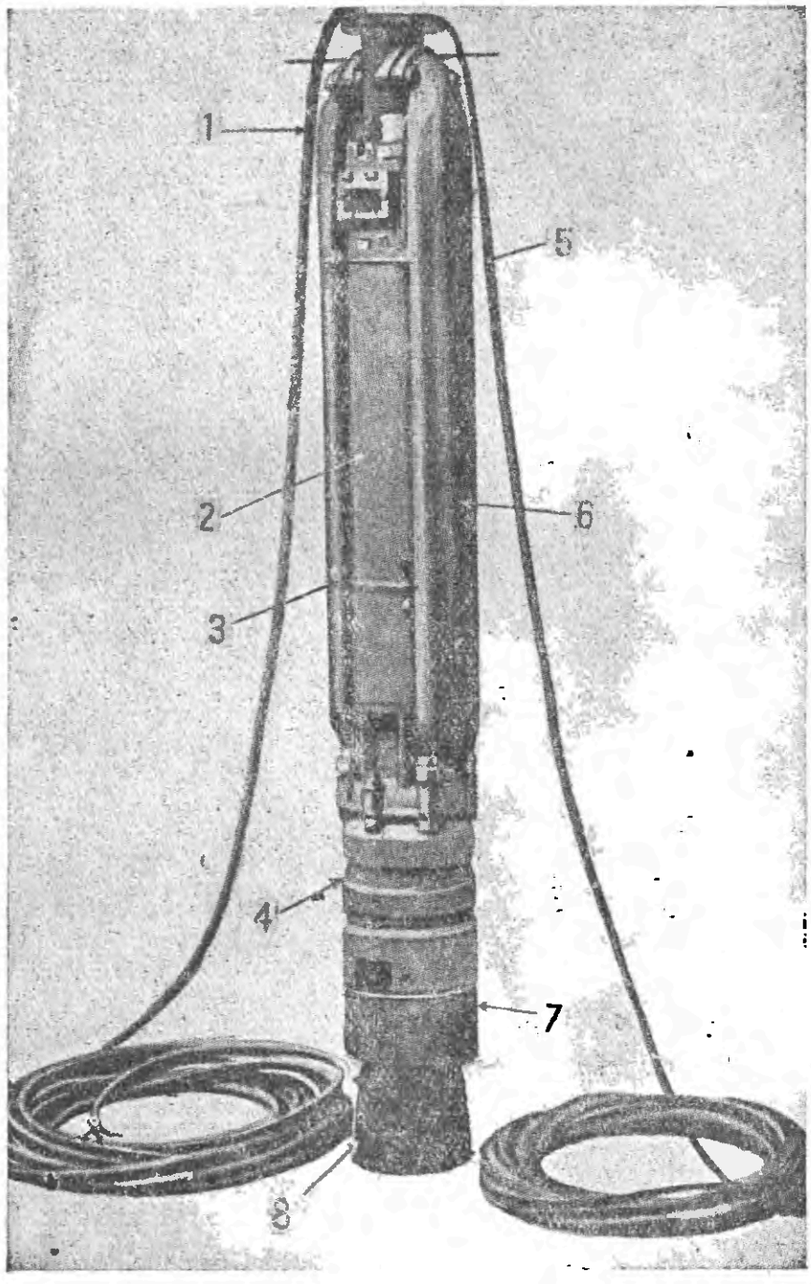


Рис. 44.
1 — электропровод. *2* — мотор. *3* и *6* — напорные трубы насоса. *4* — насос. *5* — воздухопровод *7* — приемная сетка. *8* — воздушный колокол.

Для автоматической регулировки давления воздуха в кожухе мотора при колеблющемся уровне воды в колодце агрегат снабжен воздушным колоколом, открытым снизу по типу водолазного колокола.

Для этого агрегата требуется особая установка, состоящая из воздуш-

ного компрессора, резервуаров для сжатого воздуха, осушителя воздуха, маслоотделителя, редукционного клапана и манометров: для резервуаров, перед редукционным клапаном и позади него (рис. 45).

На рис. 46 представлен разрез одной из конструкций погружаемого глубинного U-насоса Гарвенсверке.

В этой конструкции мотор расположен над двухступенчатым центробежным насосом. Откачиваемая насосом вода проводится через две вертикальные трубы *b*, охватывающие мотор и сходящиеся над последним в одну общую нагнетательную трубу, на которой подвешен в скважине весь агрегат. Воздушный колокол *c* в отличие от конструкции, изображенной на рис. 44, помещается выше мотора. Для изоляции вала в промежутке между

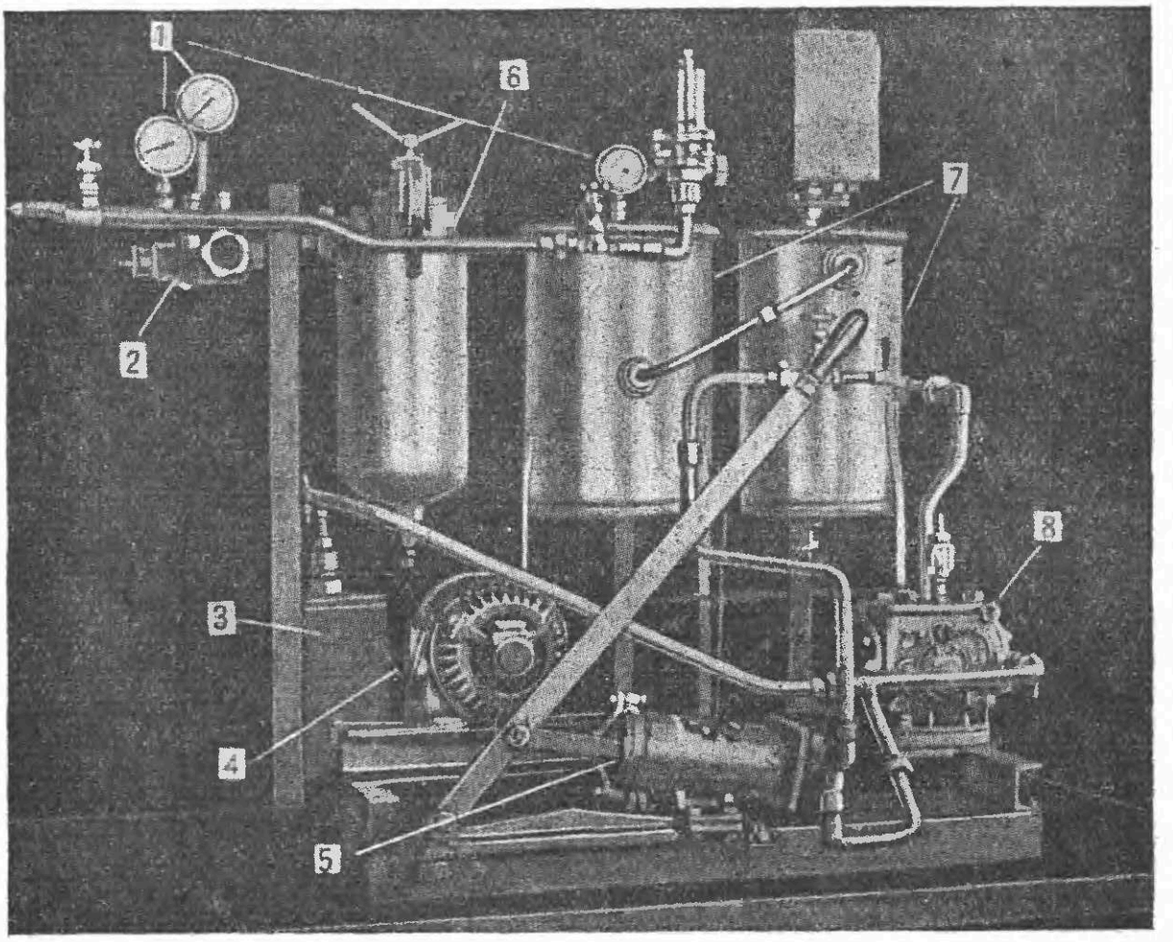


Рис. 45.

1—манометры. *2*—редукционный клапан. *3*—осушитель воздуха. *4*—электромотор. *5*—запасный воздушный насос. *6*—маслоотделитель. *7*—резервуары для сжатого воздуха. *8*—воздушный компрессор.

мотором и насосом применена особая уплотнительная муфта *a* из прессованного угля, сжатого пружиной и вращающегося вместе с валом. Применяющийся для этой конструкции автоматический редукционный клапан схематически представлен на рис. 47. Он представляет собою коробку, разделенную мембраной *M* на две полости: верхнюю *A*, соединенную воздушной трубкой *t* с кожухом мотора *И* насосного агрегата, и нижнюю *Б*, сообщаемую тонкой воздушной трубкой *S* с воздушным колоколом *K*. Снизу на мембрану действуют две силы: 1) постоянная сила пружины *B*, обеспечивающая постоянное противодавление (0,5—0,8 *ат*) внутри кожуха мотора при любом уровне воды в колодце; 2) добавочное давление, соответствующее давлению воды на наружную поверхность мотора у сальника, а следовательно равное давлению воздуха под воздушным колоколом и изменяющееся при колебаниях уровня воды в колодце. Это добавочное давление в дополнение к да-

влению пружины заставляет мембрану изгибаться вверх и более или менее открывать клапан *D* между пространствами *A* и *E*.

В пространстве *E* всегда находится сжатый воздух, поступающий по трубке *r* из аппарата, изображенного на рис. 45.

При открытии мембраной клапана воздух из пространства *E* проникает под давлением, несколько превышающем давление на мембрану снизу, в пространство *A*, а оттуда через воздушную трубку *t* в кожух мотора.

При постоянном уровне воды в водоприемнике надобность в воздушном колоколе отпадает, а подача воздуха под постоянным давлением обес-

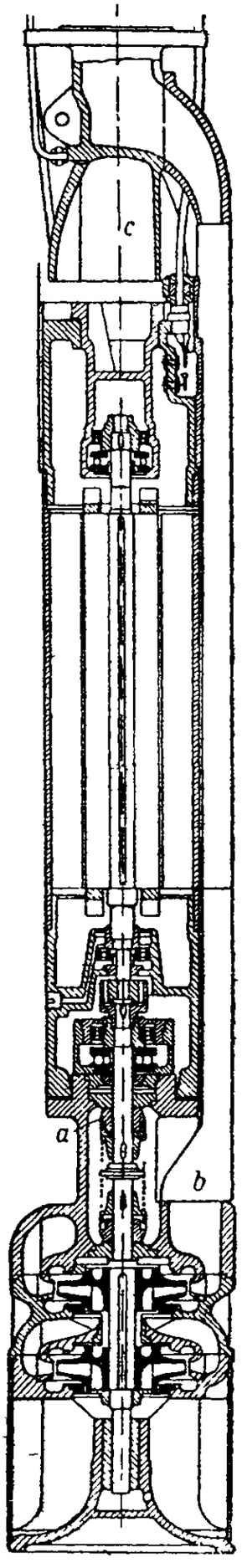


Рис. 46

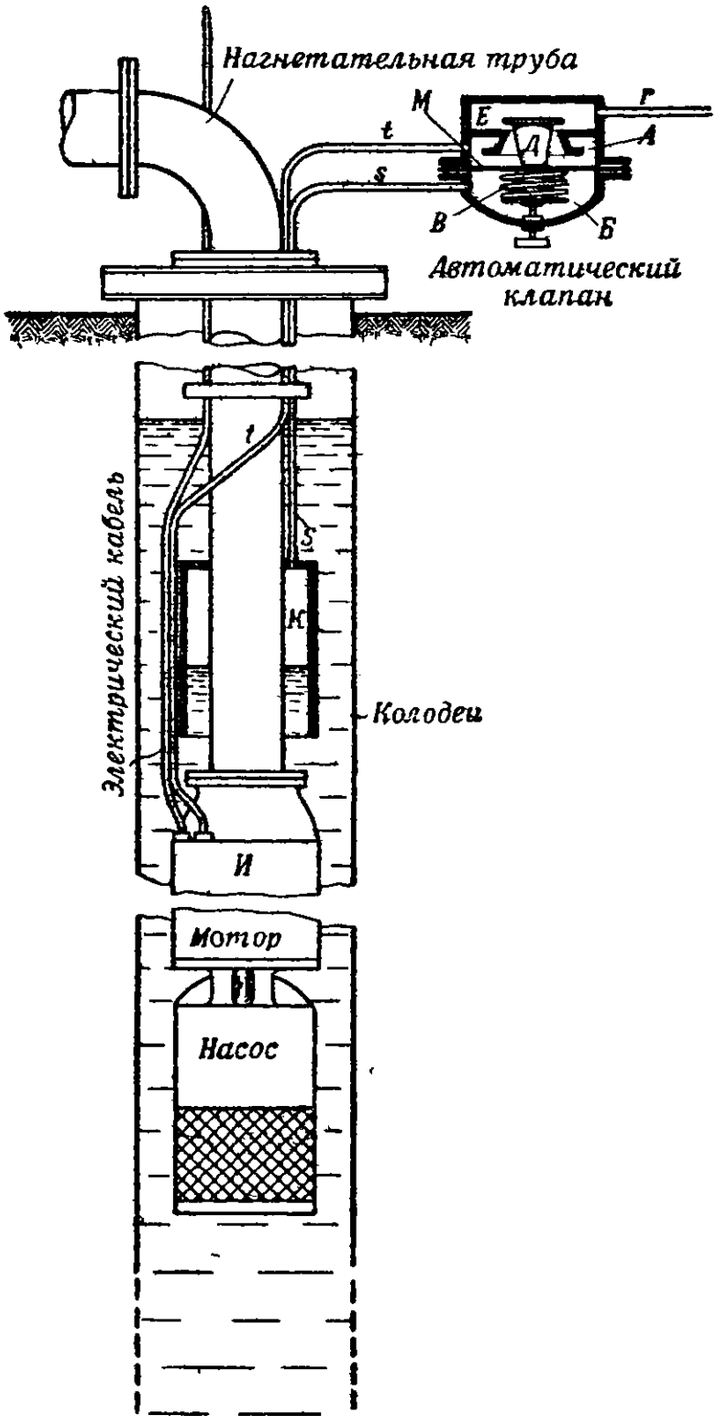


Рис. 47

печивается давящей снизу на мембрану пружиной, отрегулированной на определенное давление, превышающее на 0,5—0,8 *ат* величину давления столба воды в колодце над сальником кожуха.

Фирмой Гарвенсверке в Ганновере разработаны также типы насосных погруженных агрегатов без воздушного противодавления UO и UOT. Для предохранения от проникания воды в кожух мотора в этих конструкциях устраиваются особые герметические муфты, перекрывающие вал агрегата в месте соединения мотора с насосом. Эти агрегаты без противодавления строятся меньших диаметров, что для целей понижения уровня грунтовых вод является особенно желательным.

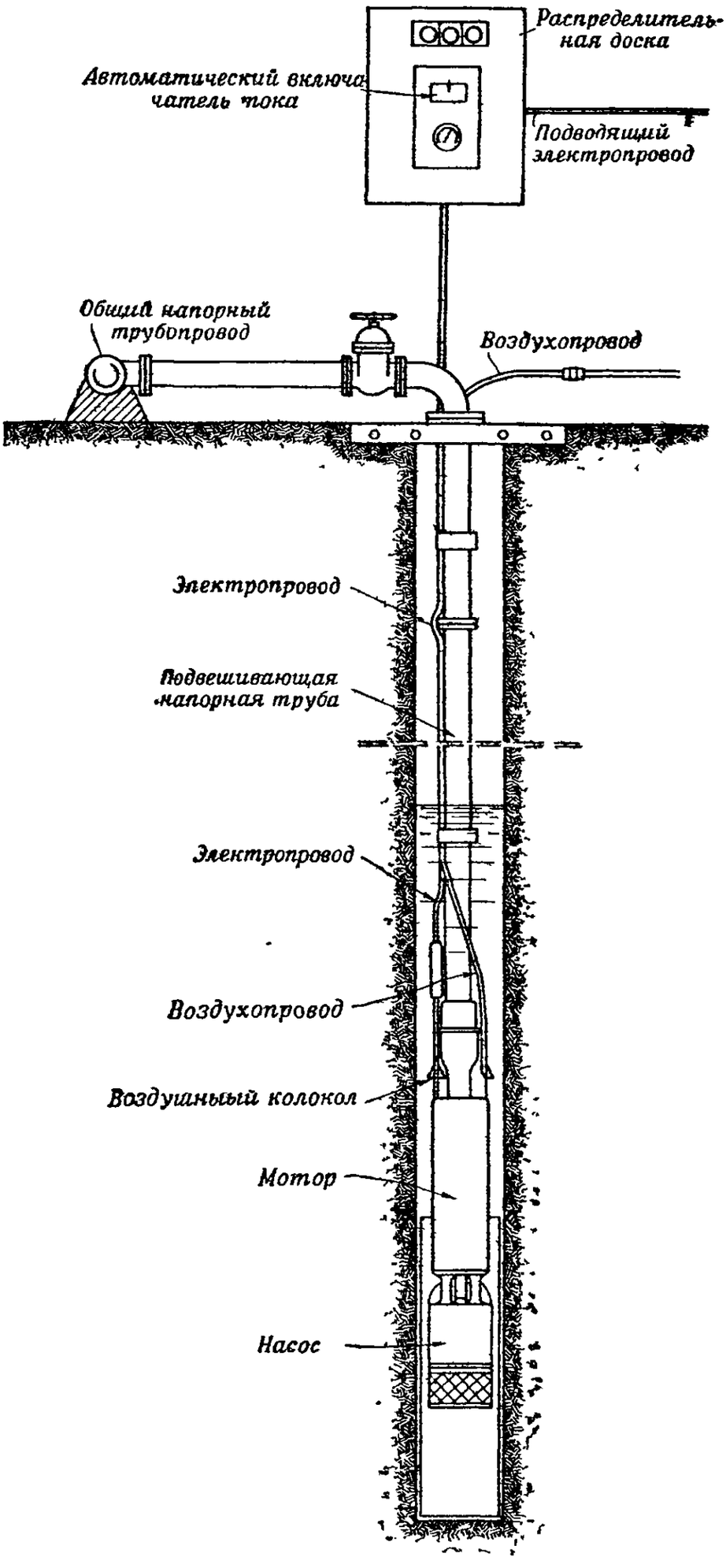


Рис. 48.

Расположение одного из типов насоса с погруженным насосом U в скважине схематически представлено на рис. 48

По расположению мотора агрегаты Гарвенсверке бывают двух типов: с мотором над насосом и с мотором под насосом. Кроме того агрегаты без противодавления разделяются по расположению трансформатора: в одном типе UOT трансформатор помещается на поверхности земли и является общим для целой группы агрегатов, в другом UO — трансформатор помещается под мотором, погружаемым в воду. Насосы в зависимости от требуемой высоты подъема делаются одноступенчатые и многоступенчатые

Основные данные о насосных агрегатах Гарвенсверке даются в сокращенной табл. 9.

К. п. д насосных агрегатов Гарвенсверке сравнительно невелик, особенно для малых диаметров.

С увеличением наружного диаметра агрегата увеличивается и к.п. д.;

Таблица 9

Наружн. диаметр в *мм*	Средние: Производительность в *л/сек*	Средние: Высота подъема в *м*	Число ступеней насоса	Мощность мотора в kW	Тип	
142	2	20	2	1,1	UO и UOT	Без противодавления трансформ. в скважине Без противодавления трансформ. на поверхности земли
	2	30	3	1,5		
	2	40	4	2,2		
	2	65	6	3,0		
	2	85	8	4,0		
185	3	24	2	2,2	UO и UOT	Без противодавления с трансформ. в скважине Без противодавления с трансформ. на поверхности земли
	3	45	3	3,0		
	3	48	4	4,0		
	3	60	5	5,5		
	3	72	6	5,5		
215	5	22	1	2,2	UO и UOT	Без противодавления с трансформ. в скважине Без противодавления с трансформ. на поверхности земли
	5	44	2	4,0		
	5	66	3	5,5		
	5	88	4	7,5		
	5	110	5	9,2		
	7,5	110	5	11,5		
280	15	60	3	18,5	U	С противодавлением
280	15	80	4	22		
280	25	60	2	26		
280	28	60	2	26		
385	25	90	3	40		
385	28	85	3	40		
385	36	60	1	40		
385	40	40	1	26		

так например, для агрегатов диаметром 142 *мм* к. п. д. $\eta = 0{,}3—0{,}35$, для наружного диаметра 215 *мм* $\eta = 0{,}45—0{,}5$, для наружного диаметра 280 *мм* $\eta = 0{,}5—0{,}6$ и для наружного диаметра 385 *мм* $\eta = 0{,}55—0{,}6$.

По сообщению фирмы Гарвенсверке U-насосы были применены впервые при понижении грунтовых вод во время постройки сухого дока в Киле в 1925/26 г.

К разряду глубинных насосов погруженного типа относится также гидроцентробежный насос с водяной многоступенчатой турбиной системы завода Гейс или завода Бродиц и Зейдель в Берлине. Насос работает на одном валу с турбиной, опускаемой в общем с мотором кожухе в колодец. Необходимая для движения турбины вода нагнетается центробежным или поршневым насосом высокого давления через напорную узкую трубу.

В последнее десятилетие среди других глубинных насосов нашли применение насосные агрегаты с погружаемым мотором заводов Сименс-Шуккерт в Нюренберге (Германия), так называемые насосы SSW (рис. 49).

Существенное отличие этих насосов от «Эльмо», «Реда» и U-насосов заключается в снабжении вертикального мотора так называемым зумпфнасосом *p*, находящимся в нижнем особом отделении кожуха мотора *q* (рис. 50). Это очень маленький насосик, назначение которого состоит

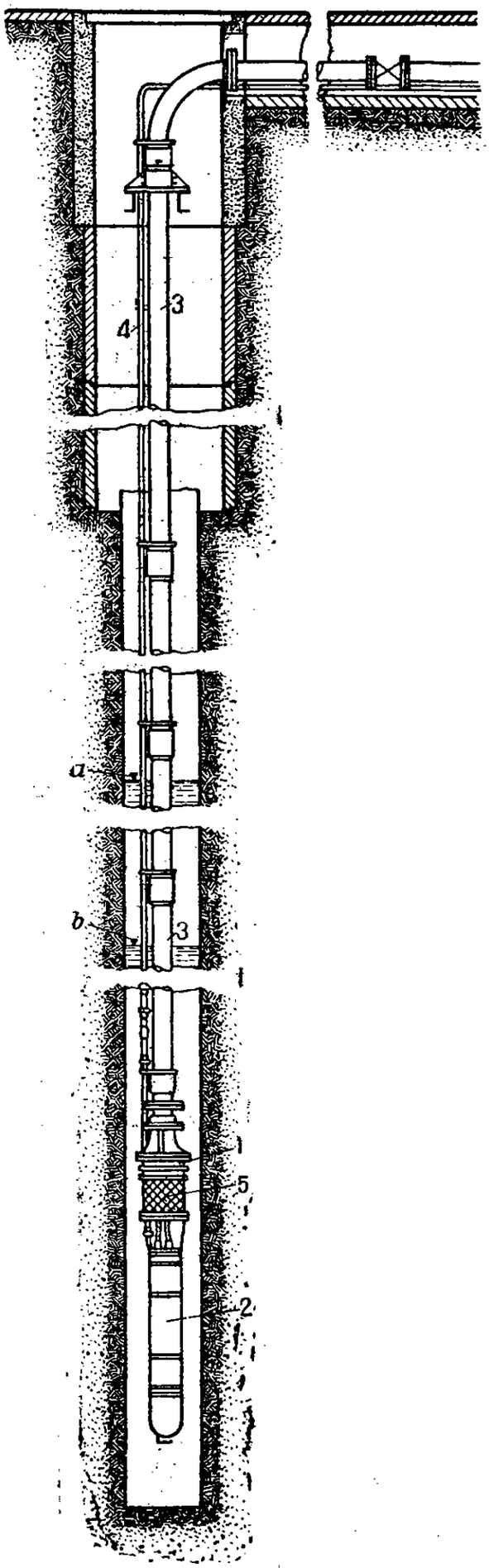


Рис. 49

1—насос. *2*—мотор. *3*—напорная труба. *4*—электропровод. *5*—приемная сетка насоса. *a* и *b* — уровень воды в колодце (переменный).

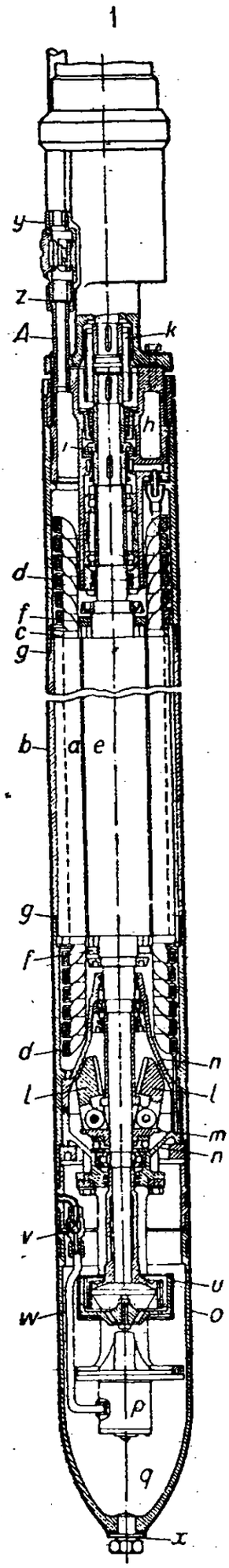


Рис. 50

в автоматическом откачивании воды, попавшей через сальники в кожух мотора. Благодаря устройству хорошей изоляции обмотки статора и надлежащему направлению воды вдоль внутренних стенок кожуха вода стекает в зумпф q, не соприкасаясь с мотором. Впервые такие насосы (Tauchmotorpumpe) SSW были частично применены при глубоком понижении во время перестройки здания государственной оперы в Берлине в 1926/27 г. (рис. 51).

Описанный агрегат относится к типу TU, в котором мотор помещается ниже насоса. Насосы SSW строятся также с мотором выше насоса — TO.

В последних конструкциях типа TU зумпфовый насос так устроен, что постоянно находится в действии вместе с мотором.

Для большей надежности действия агрегата предусмотрено также устройство, при котором скопляющаяся в зумпфе вода может удаляться из него сжатым воздухом.

В зумпфе мотора имеются поплавки с электрическими контактами, включающими через особый автоматический включатель электрический сигнал на станции управления при подъеме уровня воды в зумпфе до определенной высоты. Сигнал в виде звонка и сигнальной лампочки дает машинисту знать, что в тот или иной агрегат нужна подача сжатого воздуха. Подача воздуха производится при помощи ручного воздушного насоса или маленького компрессора с электромотором, включаемым в действие по сигналу через воздушную трубку, проведенную к кожуху мотора каждого действующего агрегата.

На рис. 52 представлена центральная станция управления одной из установок глубокого понижения уровня грунтовых вод с глубинными насосами SSW.

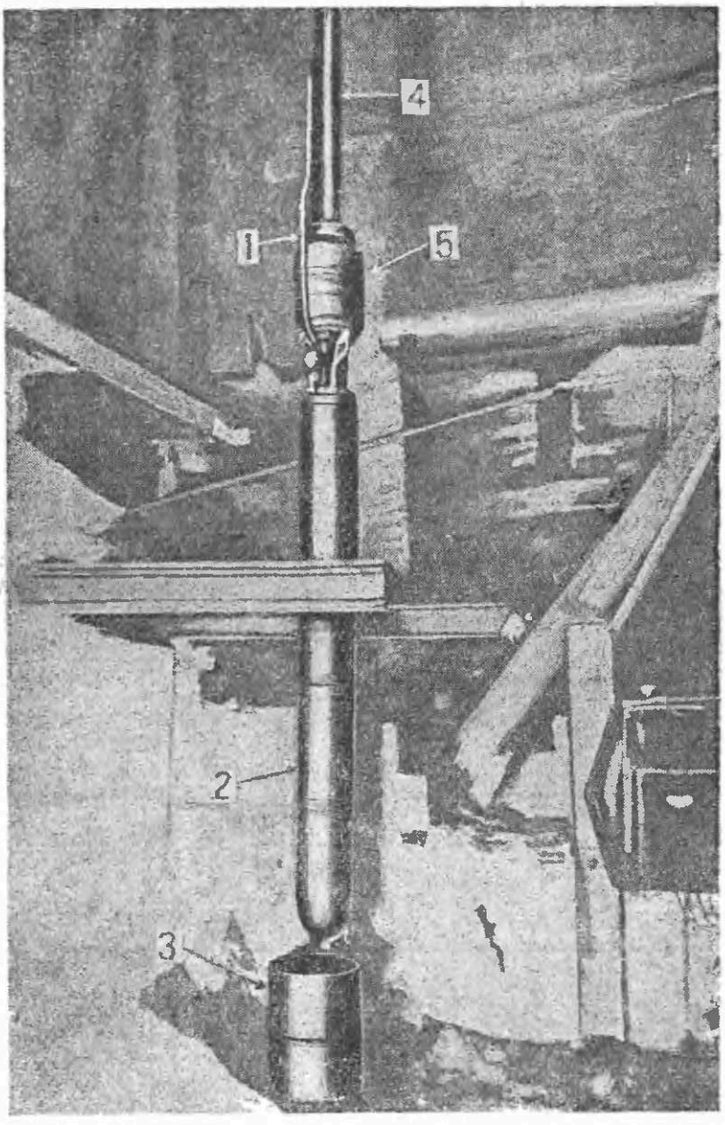


Рис. 51

1 — электропровод. *2* — мотор. *3* — колодец. *4* — напорная труба. *5* — насос.

Агрегат TO (рис. 53, *а* и *б*) так устроен, что откачиваемая расположенным ниже мотора насосом вода проходит между двумя оболочками, образующими кожух мотора, который охлаждается этой водой. Содержание мотора в сухом состоянии обеспечивается противодавлением воздуха, находящегося в длинном воздушном колоколе, расположенном под мотором. На рис. 53, *а* агрегат с воздушным колоколом; на рис. 53, *б* колокол снят. Стояние воды в воздушном колоколе наблюдается при помощи электрического сигнала. Если уровень воды в воздушном колоколе поднимается выше определенной высоты, электрический контакт замыкается, сигнальная лампочка зажигается и звонит звонок. Тогда машинист накачивает воздух в кожух мотора, в котором, равно как и в сообщающемся с кожухом воздушном колоколе, устанавливается повышенное давление.

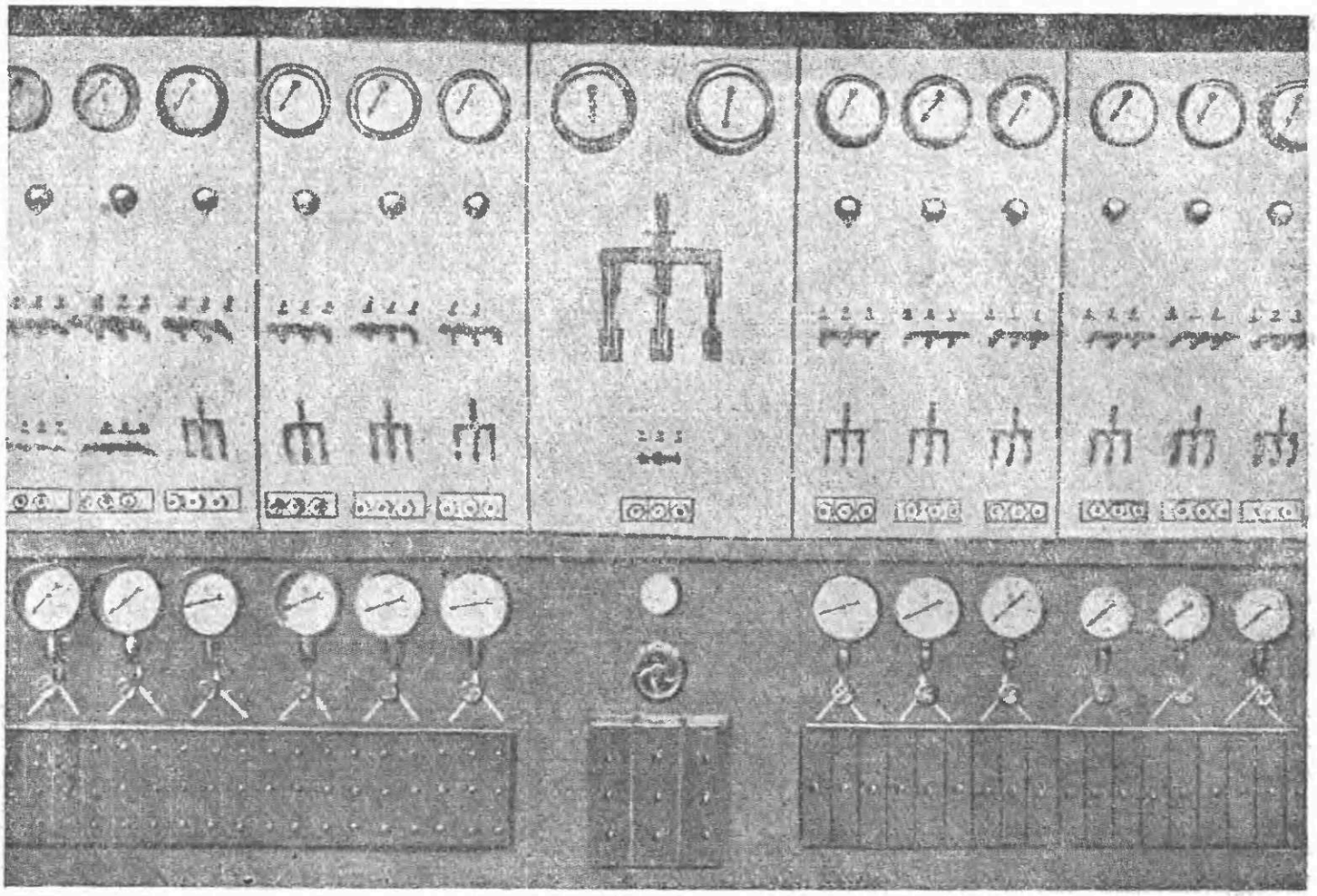


Рис. 52

Главнейшие данные насосных агрегатов SSW приведены в табл. 10.

Таблица 10

Тип	Длина мотора в *мм*	Расположение мотора	Защита мотора	Число ступеней	Мощн. в kW	Наиб. диам. в *мм*
SSW погружаемый TU	1480	Под насосом	Зумпф-насос или подводка сжатого воздуха	2	10	235
SSW то же ТО	820	Над »	Воздушный колокол	2	10	270
SSW погруж. ТО (конструкция Эльмо-зав.)	1380	» »	Воздушн. колокол	2	13,5	310

К. п. д. $\eta = 0{,}5$.

Как видно из приведенной таблицы, наружный диаметр агрегата SSW также является слишком большим для колодцев понижения уровня грунтовых вод, а к. п. д. почти не отличается от такового насосных агрегатов Гарвенсверке соответствующего диаметра.

Экономические соображения заставляют стремиться к возможно меньшему диаметру колодцев. Напротив, чем больше наружный диаметр насосного агрегата, тем больше его к. п. д. и тем дешевле агрегат (на единицу мощности). Наиболее трудной является задача конструирования погруженных насосов именно для понижения грунтовых вод, когда надо найти такое решение, чтобы наружный диаметр агрегата был наименьшим и

в то же время снизилась его стоимость и удешевилась эксплоатация. В настоящее время более или менее удовлетворительно действующие погруженные насосы имеют наружный диаметр 200—250 *мм*, о качестве же погружаемых агрегатов меньшего диаметра (142—150 *мм*) еще не имеется достаточно удовлетворительных отзывов.

Кроме описанных систем насосов с погруженным мотором Garvenswerke и SSW имеется много различных других, как например насосы UTA без воздушного противодавления с автоматическим предохранительным выключателем мотора, насосы итальянской фирмы Чапелли (Chapelli) также без противодавления и глубинные насосы с погружаемым мотором различных американских систем.

В стремлении к удовлетворению запросов потребителей некоторые фирмы добились моделей с наружным диаметром 100 *мм* и даже меньше (например UTA). Однако эти модели как в отношении производительности и к. п. д., так особенно в отношении надежности действия еще не вполне удовлетворительны.

Главнейшей очередной задачей в области совершенствования способа глубокого понижения грунтовых вод в настоящее время является разработка возможно более дешевых и достаточно производительных насосных погружаемых агрегатов, имеющих в то же время возможно меньшие габаритные размеры и обладающих надежностью действия.



а *б*

Рис. 53.

Отвод откачиваемой глубинными насосами воды может производиться различными способами в зависимости от местных условий:

1) открытыми лотками, проложенными с надлежащим уклоном на поверхности строительной площадки;

2) закрытыми безнапорными трубами, если открытые лотки недопустимы;

3) общим напорным трубопроводом, к которому присоединяются напорные трубы каждого из глубинных насосов.

Последнее решение является наиболее удовлетворительным, а потому и имеет наибольшее применение.

Ввиду того что напорный трубопровод не требует для укладки выравнивания площадки, он может иметь ряд изгибов и крутых поворотов, которые однако представляют опасность при гидравлических ударах, получающихся благодаря включению и выключению отдельных насосов, особенно в случае внезапного выключения всех насосов из-за перерыва тока. Поэтому для компенсации этих ударов следует устанавливать местами и особенно вблизи резких изгибов вертикальные открытые отростки напорного трубопровода — компенсаторы.

ГЛАВА II

ТЕРМИНОЛОГИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Несмотря на неоднократные попытки, до настоящего времени еще не выработана общая твердая терминология подземных вод. Трудность создания общей терминологии объясняется различными подходами, которые существуют в тех или иных областях науки и техники, связанных с вопросами подземных вод.

Поэтому естественно и понятно существование различных точек зрения на классификацию подземных вод.

I Всесоюзный гидрологический съезд в 1924 г. рассматривал предложенную А. А. Козыревым терминологию подземных вод и принял ее за основу. Эта терминология была составлена с двух точек зрения:

1) геогидрологической,

2) геогидротехнической.

С геогидрологической точки зрения, т. е. с точки зрения режима. подземные воды были разделены на 4 класса.

1. Почвенные воды, удерживаемые на слабо проницаемом слое подпочвы и насыщающие слои почвы. Они находятся в вертикальном движении: вниз под влиянием силы тяжести и вверх под влиянием капиллярного подъема и испарения, а также всасывания корнями растений.

2. Грунтовые воды, содержащиеся в рыхлых и пористых породах без водоупорной кровли или не соприкасающиеся с последней.

3. Воды трещиноватых пород, заключенные в трещинах и в более крупных пустотах пород и представляющие отдельные струи, гидравлически разобщенные друг от друга.

4. Напорные подземные воды, находящиеся под гидростатическим давлением, высота которого больше мощности водоносного слоя.

С геогидротехнической точки зрения подземные воды были разделены на:

1. Колодезные (или фреатические) — все подземные воды, которые могут быть использованы путем устройства простых каптажей в виде колодцев, подземных галлерей, траншей, подземных запруд и пр.

2. Воды глубокозалегающих горизонтов (глубокие воды), которые могут быть использованы проведением глубоких буровых скважин. С геогидротехнической точки зрения артезианскими водами должны называться только самоизливающиеся.

Последнее подразделение подземных вод для целей понижения уровня грунтовых вод не имеет существенного значения, так как конструкция и

глубина колодцев главным образом определяются необходимой глубиной заложения основания сооружений, а не глубиной залегания воды как полезного ископаемого.

Что касается гидрологической классификации, то с точки зрения понижения разница между почвенными и грунтовыми водами несущественна, подразделение же на ненапорные и напорные подземные воды, наоборот, очень существенно. При понижении дело идет о грунтах, т. е. о тех большею частью рыхлых пористых (водопроницаемых) и плотных (водоупорных) породах, которые имеют в строительном деле вполне определенное значение

В новой классификации, разработанной тем же А. А. Козыревым совместно с А. М. Жирмунским и доложенной II Всесоюзному гидрологическому съезду в 1928 г., уже отсутствует геогидротехническое разделение подземных вод, зато более отчетливо проведено разделение на ненапорные (свободные) и напорные воды.

Вся эта классификация сведена к двум схемам: 1) по гидрологическим и стратиграфическим признакам; 2) по генетическим признакам.

Приводим первую из них, опуская стратиграфические условия:

- **Подземные воды**
  - **Свободные подземные**
    - **Свободные верхние (верховодка)**
    - **Свободные нижние**
      - **Пластовые воды**
      - **Подземные водотоки**
  - **Напорные подземные**
    - **Субартезианские**
      - **Пластовые воды**
      - **Подземные водотоки**
    - **Артезианские**
      - **Пластовые воды**
      - **Подземные водотоки**

В этой схеме совершенно отсутствует термин «грунтовая вода», отброшенный авторами как «старый, отживший».

Проф. Ф. П. Саваренский в своей книге «Гидрогеология» 1934 г., считая классификацию А. А. Козырева и А. М. Жирмунского одной из наиболее серьезных работ в области классификации подземных вод, тем не менее считает необходимым сохранить, как вошедший во всеобщее употребление, термин «грунтовые воды», под которым однако понимает, как большинство советских геологов, только те воды, которые залегают в первом от поверхности проницаемом слое, не обладают напором и имеют область питания, обычно совпадающую с областью распространения.

Рабочая схема, которой проф. Ф. П. Саваренский следует для характеристики подземных вод, представлена им в следующем виде (см. табл. 11).

Как в схеме А. А. Козырева и М. А. Жирмунского, так и в схеме проф. Ф. П. Саваренского к числу напорных отнесены только артезианские и субартезианские воды, т. е. залегающие вообще глубоко, с областью питания вне пределов их распространения.

На самом деле воды, залегающие неглубоко, в самом верхнем от поверхности проницаемом слое, часто обладают напором, с которым приходится иногда очень считаться при производстве строительных работ. Однако такие воды нельзя назвать ни артезианскими, ни субартезианскими, ибо последние, как указывает проф. Ф. П. Саваренский, «залегая на сравнительно большой глубине, обладают постоянной температурой, зависящей от глубины водоносного слоя», и площади их распространения изменяются «от нескольких десятков до нескольких сот тысяч кв. километров и больше» [1].

---

[1] Проф. Ф. П. Саваренский, Гидрогеология, изд. 1934 г., стр 200.

Таблица 11

Основные подразделения	Главные виды	Отдельные воды
Воды безнапорные (со свободной поверхностью)	Залегающие в поверхностных отложениях — грунтовые	Верховодки
	Залегающие в слоях, перекрытых водоупорными, межпластовые безнапорные	Полунапорные (субартезианские)
Воды напорные	Залегающие в проницаемых слоях, переслаивающихся с водоупорными, межпластовые или артезианские	
	Залегающие в тектонических секущих трещинах — воды трещинные	Минеральные и термальные воды

С другой стороны, ограничение понятия грунтовой воды только верховодкой со строительной точки зрения создает какой-то искусственный разрыв между водой, заключенной в самом верхнем проницаемом слое, подлежащем удалению при отрывке котлована, и водой более глубоких слоев, также подлежащих удалению или служащих основанием возводимого сооружения на постройке было бы по меньшей мере странно нижний слой в пределах глубины котлована считать не грунтом и находящуюся в нем и подлежащую удалению посредством водоотлива воду именовать не грунтовой, тогда как верхний слой и воду в нем именовать грунтовой, да и то только в том случае, если она ненапорная Такое разделение внесло бы только путаницу в строительную терминологию.

Название грунт, твердо и законно укоренившееся в строительном деле, необходимо сохранить и в технике понижения уровня грунтовых вод, связанного со строительными работами, следовательно и заключенную в грунте воду целесообразно называть вообще грунтовой, включая в это понятие напорную и безнапорную почвенную или верховодку и воду более глубоких слоев.

Для целей понижения очень важно различие грунтовых вод в зависимости от характера залегания водоносных, а также подстилающих и перекрывающих их водоупорных грунтов.

Прежде всего надо различать «бассейны грунтовой воды» от «потоков грунтовой воды».

Под бассейнами грунтовой воды будем понимать скопления грунтовой воды в котловинах, заполненных водоносным грунтом. По аналогии с поверхностными Кейльгак называет такие бассейны озерами грунтовых вод. Такие бассейны могут быть перекрыты водонепроницаемыми отложениями, в результате чего могут получиться напорные бассейны грунтовой воды

Под потоками грунтовых вод будем понимать массы воды, движущейся в определенном направлении через поры рыхлых обломочных пород (грунтов), заполняющих удлиненные более или менее широкие впадины в водонепроницаемых коренных породах. Потоки грунтовых вод можно уподобить поверхностным рекам и каналам. Если поверхность подстилающего водоупора имеет уклон в какую-нибудь сторону, то в зависимости от

того, обнажается водоупор где-либо на поверхности земли или под уровнем открытого потока, озера или моря, различаются потоки со свободным и с подпертым уровнем. Если вода находится под напором, то при существовании естественного движения мы имеем напорный поток.

Аналогично открытым потокам грунтовые потоки часто имеют свои долины и следовательно более или менее ограниченную ширину; подобно поверхностным потокам они могут иметь боковые притоки.

В отличие от современных речных долин, называемых иногда живыми долинами, долины древних исчезнувших рек называются мертвыми долинами, в которых протекают ныне потоки грунтовых вод.

Очень древние мертвые долины иногда имеют большую глубину (25 м и более), соответственно чему могут встречаться глубокие потоки грунтовой воды. Нередко древние мертвые долины имеют значительную ширину.

Если мертвая долина образована существовавшей когда-то глубокой и узкой рекой, то сменивший ее узкий поток грунтовой воды имеет свои характерные особенности в отношении понижения уровня грунтовых вод.

Что касается возвышенностей и равнин ледникового происхождения, древних и современных морских побережий, а также делювиальных образований, то в них могут встречаться также ненапорные и напорные бассейны и потоки.

Некоторые особенности представляют воды дюнных областей, где благодаря однородности, чистоте и мелкозернистости песков и отсутствию водоупорных прослойков зеркало грунтовых вод представляет волнистую поверхность, следящую в общем за волнистою дневною поверхностью.

Как в бассейнах, так и в потоках грунтовых вод часто наблюдается весьма важное для понижения этажное или ярусное расположение вод, которое имеет свои особенности режима, а поэтому и существенно влияет на способ понижения уровня грунтовых вод.

Кейльгак различает следующие случаи этажного строения бассейнов и потоков грунтовых вод.

Первый случай, когда чередующиеся проницаемые и непроницаемые слои имеют значительные протяжения, причем:

а) слои залегают вполне или почти горизонтально,

б) слои залегают с значительным уклоном.

При горизонтальном залегании слоев мы имеем этажный бассейн или поток грунтовых вод, причем все этажи кроме самого верхнего являются напорными. В таких случаях обыкновенно пьезометрический уровень общий для всех этажей. Этой общностью пьезометрического уровня этажные воды отличаются от совокупности нескольких водоносных горизонтов, имеющих каждый свою отдельную пьезометрическую высоту.

При значительном уклоне слоев в большинстве случаев мы будем иметь этажный поток, принадлежащий к одному горизонту.

Второй случай, когда проницаемые и непроницаемые для воды слои чередуются таким образом, что одни слои образуют выклинивающиеся прослойки в других; горизонтальное или наклонное залегание слоев в этом случае не имеет большого значения

Если самый нижний водоупор, подстилающий всю свиту выклинивающихся слоев, наклонный и пьезометрический уровень также имеет явный уклон, то мы имеем дело с потоком; в противном случае будем иметь бассейн грунтовых вод.

Чередование проницаемых и непроницаемых слоев одного водоносного горизонта может быть встречено в грунтах различного происхождения.

Первый случай, т. е. чередование слоев значительного протяжения, наиболее свойствен прибрежно-морским, озерным, а также древним мощ-

ным аллювиальным наносам, образованным преимущественно в среднем и нижнем течении мощных рек.

Второй случай, т. е. чередование прерывчатых слоев, более всего возможен в осыпях и конусах выноса горных рек, в низовьях мелководных рек (в частности в дельтовых отложениях); особенно же такого рода залегание вод свойственно ледниковым отложениям.

Ф. Принц в «Handbuch der Hydrologie» приводит целый ряд примеров, когда в ледниковых отложениях могут обнаруживаться ложные и неправильные уровни, вызываемые местными изменениями режима вод благодаря включению непроницаемых пластов, линз и безформенных глыб или же замкнутых и незамкнутых водоносных мешков (иногда очень больших размеров).

Как разновидность этажных вод необходимо указать на воды, заключенные в тонких прослойках слоистых грунтов, главным образом глинистых песков, тощих и средних суглинков. Такие воды условимся именовать прослоечными.

Находясь под напором, прослоечные воды приобретают довольно большую скорость при поступлении в колодец или котлован. Эти воды могут тогда размывать водоупорные подстилающие и перекрывающие их прослойки и превращать весь вообще грунт в очень текучую, кашеобразную массу, плохо отдающую воду. В таких условиях понижение представляется наиболее затруднительным, а часто и совершенно невозможным.

Резюмируя все вышеизложенное, можно с точки зрения понижения предложить следующую терминологию грунтовых вод.

I. По гидромеханическим признакам:

1. Ненапорные грунтовые воды.
2. Напорные грунтовые воды.

II. По геогидрологическим признакам:

1. Бассейны грунтовых вод.
2. Потоки грунтовых вод:
   а) свободные,
   б) подпертые
   } неограниченной ширины, широкие, узкие.

III. По залеганию:

1. Сплошные (бассейны и потоки).
2. Этажные (бассейны и потоки).
3. Прослоечные воды
4. Мешки грунтовых вод
   } замкнутые, незамкнутые.

По этой терминологии такое например определение, как «напорный свободный этажный поток», говорит о том, что имеется поток, разделенный на этажи водонепроницаемыми прослойками и имеющий свободный сток на поверхности земли в виде ключа.

«Ненапорный узкий сплошной подпруженный грунтовый поток» — поток ограниченной ширины, не разделенный на этажи и не имеющий местных значительных линзовидных непроницаемых включений, с поверхностью воды, совпадающей с пьезометрической поверхностью, и вливающийся в открытый (поверхностный) водоем.

Предлагаемая терминология не может конечно претендовать на всеобщее применение и является лишь попыткой охарактеризовать те возможные разновидности грунтовых вод, которые могут встретиться при искусственном понижении их уровня и оказать существенное влияние на метод расчета, на расположение и конструкцию колодцев, а также на приемы эксплоатации установки понижения.

Как будет видно ниже, формулы для расчета установок понижения уровня ненапорных вод существенно отличаются от формул для напорных вод. Поэтому выяснение гидромеханического признака грунтовых вод является одной из самых важных и совершенно необходимых предпосылок правильного применения расчетных формул.

Если грунтовая вода имеет значительный естественный уклон, то надлежит в расчетные формулы для грунтовых вод с горизонтальным уровнем вносить соответствующие поправки, а колодцы следует располагать чаще с верховой стороны потока, чем с прочих сторон. Поэтому выяснение вопроса, имеем ли мы дело с бассейном или потоком, является также важным условием для правильного проектирования установки понижения.

Если установка находится вблизи открытого водоема, то при подпертом этим водоемом потоке грунтовых вод приходится считаться с влиянием значительных колебаний уровня воды в водоеме, тогда как при свободном потоке в этом надобности нет.

Потоки неограниченной и большой ширины питают водой понизительную установку со всех сторон, тогда как при узких потоках — главным образом с верховой, в меньшей степени — с низовой стороны потока и почти совершенно отсутствует приток с боковых сторон. Поэтому в отличие от установок в бассейне и в широком потоке, где осушаемый участок необходимо окружить колодцами со всех сторон, в узком потоке главное внимание следует обратить на постановку колодцев выше осушаемого участка для перехвата потока, а также ниже участка для перехвата вод, направляющихся к участку, где уровень понижается в результате действия понизительных колодцев.

В сплошных бассейнах и потоках фильтры колодцев работают всею своей поверхностью, тогда как в этажных и прослоечных водах — только частью боковой поверхности. Ввиду этого в прослоечных и этажных водах число и конструкция колодцев могут существенно отличаться от таковых в сплошных бассейнах и потоках.

В сплошных бассейнах и потоках понижение уровня воды связано с освобождением пор грунта от воды, т. е. с осушением грунта, тогда как в этажных и прослоечных водах зачастую удается только понизить напор и устранить выпирание грунта со дна котлована. Соответственно этому различию конечных результатов приходится часто выполнять различно и самые установки понижения.

Если в пределах котлована или подземной выработки окажутся скопления воды в водоносных грунтах с неправильной формой залегания — в виде мешка среди непроницаемых грунтов (встречаются среди ледниковых образований), — то задача понижения будет заключаться только в извлечении мертвого запаса воды, если мешок замкнутый, или же в откачивании такого количества воды, которое больше притока воды в незамкнутый мешок из соседних участков водоносных грунтов.

Конечно не всегда удается вполне отчетливо выявить действительный, иногда весьма сложный характер залегания и режима грунтовых вод в районе проектируемого понижения, но часто даже приблизительное представление может оказаться существенно важным для правильности решения и выполнения задачи.

С другой стороны, в настоящее время теория понижения не настолько еще полно разработана, чтобы охватить все особенности залегания и движения грунтовых вод, приемы же практического выполнения искусственного понижения грунтовых вод в деталях столь различны, что было бы и непосильно и нецелесообразно представить их в качестве готовых рецептов для всех возможных вариантов гидрогеологической обстановки

ГЛАВА III

ТЕОРИЯ ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

§ 1. ОСНОВНОЙ ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Как уже было выше указано, в основание теории понижения грунтовых вод положен закон фильтрации воды через песок, называемый обыкновенно законом Дарси.

Аналитически этот закон выражается так:

$$v = k \cdot \frac{h}{l}, \qquad \text{(I)}$$

где:

v — средняя скорость фильтрации, т. е. объем воды, просачивающейся в единицу времени через единицу площади фильтра;

h — высота напора, теряемая водой при фильтрации;

l — толщина фильтра и

k — постоянная величина, характеризующая фильтрационные свойства песка.

Отношение $\frac{h}{l}$ выражает потерю напора, приходящуюся на единицу толщины фильтра, или гидравлический уклон, обозначаемый обычно i или I.

Против справедливости закона Дарси имеется немало возражений: одни вообще считают его неправильным, другие считают неправильным применение его к явлению движения воды через песчаные грунты в естественном их состоянии и положении и наконец третьи возражают против неограниченного расширения пределов его применимости.

Для того чтобы взвесить все соображения за и против закона Дарси, необходимо проследить и оценить те выводы, которыми располагает в настоящее время теория движения грунтовых вод.

Движение грунтовых вод можно с некоторым приближением рассматривать как движение жидкости через очень тонкие трубки.

В общем виде это движение аналитически выражается известной формулой Прони (Prony), выведенной последним еще в 1804 г. на основании опытов Купле (Couplet), Боссю (Bossut) и Дюбуа (Dubuat):

$$dl = av + bv^2, \qquad \text{(II)}$$

где dl — гидравлический уклон, a и b — коэфициенты, зависящие от диаметра трубки, температуры и других физических свойств жидкости, и v — скорость движения жидкости.

Чем меньше скорость v и чем меньше диаметр трубки, тем большее значение приобретает первый член правой части уравнения (II). В пределе, когда второй член становится бесконечно-малой величиной, уравнение (II) приобретает вид: $dl = av$ и выражает ламинарное движение.

В 1846 г. Пуасейль (Poisseuille) на основании своих многочисленных опытов установил, что движение жидкости по волосным трубкам есть ламинарное движение, аналитически выражающееся формулой:

$$v = \frac{\gamma D^2}{32\eta} I,$$

где v — скорость, I — гидравлический уклон, D — диаметр трубки, η — коэфициент внутреннего трения или вязкости и γ — удельный вес жидкости.

Сравнивая движение жидкости по волосным трубкам с движением воды через песок, следует отметить следующие особенности последнего явления:

1) канальцы, образованные промежутками между зернами песка и служащие путями движения воды при фильтрации, не имеют цилиндрической формы и не обладают одинаковым по всей длине поперечным сечением;

2) длины канальцев больше толщины песчаного фильтра;

3) действительные скорости движения воды по канальцам не равны средней скорости фильтрации

Несмотря на это принципиальное различие, практически можно считать, что скорость фильтрации воды через мелкий песок, как и при движении жидкости по волосным трубкам, пропорциональна первой степени уклона, так как длины канальцев пропорциональны толщине песчаного фильтра, а действительные скорости пропорциональны средней скорости фильтрации.

Дарси на основании своих классических опытов с фильтрацией воды через непромытые пески в 1856 г. установил, что действительно скорость пропорциональна первой степени уклона.

Позднее целый ряд исследователей, а именно Вейсс (Th. Weiss) в 1865 г., Хаген (Hagen) в 1869 г., Хаврез (Havrez) в 1874 г., Зельгейм (Seelheim) в 1880 г., Величковский в 1884 г., Пифке (Piefke) и Кинг (King) в 1885/86 г., Клавенад (Clavenad) и Бюсси (Bussy) в 1890 г., Хазен (Hazen) в 1892 г., Мазони (Masoni) в 1895 г., Слихтер (Slichter) в 1897/98 г., Кресник (Kresnik) в 1906 г., Н. Н. Павловский в 1922—1932 гг. и многие другие в отношении мелких и среднезернистых песков и небольших скоростей фильтрации в общем подтвердили опытным и теоретическим путем линейную пропорциональность между уклоном и скоростью.

Но все эти опыты и выводы относились к мелких пескам и незначительным скоростям. Лабораторные же опыты с более крупными песками, гравием, щебнем, а также с мелкими песками, но при значительных скоростях, показали отклонения от линейной зависимости между скоростью и уклоном.

1. Крёбер (Kröber), произведший в 1884 г. обширные и тщательно обставленные опыты с кварцевыми песками, разделенными через сита на отдельные фракции, пришел к выражению:

$$v = 173 \left(\frac{d}{90} I\right)^{\frac{0{,}8+d}{0{,}8+2d}} \text{ см/сек},$$

где d — средний диаметр зерна в сантиметрах.

2. Хазен прямо указывал в 1892 г., что полученное им уравнение $v = Ad^2_w I$ справедливо лишь для песков, эффективное зерно которых не превышает в поперечнике $d_w = 3$ *мм* (A — постоянная для данного грунта величина).

3. Кресник для крупнозернистых грунтов и больших скоростей вывел эмпирическую формулу, по которой уклон пропорционален второй степени скорости.

4. Пифке и Кинг на основании опытов (1885/86 г.) с мелкими песками, но при сравнительно больших гидравлических уклонах получили результаты, которые приводят к выводу, что чем мельче песок, тем при меньшей скорости наступает момент, когда зависимость между скоростью и уклоном становится явно нелинейной.

5. Опыты с мелкими вулканическими песками, произведенные Мазони при больших уклонах, показали также отклонение от линейной зависимости между скоростью и уклоном.

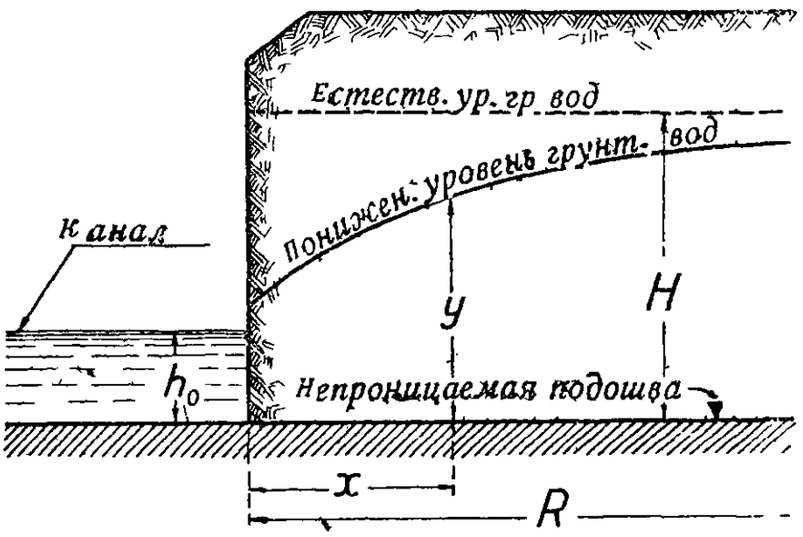


Рис. 54

Из этого краткого обзора видно, что закон Дарси справедлив только при известных условиях, а именно когда крупность частиц грунта и скорость фильтрации не слишком велики.

В 1863 г. Дюпюи, исходя из теоретических рассуждений и из опытов Дарси, вывел аналитическое выражение закона движения грунтовых вод к открытым водоемам (каналам, рекам, озерам). Он сделал прежде всего ряд допущений:

1) грунт однороден как сверху вниз, так и в стороны;

2) естественный уровень грунтовых вод представляет за пределами действия канала горизонтальную свободную плоскость;

3) дно канала или реки совпадает с горизонтальной поверхностью непроницаемой подошвы водоносного слоя (рис. 54).

Так как скорость движения грунтовых вод обыкновенно очень мала, то в уравнении Прони (II) можно отбросить в правой части член bv^2. Тогда в согласии с формулами Пуасейля и Дарси будет

$$v = kI. \qquad (1)$$

Обозначив через v_y среднюю скорость просачивания воды через поперечное сечение, находящееся на расстоянии x от уреза воды в канале и имеющее действующую высоту y и ширину, равную длине участка канала l, заменив I на $\frac{dy}{dx}$ и обозначив через q количество воды, протекающей в единицу времени через указанное сечение, Дюпюи получил уравнение:

$$v_y = k\,\frac{dy}{dx},$$

откуда:

$$q = Fv_y = ylk\,\frac{dy}{dx},$$

или:

$$ydy = \frac{q}{lk}dx.$$

Интегрируя последнее выражение, он получил далее:

$$y^2 = \frac{2q}{lk}x + C.$$

Подставляя вместо y величину h_0 и соответственно $x = 0$, получим:

$$h_0^2 = \frac{2q}{lk} \cdot 0 + C,$$

откуда $C = h^2_0$.

Подставляя $C = h^2_0$ в предыдущее выражение, получаем окончательную формулу, выражающую движение воды к каналу:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{2q}{lk}x. \qquad (2)$$

Рассуждая подобно вышеизложенному, Дюпюи вывел также формулу для круглых шахтных и трубчатых колодцев:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k}\ln\frac{x}{r_0}. \qquad (3)$$

К этой же формуле на основе практических откачек пришел в 1870 г. А. Тим, а поэтому формулу (3) и вытекающие из нее часто называют формулами Дюпюи-Тима.

Обозначения в формуле (3) видны из рис. 55 и имеют те же значения, что и в формуле (2), причем r_0 — радиус колодца.

По мере увеличения горизонтального расстояния x от каптажного сооружения (канавы, галлереи, колодцы) возрастает и величина y, пока наконец на расстоянии R высота пониженного уровня не достигнет предельного значения H, равного высоте непониженного уровня грунтовых вод. Тогда, подставляя вместо x и y соответственно R и H, получим вместо уравнения (2):

$$H^2 - y^2 = \frac{2q}{lk}(R - x) \qquad (2'),$$

и вместо уравнения (3):

$$H^2 - y^2 = \frac{q}{\pi k}\ln\frac{R}{x}. \qquad (3')$$

Величина R называется пределом действия дренирующего (каптажного) сооружения, а в частном случае круглого шахтного или трубчатого колодца — радиусом действия.

Несмотря на то, что формулы Дюпюи-Тима с достаточной для практики точностью многократно были использованы и подтверждены на практике грунтового водоснабжения как самими авторами, так и очень многими другими гидрологами и гидротехниками [Люгер, Вейраух, Е. Принц, Краснопольский и многие другие], все же имеются противники и этих формул и вообще закона Дарси.

Особенно резко против закона Дарси выступил в 1878 г. и подтвердил свои возражения в 1914 и 1921 гг. О. Смрекер (O. Smrecker).

Анализируя основанную на законе Дарси формулу (3′), Смрекер рассуждает так: если в формуле (3′) величина $R = \infty$, то и $H = \infty$, что является нелепостью, ибо H — конечная величина (мощность водоносного

слоя). Следовательно формула (3′) и самый закон Дарси, из которого она выведена, неверны.

На основании результатов пробных откачек, произведенных А. Тимом близ Страсбурга и Эндерсом (Enders) близ Аугсбурга, Смрекер составил следующее выражение закона движения грунтовых вод:

$$I = av^2 + bv^{\frac{3}{2}}$$

или сокращенно:

$$I = mv^{\frac{3}{2}}.$$

Эти формулы Смрекер предложил применять для выражения движения грунтовых вод вообще.

Если в формулу Крёбера:

$$I = Av^{\frac{0{,}8+2d}{0{,}8+d}},$$

где d выражает величину среднего диаметра частиц грунта, подставить $d = 0{,}8$ *см*, то она совпадает с уравнением Смрекера:

$$I = Av^{\frac{3}{2}}.$$

С другой стороны, известно, что при пробных откачках, произведенных А. Тимом вблизи Страсбурга и Аугсбурга, дело касалось очень больших скоростей; водоносные слои состояли из крупного гравия, свойственного аллювиальным отложениям верхнего течения Рейна. Не приходится поэтому удивляться, что у Смрекера получилась такая зависимость, которая совпадает при крупных грунтах с формулой Крёбера и вообще обнаруживает отклонение от закона Дарси.

Таким образом выводы Смрекера, как основанные исключительно на единичных опытных данных, не дают еще права распространять его формулу на все случаи движения грунтовых вод при всяких скоростях и при всяком строении водоносных грунтов. Если бы Смрекер выразил общий закон движения грунтовых вод формулой

$$I = Av^n,$$

где n — величина переменная и в частном случае может равняться единице, тогда это не противоречило бы и целому ряду результатов лабораторных опытов, и теоретическим выводам, и наблюдениям над колодцами и каптажными галлереями.

В 1919 г. Луммерт, в 1922 г. Ротер (Rother), Хохедер (Hocheder), Верслюис (Wersluys) и целый ряд других гидрологов выступили категорически против предложенного Смрекером закона движения грунтовых вод и для большинства случаев практики подтвердили справедливость закона Дарси; Кирилейс (1911 г.), Больман (1913 г.), Энцвейлер (1918 г.), И. Шульце (1924 г.), В. Зихардт (1928 г.) и еще целый ряд авторов трудов по понижению грунтовых вод также стали на сторону закона Дарси, мотивируя это практическими соображениями (отсутствие на практике слишком больших скоростей и уклонов, простота и удобоприменимость основанных на законе Дарси расчетных формул).

Однако с применением закона Дарси в некоторых случаях надо поступать осторожно.

В частности при понижении грунтовых вод встречается немало таких условий, когда без известных ограничений применение закона Дарси недопустимо.

К числу таких условий следует отнести следующие:

1. У наружной поверхности колодца благодаря интенсивной откачке создается такой уклон поверхности уровня грунтовой воды, при котором движение воды переходит из ламинарного в турбулентное.

2. На бесконечно-большом (теоретически) и на достаточно большом конечном (практически) расстоянии от колодца или группы колодцев движение грунтовой воды прекращается, а следовательно закон Дарси как закон движения теряет силу. Смрекер, возражая против справедливости закона Дарси для движения грунтовых вод вообще, воспользовался совершенно неправильно именно этим случаем. Положив $R = \infty$, он пришел к выводу, что тогда по закону Дарси $H = \infty$, т. е. нелепость, ибо H в действительности конечная величина. Если получилась нелепость, то не благодаря несправедливости закона Дарси для движения грунтовых вод, а благодаря тому, что Смрекер применил закон д в и ж е н и я Дарси к случаю покоящейся грунтовой воды.

Из приведенного краткого сопоставления различных точек зрения на явление движения грунтовых вод можно сделать следующие выводы:

1. Лабораторные опыты, произведенные многочисленными исследователями на протяжении более чем полстолетия, показали, что при фильтрации воды через пористые песчаные грунты для не слишком больших уклонов сохраняется закон Дарси, т. е. закон пропорциональности уклона первой степени скорости.

2. Для скоростей и уклонов, превосходящих некоторые предельные, для каждого рода грунта различные значения, линейная зависимость между скоростью и уклоном нарушается и заменяется зависимостью вида: $I = av + bv^2$ или $I = av^n$, где a, b и n — постоянные для данного грунта величины.

3. Для крупного гравия и щебня наиболее близкие к действительности результаты дает по наблюдению и выводах Форхгеймера и отчасти Крёбера и Цункера уравнение вида $I = av^n$, где a и n — величины, зависящие от рода грунта.

4. Формула Смрекера $I = av^{\frac{3}{2}}$ представляет частный случай формулы $I = av^n$ и справедлива только для очень крупнозернистых грунтов и больших скоростей.

§. 2. ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОГО ТРУБЧАТОГО КОЛОДЦА ПРИ НЕНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ВОДАХ

1. Допущения и ограничения

Принимая практически справедливым для большинства случаев понижения уровня грунтовых вод закон Дарси, необходимо однако оговориться, что нижеприводимые рассуждения будут относиться к условиям, определяемым следующими допущениями и ограничениями:

1. Водоносный грунт однороден как сверху вниз, т. е. от поверхности естественного уровня грунтовой воды до водонепроницаемой подошвы, так и во все стороны от колодца, из которого производится откачка воды, т. е. $k = \text{const}$ в пределах рассматриваемого объема грунта.

2. Скорости движения грунтовой воды менее тех предельных значений, при которых закон Дарси теряет свою практическую справедливость.

3. Движение грунтовой воды горизонтально: под i понимается отношение потери напора или величины понижения уровня к длине горизонтального пути, т. е. $i = \frac{dy}{dx}$ в каждой данной точке.

4. Коэфициент k, называемый «коэфициентом фильтрации» или «коэ-

фициентом водопроницаемости», при чисто песчаном грунте зависит от размеров, формы и расположения зерен последнего при прочих равных условиях (температура, состав воды и пр.). Для каждого грунта k определяется как средняя скорость фильтрации через него воды при уклоне $\frac{dy}{dx} = i = 1$.

2. Теория одиночного трубчатого колодца Дюпюи-Тима

Для вычисления количества воды, притекающей к круглому шахтному или трубчатому колодцу с проницаемой боковой поверхностью, обычно применяется формула Дюпюи-Тима:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{x}{r_0}, \qquad (3)$$

где:

y — высота уровня грунтовой воды в какой-либо точке, находящейся в пределах влияния колодца;

x — горизонтальное расстояние этой точки от оси колодца;

h_0 — высота уровня грунтовой воды непосредственно у наружной боковой поверхности колодца;

q — количество воды, откачиваемой из колодца в единицу времени, равное количеству воды, притекающей в колодец из окружающего его грунта (дебит колодца);

k — коэфициент водопроницаемости грунта;

r_0 — радиус колодца,

причем y, x, h_0, r — измеряются в метрах, k — *м/сек*, q — *м³/сек*.

Для того чтобы учесть вышеприведенные допущения и ограничения, необходимо несколько ближе подойти к рассмотрению тех зависимостей между отдельными величинами, которые определяют явление, происходящее при откачке воды из трубчатого колодца.

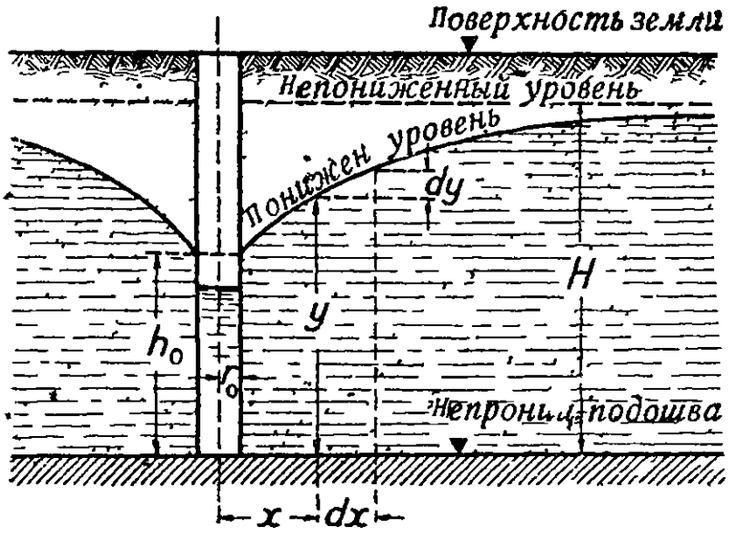


Рис. 55

При действии трубчатого колодца притекающая к нему грунтовая вода на пути своего движения испытывает сопротивление со стороны частиц грунта, благодаря чему уровень ее по мере приближения к колодцу постепенно понижается, образуя воронку, ось которой совпадает с осью колодца. В вертикальном сечении верхняя поверхность воронки выражается некоторой кривой пониженного уровня грунтовой воды (рис. 55). Количество воды, притекающей в колодец в единицу времени, на основании закона неразрывности движения равно тому количеству воды, которое в ту же единицу времени просачивается через любую цилиндрическую поверхность, концентрическую с поверхностью колодца. Если радиус основания такой цилиндрической поверхности обозначить через x и высоту — через y, то уклон поверхности уровня грунтовой воды во всех точках, находящихся на расстоянии x от оси колодца, будет:

$$i = \frac{dy}{dx}.$$

Средняя скорость движения воды через эту цилиндрическую поверхность на основании закона Дарси выражается так:

$$v = k\frac{dy}{dx}.$$

Боковая поверхность цилиндра $F = 2\pi xy$.

Количество грунтовой воды, протекающей через эту поверхность в единицу времени, определяется из уравнения:

$$q = Fv = 2\pi xyk\,\frac{dy}{dx}. \tag{a}$$

После некоторых преобразований и интегрирования из уравнения (a) получается:

$$y^2 = \frac{q}{\pi k}\ln x + C. \tag{b}$$

Если вместо y подставить высоту уровня y_1 в какой-нибудь определенной точке, удаленной от оси колодца на расстояние x_1, то получим:

$$y_1^2 = \frac{q}{\pi k}\ln x_1 + C. \tag{c}$$

Определив из уравнения (c) величиину C и подставив ее в уравнение (b), будем иметь:

$$y^2 - y_1^2 = \frac{q}{\pi k}\ln\frac{x}{x_1}, \tag{4}$$

откуда выражение для дебита колодца получается в следующем виде:

$$q = \frac{\pi k\,(y^2 - y_1^2)}{\ln x - \ln x_1}. \tag{5}$$

Уравнение (3) представляет частный случай уравнения (4), когда $x_1 = r_0$ и $y_1 = h_0$.

Если высоту естественного уровня грунтовой воды обозначить через H, а расстояние от центра колодца до тех удаленных точек местности, где пониженный уровень грунтовой воды почти сливается с непониженным, через R, то после подстановки в уравнение (3) H и R, как частных значений для y и x, получим:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k}\ln\frac{R}{r_0} \tag{6}$$

или:

$$q = \frac{\pi k\,(H^2 - h_0^2)}{\ln R - \ln r_0} \tag{6'}$$

Так как $H - h_0 = S_0$ отвечает понижению уровня воды в грунте у колодца и $H^2 - h_0^2 = (H + h_0)(H - h_0)$, то уравнение (6′) можно написать в следующем виде:

$$q = \frac{2\pi k\,(2H - S_0)\,S_0}{\ln R - \ln r_0}. \tag{6''}$$

В предыдущем изложении общей теории движения грунтовых вод было указано, что закон Дарси теряет свою справедливость при скоростях, превышающих определенную для каждого грунта критическую величину. Чем более значительно скорость движения грунтовых вод превышает величину критической скорости, тем более зависимость между скоростью и уклоном отклоняется от линейной пропорциональности. Для колодца определенного диаметра и находящегося в определенных условиях действия

(т. е. при определенных значениях величин: H, k, h_0, R и q) скорость движения грунтовой воды возрастает по мере приближения к колодцу и становится наибольшей у самой наружной поверхности последнего.

В большинстве случаев практического выполнения искусственного понижения вблизи колодцев развиваются такие скорости, которые в несколько раз больше критических.

Поэтому следует признать, что уравнения Дюпюи-Тима для частного случая движения грунтовой воды у самой боковой поверхности колодца, т. е. уравнения (6), (6′) и (6″), не только в меньшей степени справедливы, чем уравнения (4) и (5) для более удаленных пунктов в пределах влияния колодца, но при достаточно большой глубине понижения уровня воды в колодце и совершенно не применимы.

Ввиду ограниченной применимости уравнений (6), (6′) и (6″), приводящих иногда к неправильным результатам, и невозможности пользования ими иногда даже для предварительных расчетов многие исследователи пытались найти более удовлетворительное аналитическое выражение действительного явления движения воды к колодцу.

К числу таких выражений относятся уравнения Нуртье (Nourtier), выведенные на основании особой теории, независимой от закона Дарси, а именно:

1. Для ненапорной грунтовой воды:

$$q = \frac{\pi p \sqrt{2}}{k\sqrt{3}} \sqrt{DS(3H^2 - 3HS - S^2)}, \qquad (7)$$

где:

q — дебит колодца;
p — пористость грунта;
k — коэфициент, характеризующий водопроницаемость грунта;
D — диаметр колодца;
S — понижение уровня воды в колодце;
H — высота непониженного уровня грунтовой воды относительно водонепроницаемой подошвы.

2. Для напорной грунтовой воды:

$$q = \frac{\pi p h \sqrt{2}}{\sqrt{k}} \sqrt{DS}, \qquad (8)$$

где h — средняя мощность водоносного слоя, а прочие обозначения те же, что и для ненапорной воды.

Эти уравнения не нашли еще применения при расчете установок понижения уровня грунтовых вод, а потому и не имеется достаточных оснований для оценки их практической пригодности и надежности.

3. Теория Козени (Kozeny)

В последнее время (с 1927 г.) начала привлекать к себе внимание новая теория колодца — теория Козени.

В статье, опубликованной в 1927 г.[1], Козени, исходя из закона Дарси и уравнения неразрывности движения воды в пределах от бесконечно удаленных от колодца пунктов до уровня воды внутри колодца, пришел к следующему уравнению:

$$Q = 2\pi k H \left(1 - \frac{h}{H}\right) r_0 S, \qquad (9)$$

[1] J. Kozeny, Über Grundwasserbewegung, „Wasserkraft und Wasserwirtschaft", 1927.

где:

Q — дебит колодца;

k — коэфициент водопроницаемости грунта;

H — высота непониженного свободного уровня грунтовой воды относительно водонепроницаемой подошвы;

h — высота уровня воды в колодце относительно его дна, которое должно находиться на уровне водонепроницаемой подошвы;

r_0 — радиус колодца;

S — функция, выражающаяся следующим образом:

$$S = \frac{\pi}{2}\cos\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{h}{H}\right)\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x} - 2\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{\sin n\pi\left(1-\frac{h}{H}\right)}{(2n-1)(2n+1)}\cdot\frac{\Delta i \lg H_0(2inx)}{\Delta x},$$

где: $x = \frac{\pi}{2}\cdot\frac{r_0}{H}$; $H_0(ix)$ — функция Ханкеля (Hankel) нулевого порядка с мнимым аргументом.

При этом исчисленные значения выражения

$$\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x}$$

находятся из следующей табл. 12.

Таблица 12

x	$iH_0(ix)$	$i\lg H_0(ix)$	$\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x}$
12	0,0000014	0,14613—6	0,4548
9	0,0000324	0,51054—5	0,4650
5	0,00235	0,37103—3	0,4802
4	0,0071	0,85126—3	0,4931
3	0,0221	0,34439—2	0,5160
2	0,0725	0,86034—2	0,5680
1	0,2681	0,42830—1	0,6394
0,8	0,3599	0,55618—1	0,6921
0,6	0,4950	0,69460—1	0,7802
0,4	0,7095	0,85065—1	0,9845
0,2	1,1157	0,04755	1,4165
0,1	1,546	0,18920	—

Для доказательства справедливости уравнения (9) Козени (Kozeny) воспользовался данными произведенной им откачки воды из «колодца» диаметром 2 *см*, установленного в лабораторной модели бассейна грунтовых вод с величиною $H = 12{,}2$ *см*.

Для этой модели получается:

$$x = \frac{\pi r_0}{2H} = \frac{3{,}14\cdot 1}{2\cdot 12{,}2} = 0{,}128,$$

т. е. величина, которая значительно отличается от соответствующей величины действительных колодцев.

Согласно табл. 12 находятся значения: $\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x}$; $\frac{\Delta i \lg H_0(2ix)}{\Delta x}$; $\frac{\Delta i \lg H_0(4ix)}{\Delta x}$; $\frac{\Delta i \lg H_0(6ix)}{\Delta x}$ и вообще все значения: $\frac{\Delta i \lg H_0(2nix)}{\Delta x}$.

Если высота воды в колодце $h = 8{,}1$ *см*, то $1 - \frac{h}{H} = \frac{1}{3}$, а потому:

$$S = \frac{\pi}{2}\cos\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{h}{H}\right)\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x} - 2\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{\sin n\pi\left(1-\frac{h}{H}\right)}{(2n-1)(2n+1)}\cdot\frac{\Delta i \lg H_0(2inx)}{\Delta x} =$$

$$= 1{,}57\cdot\cos 30^\circ\cdot 1{,}42 - 2\frac{\sin 60^\circ}{3}\cdot 0{,}984 - 2\frac{\sin 120^\circ}{15}\cdot 0{,}780 - 2\frac{\sin 180^\circ}{35}\cdot 0{,}692 -$$

$$- 2\frac{\sin 240^\circ}{63}\cdot 0{,}639 - 2\frac{\sin 300^\circ}{99}\cdot 0{,}568 - 2\frac{\sin 360^\circ}{143}\cdot 0{,}568 - \ldots = 1{,}308.$$

Подставляя это значение S в уравнение (9), при известном значении $k = 0{,}5$ *см/сек*, получим:

$$Q = 2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}5\cdot\frac{1}{3}\cdot 12{,}2\cdot 1\cdot 1{,}308 = 16{,}7\ см^3/сек.$$

В действительности Козени получил при уровне воды в колодце $h = 8{,}1$ *см* дебит $Q' = 15{,}8\ см^3/сек$, т. е. близкий к вычисленному.

Как видно из табл. 12, при достаточно больших значениях аргумента x выражение $\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x}$ остается почти постоянным. Заметим попутно, что значение этой величины можно считать постоянным, начиная с $x = 2$ и выше. Следовательно, если $H = 10$ *м*, то $r_0 \approx 13$ *м* и $d_0 \approx 26$ *м*, т. е. $\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x}$ можно считать постоянным только для круглых котлованов, глубина которых менее их размеров в плане, что совершенно не соответствует размерам трубчатых колодцев.

Итак, только для очень больших значений $x = \frac{\pi r_0}{2H}$ можно считать, что

$$\frac{\Delta i \lg H_0(ix)}{\Delta x} = \frac{\Delta i \lg H_0(2inx)}{\Delta x} = C = \text{const}.$$

Положив, что:

$$1 - \frac{h}{H} = \zeta,$$

получим.

$$\frac{\pi}{2}\cos\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{h}{H}\right) - 2\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{\sin n\pi\left(1-\frac{h}{H}\right)}{(2n-1)(2n+1)} = f(\zeta).$$

Следовательно

$$S = f(\zeta)\cdot C \text{ и } Q = 2\pi kHr_0 C\zeta f(\zeta). \qquad (10)$$

Значения $f(\zeta)$ при различных частных значениях ζ, а также произведения $\zeta f(\zeta)$ приведены в табл. 13.

Таблица 13

ζ	$f(\zeta)$	$\zeta f(\zeta)$	$Q = 2\pi kHr_0 C\zeta f(\zeta) = A\zeta f(\zeta)$
0	$\frac{\pi}{2} = 1{,}57$	0	0
$\frac{1}{12}$	1,25	0,104	0,104 A
$\frac{1}{6}$	0,983	0,1638	0,1638 A
$\frac{1}{4}$	0,814	0,203	0,203 A
$\frac{1}{3}$	0,671	0,224	0,224 A
$\frac{1}{2}$	0,474	**0,237**	**0,237** A
$\frac{3}{4}$	0,224	0,168	0,168 A
1	0	0	0

Из этой таблицы видно, что при $\zeta = \frac{1}{2}$ произведение $\zeta f(\zeta)$, а вместе с ним и Q являются максимальными

Здесь Козени впадает в ту же ошибку, в которую впадало до него большинство авторов, а именно он во всех своих рассуждениях принимает за h высоту уровня воды в колодце, а не у наружной поверхности колодца, тогда как эти две величины тем более отличаются одна от другой, чем больше понижение уровня воды в колодце и следовательно чем больше дебит колодца Даже не входя в оценку правильности математических рассуждений Козени при выводе уравнений (9) и (10), можно сказать, что высота уровня грунтовой воды не может рассматриваться в качестве непрерывной функции в пределах от высоты непонижeнного уровня воды в грунте до высоты пониженного уровня в самом колодце (включительно), так как движение воды через поры грунта представляет собою явление совершенно иного порядка, чем движение воды через фильтрующую поверхность колодца. Если в грунте поверхность уровня притекающей к колодцу воды представляется в меридиональном сечении теоретически плавной кривой, то переход от уровня воды снаружи колодца к уровню воды в колодце скачкообразный, отвесный Как бы ни выражать аналитически непрерывную кривую пониженного уровня грунтовой воды, эта аналитическая зависимость ни в коем случае не может включать в себя уровень воды внутри колодца А между тем Козени все свои рассуждения основал именно на этой непрерывности функции В результате допущения этой ошибки даже для частного случая своего опытного колодца Козени пришел к неверному результату у него получилось, что при понижении уровня воды в колодце до половины высоты непонижeнного уровня грунтовой воды дебит колодца достигает максимальной величины, а с дальнейшим понижением уровня воды в колодце дебит начинает уменьшаться, доходя до нуля при понижении уровня воды в колодце до самого дна.

Козени сам заметил абсурдность этого результата, так как собственные его наблюдения над опытным колодцем обнаружили, что максимальный дебит получается при понижении уровня воды в колодце до самого дна, как это видно из нижеследующей табл. 14.

Таблица 14

Высота уровня воды в колодце h *см*	$\zeta = 1 - \frac{h}{H}$	Теоретич. Q *см³/сек* по формуле (9)	Фактически измеренный дебит Q' *см³/сек*
11,6	0,07	3,9	5,31
11,0	0,11	6,4	9,10
10	0,20	11,24	11,3
8,1	0,35	16,7	15,8
6,2	0,50	18,9	18,2
4,7	0,62	17,6	22,2
4	0,68	16,0	22,8
0	1,00	0	22,8

Последние три строки двух последних граф особо резко подчеркивают противоречие теории Козени с действительностью даже в том случае если вычислять Q по формуле (9)

Если же произвести вычисления по формуле $Q = 2\pi k H r_0 C \zeta f(\zeta)$, приняв $C = \text{const} = 0{,}5$ и $\zeta f(\zeta)$ по табл 13, то для опытного колодца Козени получатся значения Q, ничего общего не имеющие с непосредственно измеренными. Например для $\zeta = 0{,}11$ получим по табл 13 (интерполяцией)

$$\zeta f(\zeta) = 0{,}14$$

и

$$Q = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}5 \cdot 12{,}2 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}14 = 2{,}68 \ см^3/сек,$$

тогда как $Q' = 9{,}1$ *см³/сек.*

Для $\zeta = 0{,}5$ по табл. 13 имеем

$$\zeta f(\zeta) = 0{,}237$$

и

$$Q = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}5 \cdot 12{,}2 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}237 = 4{,}55 \ см^3/сек,$$

тогда как $Q' = 18{,}2$ *см³/сек*

Из последних примеров видно, что даже для таких колодцев, как опытный колодец Козени, т е при $x > 0{,}1$, формула (10) совершенно непригодна, тем более она не пригодна для колодцев, применяемых на практике, т. е. с значениями $x = \frac{\pi r_0}{2H} < 0{,}1$.

Следовательно уравнение (10) совершенно должно быть отброшено, что впрочем Козени и делает в своих дальнейших рассуждениях. Продолжим рассмотрение формулы:

$$Q = 2\pi k H r_0 S\zeta. \tag{9}$$

Видя решительное расхождение этой формулы с действительностью при $\zeta > 0{,}5$, Козени вынужден признать, что эта его формула может иметь практическое применение только для очень малых значений ζ, т. е. для сравнительно небольших глубин понижения уровня воды в колодце. Что же касается определения дебита колодца при более значительных ζ, то Козени вводит формулу перехода в виде уравнения

$$Q = Q_{max}\left[1 - \left(\frac{h}{H}\right)^n\right]^m, \tag{11}$$

где m и n — константы, определяемые следующим образом.

Берутся три различных, достаточно близких к 1 значения $\frac{h}{H}$, и по формуле (9) вычисляются три значения Q. Затем для тех же $\frac{h}{H}$ и Q составляются три уравнения (11), решаются совместно и находятся константы: Q_{max}, m, n.

Тогда при любом $\frac{h}{H}$, пользуясь уравнением (11), можно найти соответствующее значение Q.

Однако такой же прием можно применить и пользуясь уравнением Дюпюи-Тима для больших значений $\frac{h}{H}$ или, иначе, для малых значений понижений уровня у колодца (S_0), которые можно заменить с достаточной точностью величиной понижения уровня воды в колодце (S). Найдя затем из трех уравнений константы Q_{max}, m, n, можно применить для вычисления Q при любых понижениях уровня уравнение типа (11).

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Новая теория Козени 1927 г., самое существенное отличие которой от теории Дюпюи-Тима состоит в том, что дебит пропорционален первой степени радиуса колодца (уравнения 9 и 10), оказалась неприменимой при достаточно больших понижениях уровня в колодце, т. е. для того же условия, при котором неприменима теория Дюпюи-Тима.

2. Определение дебита при любом понижении по Козени можно произвести только при помощи вспомогательного уравнения (11), составленного на основании результатов вычисления Q по формуле (9) при трех различных небольших понижениях уровня воды в колодце, причем уравнение (9) теоретически неправильно, так как в нем принята непрерывность поверхности уровня воды не только за колодцем, но и внутри колодца, чего на самом деле нет. Как бы ни была практически мала ошибка в вычислении Q при малых понижениях уровня воды в колодце, она становится все больше и больше при больших понижениях, если вычислять дебит по формуле (11). Это видно из самой структуры формулы (11). Поясним последнее примером.

В формуле Козени для частного случая примененного им опытного колодца $m = \frac{2}{3}$, $n = 2$, т. е. частный вид уравнения (11) следующий:

$$Q = Q_{max}\left[1 - \left(\frac{h}{H}\right)^2\right]^{\frac{2}{3}}.$$

Допустим, что $\frac{h}{H} = 0{,}75$, но при этом уровень воды снаружи колодца $h_0 = 0{,}8H$ (это близко к действительности).

Определим Q по $\frac{h}{H} = 0{,}75$ и по $\frac{h}{H} = 0{,}8$:

1) $Q = Q_{max}\,(1 - 0{,}75^2)^{\frac{2}{3}} = 0{,}27\,Q_{max}$;

2) $Q = Q_{max}\,(1 - 0{,}8^2)^{\frac{2}{3}} = 0{,}235\,Q_{max}$.

Разница составляет всего 3,5% от Q_{max}. Оба результата мало отличаются друг от друга, поэтому ошибка от принятия уравнения (11), а следовательно и уравнения (9) для достаточно больших значений $\frac{h}{H}$ невелика. Посмотрим, какая разница получится при $\frac{h}{H} = 0$, т. е. при откачке воды в колодце до самого дна. Опыты Эренбергера показали, что в этом случае пониженный уровень воды за колодцем (h_0) составляет около $0{,}5\,H$, т. е. при понижении уровня воды в колодце до дна ($h = 0$) $h_0 \approx 0{,}5\,H$, или $\frac{h_0}{H} \approx 0{,}5$.

Вычислим Q при $\frac{h}{H}=0$ и $\frac{h}{H}=0{,}50$ по той же формуле (11).

1) $Q=Q_{max}\,(1-0)^{\frac{2}{3}}=Q_{max}$;

2) $Q=Q_{max}\,(1-0{,}25)^{\frac{2}{3}}=Q_{max}\cdot 0{,}75^{\frac{2}{3}}=0{,}382\,Q_{max}$.

Разница составляет 62% от Q_{max}

Из этого примера совершенно отчетливо видно, как практически ничтожная ошибка при малых понижениях вырастает в очень значительную при больших понижениях, если пользоваться формулой (11)

Поэтому формулы (9) и (11) Козени 1927 г совершенно неправильны теоретически и непригодны практически, формула (10) для трубчатых колодцев вообще отпадает.

Итак, теория Козени 1927 г. не разрешила вопроса о расчете дебита одиночного колодца Это, повидимому, стало ясно и самому Козени, так как в 1933 г. он уже опубликовывает новую теорию колодца, построенную на совершенно иных основах.

В статье «Теория и расчет колодцев»[1] Козени начинает построение своей теории колодца с опубликованного им в 1931 г. уравнения плоского горизонтального грунтового потока, подстилаемого горизонтальной водонепроницаемой подошвой:

$$f(\zeta)=\zeta^2=\frac{1}{2kQ}(\eta-iq)^2=x+iy, \qquad (12)$$

где:

$\eta(x, y)$ — скоростной потенциал;

$q(x, y)$ — функция потока;

x, y — координаты потока в одной вертикальной плоскости;

Q — общий расход потока.

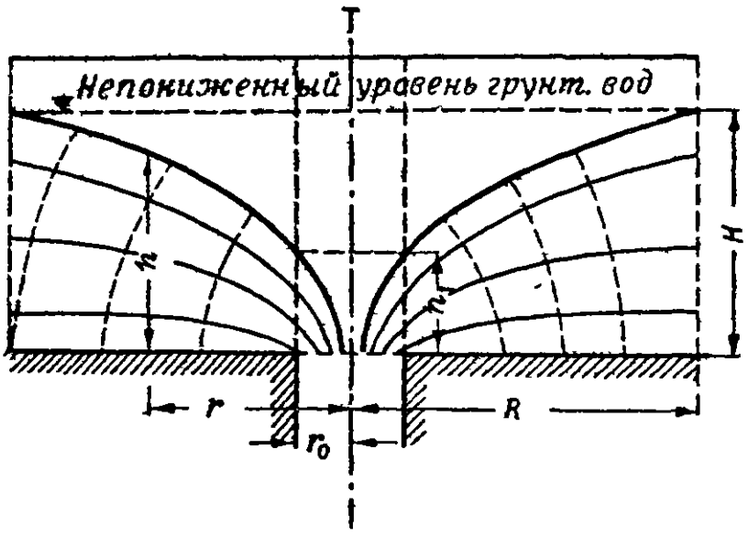


Рис. 56

Путем ряда математических преобразований Козени приходит к уравнению:

$$Q=\frac{k}{2}\,\frac{H^2-h_1^2}{L}, \qquad (13)$$

где:

k — водопроницаемость грунта,

H — полная высота непониженного уровня грунтовых вод,

h_1 — высота пониженного уровня грунта в некоторой точке;

L — горизонтальное расстояние от последней точки до точки, где пониженный уровень переходит в непониженный

Таким образом мы видим полное совпадение уравнения (13) с уравнением Дюпюи для плоского потока.

К аналогичному выводу Козени приходит и для случая радиального потока:

$$Q=\frac{\pi k\,(H^2-h_1^2)}{\ln\frac{R}{r_0}}, \qquad (14)$$

причем модель радиального потока им мыслится в следующем виде (рис. 56).

[1] J. Kozeny, Theorie und Berechnung der Brunnen, „Wasserkraft und Wasserwirtschaft" № 8—10, 1933.

Допустим, что имеется слой песка, лежащего на водонепроницаемой подошве, в которой устроено прикрытое сеткой круглое отверстие для стока воды из песка. Слой песка имеет неограниченные размеры в плане, а за пределами влияния отверстия в этом слое поддерживается высота уровня воды H. Вода через грунт движется по радиальным путям к центру круглого отверстия. Радиус отверстия равен r_0. Радиус воображаемой цилиндрической поверхности, отделяющей область пониженного уровня воды в песке от области непониженного уровня, равен R. Высота пониженного уровня воды в песке в какой-либо точке, лежащей на расстоянии r от центра отверстия, равна h, а высота пониженного уровня над краями отверстия — h_1.

Далее Козени находит, что при $h_1 = 0$ количество стекающей в отверстие воды будет максимальным:

$$Q_{max} = \frac{\pi k H^2}{\ln \frac{R}{r_0}}. \qquad (15)$$

Каким образом при $h_1 = 0$ вода будет попадать в отверстие, представляется совершенно невыясненным, и Козени этот вопрос не освещает.

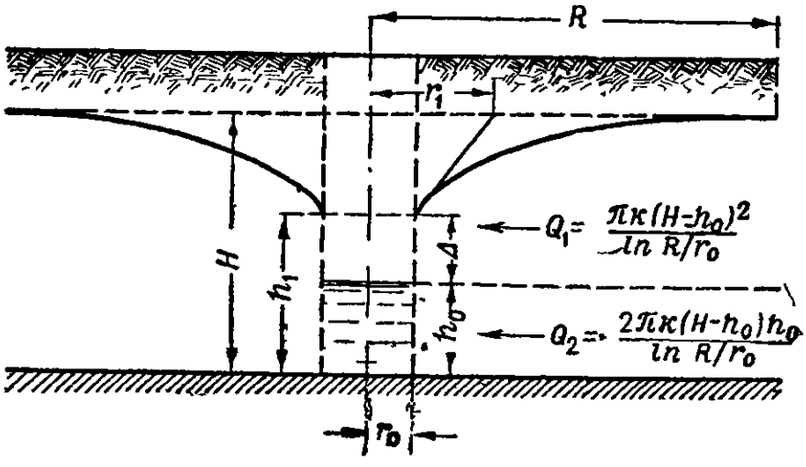


Рис. 57

Воображая затем, что над отверстием в подошве водоносного слоя установлен шахтный колодец (рис. 57) с водопроницаемыми стенками и глухим дном и что из этого колодца производится откачка воды, Козени приходит к уравнению:

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}}, \qquad (16)$$

где h_0 — уровень воды внутри колодца, а не у наружной поверхности. Козени обосновывает это уравнение следующим образом. Он считает возможным разделить поток к колодцу на два слоя верхний слой с горизонтальной постелью на уровне воды в колодце, и нижний слой с верхней горизонтальной поверхностью на высоте h_0 от водонепроницаемой подошвы и с нижней поверхностью непроницаемой подошвы (рис 57).

Считая движение воды в обоих слоях радиальным, Козени находит:

1) количество воды, притекающее в колодец из верхнего слоя:

$$Q_1 = \frac{\pi k (H - h_0)^2}{\ln \frac{R}{r_0}};$$

2) Количество воды, притекающее из нижнего слоя:

$$Q_2 = \frac{2\pi k (H - h_0) h_0}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

Складывая оба эти потока, Козени получает уравнение общего дебита колодца:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}}. \qquad (16)$$

Если вместе с Козени допустить, что грунтовая вода притекает к колодцу в виде двух потоков, то на самом деле получим:

$$Q_1 = \frac{2\pi k (H - h_0 - h_1 + h_0) \frac{H - h_0 + h_1 - h_0}{2}}{\ln \frac{R}{r_0}} = \frac{\pi k (H - h_1)(H + h_1 - 2h_0)}{\ln \frac{R}{r_0}}$$

$$Q_2 = \frac{2\pi k (H - h_1) h_0}{\ln \frac{R}{r_0}};$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{\pi k (H^2 - h_1^2)}{\ln \frac{R}{r_0}},$$

т. е. получим то самое уравнение Дюпюи-Тима, которое хотя и нельзя считать удовлетворительным при достаточно малых значениях h_1 но все же более правдоподобно, чем уравнение (16), в котором h_0 может уменьшаться до нуля

Если $h_0 = 0$, то уравнение (16) преобразуется так

$$Q_{max} = \frac{\pi k H^2}{\ln \frac{R}{r_0}}, \qquad (15)$$

т. е. для колодца с непроницаемым дном и проницаемыми стенками Козени получает ту же формулу, что и для радиального потока к отверстию в водонепроницаемой подошве.

Итак, по теории Козени (1933 г.) дебит колодца будет:

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} \qquad (16)$$

и

$$Q_{max} = \frac{\pi k H^2}{\ln \frac{R}{r_0}}. \qquad (15)$$

Таким образом Козени в 1933 г. отказался от своего вывода, сделанного в 1927 г., что дебит пропорционален первой степени радиуса колодца. Более того, Козени в 1933 г. пришел к тому же самому уравнению Дюпюи-Тима, справедливость которого он решительно отрицал в 1927 г. Наконец Козени пришел к уравнению Дюпюи-Тима в искаженном виде, т. е. к такому уравнению, в котором вместо высоты уровня грунтовой воды h_1 снаружи колодца принята высота уровня воды внутри колодца h_0.

Итак, мы видим, что попытки Козени построить формулы для расчета колодцев, которыми можно было бы заменить не вполне удовлетворительные формулы Дюпюи-Тима (6) — (6″), не привели к удовлетворительным результатам. Эти попытки закончились возвращением к тем же формулам Дюпюи-Тима, если даже не считать вышеуказанного искажения их заменой уровня воды у наружной поверхности колодца уровнем воды в колодце.

4. Выводы о теории Дюпюи-Тима

Итак, наибольшее сомнение вызывают те формулы Дюпюи-Тима (6) — (6″), которые выражают движение грунтовых вод в непосредственной близости к колодцу. Но для целей понижения грунтовых вод важно иметь данные о понижении уровня в пунктах, более или менее удалечных от колодцев.

Что же касается формул, выражающих зависимость между дебитом и высотой пониженного уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодца, то они имели бы большое практическое значение, если бы высоту уровня за колодцем можно было выражать через высоту уровня в самом колодце, так как эту высоту представляется легко измерить при производстве откачки.

При достаточно интенсивной откачке воды из колодца в большинстве случаев практического понижения уровня грунтовых вод глубина воды снаружи колодца превышает глубину воды в колодце на более или менее значительную величину, выражающую сопротивление фильтра и зависящую от целого ряда факторов.

К сожалению в литературе отсутствуют достаточные данные о той закономерности, которая должна несомненно наблюдаться в действительности в отношении высоты напора, поглощаемой сопротивлением колодца. Эту

закономерность можно было бы постепенно выявлять, если бы иметь достаточно большое количество наблюдений над колодцами различных конструкций, с различными сроками эксплоатации, в различных грунтах и при различных скоростях фильтрации через проницаемую поверхность колодцев [1].

Однако на постройках не очень охотно ведутся какие-либо наблюдения и измерения, еще менее охотно опубликовываются подробные результаты наблюдений. Что же касается теоретических выводов, то таковые без опытной проверки не могут иметь большого значения для строительной практики в тех условиях, когда грунт и вода значительно отличаются от идеальных, принимаемых в теории. Между тем в теории колодцев, над которой много работали гидрологи и инженеры водоснабжения, не обращено достаточного внимания на величину сопротивления, так как положение уровня грунтовой воды вне колодцев интересовало лиц, работающих в области водоснабжения, только в исключительных случаях, когда сильное понижение уровня вызывало большое увеличение эксплоатационных расходов. Тогда обращали внимание на величину сопротивления фильтров, но так как эти явления были связаны или с неисправностями и порчей колодцев, или с чрезмерно большим дебитом, то устранением этих препятствий разрешался вопрос значительно проще, чем это могло бы иметь место в установках понижения.

Значительная доля полезной глубины понижения уровня грунтовых вод поглощается сопротивлением колодца. Уменьшение этого сопротивления, очень выгодное в смысле увеличения эффекта понижения, может быть достигнуто не только за счет улучшения фильтрующих качеств колодцев, но и надлежащим выбором предельного дебита колодца, который обеспечивал бы наиболее приемлемое соотношение между количеством откачиваемой воды и диаметром колодца, — с одной стороны — и желательным понижением уровня грунтовых вод — с другой.

Было бы ошибочно стремиться откачивать из каждого колодца возможно большее количество воды, чтобы захватить всю притекающую к котловану воду наименьшим количеством колодцев.

С другой стороны, было бы экономически невыгодно устанавливать слишком большое количество колодцев, чтобы добиться распределения всей массы воды на большее число колодцев и тем уменьшить дебит каждого из них.

Здесь следует находить то среднее решение, которое в итоге дало бы при наилучшем эффекте понижения наивыгоднейший экономический результат.

Но как бы ни были умеренны количества воды, забираемые из каждого колодца, все же, как показывают данные многочисленных понижений, скорости движения грунтовой воды у наружной поверхности фильтра бывают обыкновенно слишком большими для того, чтобы можно было с достаточной для практики точностью применять формулы (6) — (6″).

Признавая вышеуказанные недостатки уравнений Дюпюи-Тима в применении их к движению грунтовой воды непосредственно у колодца, мы, наоборот, можем воспользоваться ими для выражения движения в точках, достаточно удаленных от колодца, где скорость этого движения значительно меньше, а потому закон Дарси может быть применен с большим основанием. Высоту уровня грунтовой воды также легче измерить в удаленной от колодца точке, чем рядом с его наружной поверхностью.

---

[1] Некоторые попытки вывести эту закономерность имеются (А. Тим, Е. Принц), но они относятся только к чистым пескам и гравию. Некоторые основания для определения сопротивления колодцев имеются в теоретических рассуждениях Козени и опытных данных Эренбергера, но и они относятся также к чистым пескам.

В общем виде уравнение Дюпюи-Тима выражается так:

$$y^2 - y_1^2 = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{x}{x_1}. \qquad (4)$$

Подставляя вместо y_1 в уравнение (4) высоту непонижeнного уровня воды над водонепроницаемым слоем H и вместо x_1 — соответствующую величину R, получаем:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}. \qquad (17)$$

Для определения из уравнения (17) величины y в любой точке поля понижения, находящейся на горизонтальном расстоянии x от оси колодца, необходимо знать численные значения величин H, R, q и k.

5. Поправки к формулам Дюпюи-Тима

Прежде чем перейти к рассмотрению дальнейших вопросов теории понижения грунтовых вод, необходимо остановиться на некоторых попытках исправления уравнений Дюпюи-Тима. Еще И. Шульце [1] в 1924 г., выводя свою формулу для R, полагал более правильным выражать уравнение Дюпюи-Тима (17) в исправленном виде, а именно:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{x} - \frac{1}{3} \right). \qquad (18)$$

Вебер [2] в 1928 г. при выводе своей формулы для R также пришел к исправленному уравнению Дюпюи-Тима, а именно:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{x} - \frac{1}{m} \frac{R^m - x^m}{R^m} \right), \qquad (19)$$

где $m = 1 - 2$. Так как обыкновенно $\frac{R^m - x^m}{R^m} \approx 1$, то уравнение (19) можно переписать так:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{x} - \frac{1}{m} \right). \qquad (20)$$

Подобное исправление поддержал в 1933 г. и Козени [3], который пришел к формуле:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{x} - \frac{1}{2} + \frac{x^2}{2R^2} \right),$$

или ввиду незначительности $\frac{x^2}{2R^2}$ к формуле:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \left(\ln \frac{R}{x} - \frac{1}{2} \right). \qquad (21)$$

Как видно из сравнения формул (18), (20) и (21), они отличаются только значением величины m, так как все упомянутые авторы исходили из одних и тех же соображений, но величиной m задавались более или менее произвольно.

Так как уравнение Вебера (19) дано в общем виде, то мы изложим эти соображения по Веберу.

---

[1] I. Schultze, Die Grundwasserabsenkung in Theorie und Praxis, 1924.
[2] Weber, Reichweite von Grundwasserabsenkungen mitls Brunnen, 1928.
[3] J. Kozeny, Theorie und Berechnung der Brunnenta „Wasserkraft u. Wasserwirtschaft" № 8—10, 1933.

Пусть BC на рис. 58 изображает поверхность воронки понижения в определенный момент действия колодца, из которого откачивается в единицу времени количество воды q. Если мы вообразим себе концентрический относительно колодца цилиндр с радиусом основания r, незначительным по сравнению с R, то можем считать, что вся притекающая в колодец вода будет протекать через боковую поверхность этого цилиндра, т. е. $q_r = q$.

Если R — радиус действия колодца, т. е. на расстояниях R совершенно отсутствует понижение уровня грунтовых вод, т. е. $\frac{dH}{dR} = 0$, так как $H = \text{const}$, то через боковую поверхность цилиндра с высотою H и радиусом основания R в направлении колодца нисколько не протекает воды, т. е. $q_R = 0$.

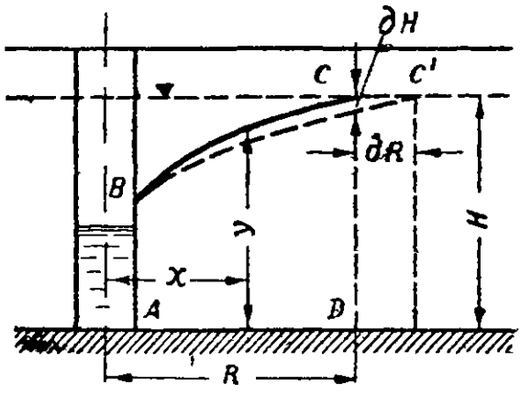


Рис. 58

Следовательно, если притока из пределов R нет, а в колодец притекает в единицу времени все то же количество воды q, то это количество ни из какого другого источника не может быть получено, как из пор грунта в пределах цилиндра радиуса R, т. е. за счет опускания уровня BC

Чем дальше от колодца и чем ближе к сечению CD, тем бо́льшая часть воды поступает за счет понижения уровня воды и тем меньшая часть за счет горизонтального движения из более удаленных точек поля понижения. Если q_x — количество воды, протекающее через боковую поверхность цилиндра с радиусом x и высотою y, то по Веберу можно написать:

$$q_x = q\left[1 - \left(\frac{x}{R}\right)^m\right] = 2\pi xyk\frac{dx}{dx}. \qquad \text{(a)}$$

Если $x = r$, причем r значительно меньше R, а следовательно $\frac{x^m}{R^m} = \frac{r^m}{R^m} \approx 0$, то $q_r = q$; если $x = R$ и $\left(\frac{x}{R}\right)^m = \left(\frac{R}{R}\right)^m = 1$, то $q_R = 0$. Интегрируя уравнение (а), получим:

$$\left.\begin{aligned} \pi k y^2 &= q\left(\ln x - \frac{1}{m}\cdot\frac{x^m}{R^m}\right) + C; \\ \pi k H^2 &= q\left(\ln R - \frac{1}{m}\cdot\frac{R^m}{R^m}\right) + C, \end{aligned}\right\}$$

откуда:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k}\left[\ln\frac{R}{x} - \frac{1}{m}\cdot\frac{R^m - x^m}{R^m}\right], \qquad (19)$$

или при $\frac{x^m}{R^m} \approx 0$:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k}\left(\ln\frac{R}{x} - \frac{1}{m}\right). \qquad (20)$$

Разберем четыре случая.

1-й случай. Точки воронки депрессии B и C (рис 58) в течение некоторого короткого отрезка времени незыблемы. Если по Веберу часть притекающего в колодец количества воды получается за счет понижения уровня воды, т. е. линии BC, то последняя становится по истечении взятого промежутка времени менее выпуклой. Следовательно высота

сечения потока в расстоянии x от оси колодца уменьшается, но уклон в этом сечении не может увеличиться. Следовательно количество притекающей воды со стороны в горизонтальном направлении должно уменьшиться. Это должно вызвать уменьшение притока воды в колодец. Но если этого по Веберу не происходит, то следовательно какая-либо из точек B или C или обе вместе с течением времени смещаются.

2-й случай. Точка B, а вместе с ней и все другие точки понижаются на величину, постепенного уменьшения по мере удаления от колодца до точки C, которая остается на месте. В этом случае чем ближе к колодцу, тем большая часть притока воды в колодец происходит за счет опускания уровня грунтовой воды.

Но это противоречит уравнению (а), по которому при $\frac{r}{R} \approx 0$, $q_x = q$, т. е. все количество притекающей в колодец воды движется по горизонтальным радиальным путям. Это наконец противоречит самому уравнению Дюпюи-Тима с исправлением Вебера (20), по которому при уменьшении y и при постоянном R дебит колодца должен увеличиваться, тогда как Вебером для вывода уравнения (20) принимается $q = \text{const}$

3-й случай. Точка C понижается через определенный промежуток времени, а точка B остается незыблемой. Следовательно понижаются и все другие точки кривой депрессии на величину тем меньшую, чем ближе к колодцу, причем в точке C' на расстоянии $R + dR$ создается некоторый уклон $\frac{dH}{dR} > 0$, т. е. получается некоторая, хотя бы и весьма незначительная, горизонтальная скорость. Так как высота цилиндра радиуса R становится через некоторый промежуток времени меньше, чем была ранее, то количество воды, протекающей через его боковую поверхность по горизонтальным путям, становится меньше Это вполне согласуется и с уравнением Дюпюи-Тима, так как с перемещением точки C увеличивается R, а следовательно уменьшается дебит. Это уменьшение дебита подтверждается практикой

Если же хотят сохранить постоянным q, то с течением времени приходится снижать уровень воды у колодца, т. е. точку B.

Таким образом мы переходим к наиболее вероятному при $q = \text{const}$ случаю, когда B и C одновременно перемещаются.

4-й случай. B и C перемещаются вниз одновременно, а следовательно уровень воды с течением времени опускается во всех точках. Как бы ни было велико расстояние R, оно при отсутствии инфильтрации с поверхности земли все время увеличивается, и в поток включаются постепенно все более и более удаленные частицы воды, содержащейся в порах грунта. Если бы не было пополнения вытекающей из грунта воды инфильтрующимися атмосферными осадками, то R увеличивалось бы с течением времени все больше и больше, а следовательно в любой момент на расстояниях R происходило бы движение воды по радиальным путям, хотя и чрезвычайно медленное.

Из разобранных четырех случаев видно, что приток воды в колодец за счет опускания кривой депрессии (рис. 58) при постоянном дебите может происходит только при условии одновременного опускания точек B и C, т. е. в период неустановившегося состояния воронки депрессии. Для установившегося состояния. т. е. для неизменного положения точек B и C и постоянного дебита колодца, никакого опускания воронки депрессии происходить не может, а все количество откачиваемой воды пополняется инфильтрующимися на площади круга радиуса R атмосферными осадками. Итак, рассуждения Вебера принципиально более или менее справедливы только до момента установления требуемого понижения уровня грунтовой воды. Для искусственного же понижения уровня грунтовых вод основным является соотношение между достигаемыми в определенных пунктах высотами уровня и дебитом колодца при установившемся состоянии, т. е. когда положение уровня в этих пунктах стабилизируется, а дебит будет или постоянным или постепенно уменьшающимся — в случае продолжительного отсутствия или незначительности инфильтрационного притока воды.

Рассматривая с этой самой существенной для искусственного понижения точки зрения формулы Вебера (19) и (20) и аналогичные формулы И. Шульце (18) и Козени (21), мы не можем признать их ни практически более приемлемыми по сравнению с уравнениями Дюпюи-Тима, ни принципиально более правильными.

Последний вывод мы учтем при рассмотрении теории многоколодезной установки.

6. Полный и неполный колодцы; установление величины H

При выводе уравнения (6′) предполагалось, что колодец, из которого производится откачка воды, снабжен фильтрующей поверхностью, доходящей до самого водонепроницаемого слоя, т. е. имелся в виду так называемый «полный» колодец. Но очень часто на практике при большой мощности водоносного слоя колодцы не углублены до водоупора и тогда называются «неполными». В таких случаях обыкновенно вместо мощности водоносного слоя в уравнении (6′) через H обозначают высоту пониженного уровня относительно дна колодца, что нельзя считать теоретически правильным.

В том случае, когда действительная мощность водоносного слоя известна, тогда и при неполном колодце можно было бы, введя соответствующую поправку, пользоваться формулой (6′).

Ф. Форхгеймер на основании опытных откачек составил формулу, выражающую зависимость между полным и неполным колодцами в следующем виде:

$$\frac{H^2 - T^2}{H^2 - h^2} = \sqrt{\frac{T}{t}} \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{2T - t}}, \qquad (A)$$

где:

H — мощность водоносного слоя (рис. 59);

h — высота уровня воды над водоупором в полном колодце,

T — высота уровня воды над водоупором в неполном колодце;

t — высота уровня воды над подошвой неполного колодца.

По опытам Форхгеймера оказалось, что для достижения одинакового понижения как в полном, так и неполном колодцах из полного колодца надо откачивать большее количество воды, чем из неполного, или иначе при откачивании одинакового количества воды из обоих колодцев в неполном колодце достигается большее понижение, чем в полном.

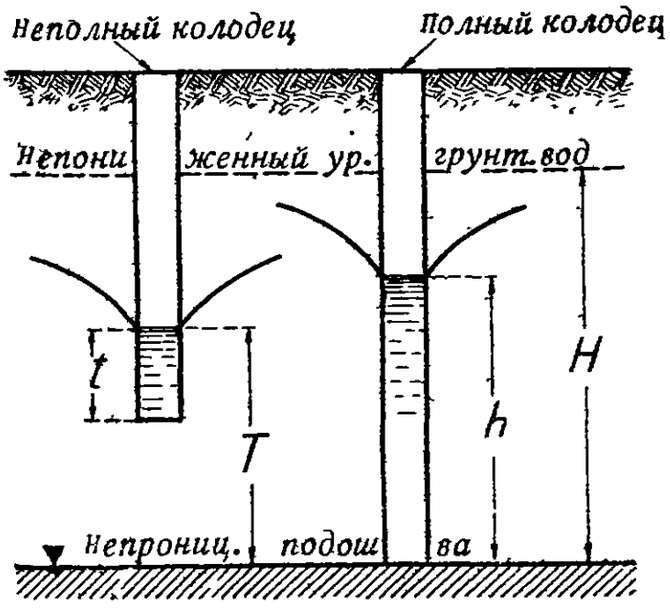


Рис. 59

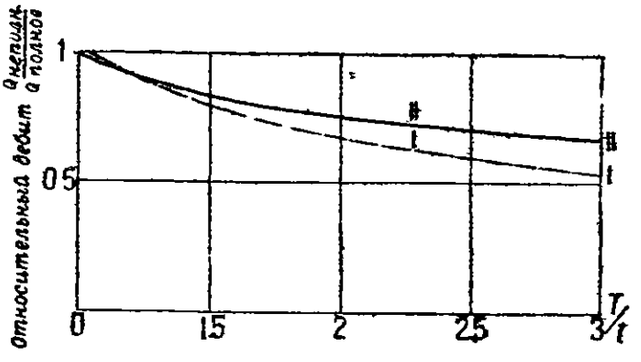


Рис. 60

Если, исходя из этого, продолжать рассуждения дальше, то можно притти к выводу, что при одном и том же дебите можно достигнуть в колодце тем большего понижения, чем меньше глубина колодца. Но чем меньше глубина колодца, тем меньше фильтрующая поверхность, тем большая скорость и тем больший уклон поверхности грунтовой воды устанавливаются непосредственно у колодца. Так как важно не столько понижение уровня воды в самом колодце, сколько вне его, то мелкий колодец не дает на практике желаемого преимущества; приходится снижать его дебит, чтобы не получить чрезмерного уклона уровня грунтовой воды снаружи колодца.

Ротер (Rother, 1904 г.) вывел аналитическим путем уравнение для дебита колодца, не достигающего водонепроницаемого слоя, и рассчитал по нему для определенных условий (диаметра, глубины понижения уровня воды в колодце, рода грунта и пр.) дебиты q колодца при различных глубинах погружения его в водоносный слой.

Если по оси абсцисс откладывать $\frac{T}{t}$, а по оси ординат — отношение дебита неполного колодца к дебиту полного при одном и том же уровне воды в нем и принять относительный дебит полного колодца за единицу, то по Ротеру получается кривая I (рис. 60).

Если считать в уравнении (А) Форхгеймера $h = h_0$ (высоте пониженного уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодца) и вычислить по этому уравнению отношения $\frac{H^2 - T^2}{H^2 - h^2}$ при различных численных значениях $\frac{T}{t}$ (от 1 до 3), то эти отношения будут равны соответственным $\frac{q_{неполн}}{q_{полн}}$ при одних и тех же понижениях уровня грунтовой воды у колодца.

Если полученные таким образом значения $\frac{q_{неполн}}{q_{полн}}$ отложить на вертикальной оси, а на горизонтальной — соответствующие им значения $\frac{T}{t}$, то получим кривую II (рис. 60). Из сравнения кривых I и II видно, что при значениях $\frac{T}{t}$, близких к единице, они довольно точно совпадают, а по мере увеличения $\frac{T}{t}$ — все более и более расходятся, причем значения $\frac{q_{неполн}}{q_{полн}}$ по Форхгеймеру всегда остаются больше. Следует учесть, что в формулу (А) подставляется T — высота уровня воды в самом колодце — вместо высоты уровня у наружной поверхности, т. е. получаются преувеличенные значения отношения $\frac{H^2 - T^2}{H^2 - h^2}$. Чем больше понижение уровня воды в колодце, т. е. чем меньше t и T, тем более преувеличенными становятся значения $\frac{q_{неполн}}{q_{полн}}$ и тем менее справедливой и надежной формула (А), полученная несомненно по результатам небольших понижений уровня, когда разница между уровнем у наружной поверхности колодца и в нем самом незначительна.

Если принять $t = 0$, то $\frac{T}{t} = \infty$ и $\frac{H^2 - T^2}{H^2 - t^2} = \infty$, тогда как $H^2 - T^2$ и $H^2 - t^2$ — конечные величины. Следовательно формула (А) по мере уменьшения t становится все менее и менее справедливой и надежной и при достаточно малых t совершенно неприменима.

Что касается теоретической формулы Ротера, то она не нашла еще практического приложения и практической проверки.

Люгер (Lueger) считал, что ниже плоскости, которая проходит через подошву колодца, не может происходить сколько-нибудь значительного движения тех частичек воды, которые могли бы достигать входа в колодец. На примере он показал, что не получается значительной ошибки, если принять подошву колодца за непроницаемое ложе водоносного слоя. Если однако колодец чрезмерно мелок, то в случае сильного уклона уровня грунто-

вой воды вокруг колодца и при малой глубине слоя воды в нем могут получиться довольно значительные неточности от такого допущения.

Эстер (Oester) и Г. Тим также находили возможным измерять высоту H от подошвы колодца, не достигающего водоносного слоя.

Е. Принц, Кирилейс, И. Шульце при построении теории понижения уровня грунтовых вод в основном приняли ту же точку зрения, но с оговоркой о том, что колодец не должен иметь слишком малую глубину, ибо в противном случае будут приводиться в движение все более и более глубокие слои воды, расположенные ниже подошвы колодца; расчеты, основанные на принятии глубины колодца за мощность водоносного слоя, могут в таких случаях привести к результатам, не соответствующим действительности.

Чтобы этого избежать, необходимо вносить в вычисления поправки на основании практического опыта.

На основании практического опыта Зихардт рекомендует увеличивать вычисленный для неполного колодца дебит на 10—20% в зависимости от степени неполноты: чем больше отношение мощности водоносного слоя к глубине колодца, тем больше должен быть этот процент.

Козени теоретически пришел к следующей формуле:

$$q = A\,\frac{\pi k\,(H^2 - h_0^2)}{\ln\dfrac{R}{r_0}}, \qquad (22)$$

где H — глубина колодца, т. е. высота стояния непониженного ненапорного уровня грунтовых вод над дном колодца; h_0 — высота уровня воды в колодце, r_0 — радиус колодца; R — радиус влияния колодца; A — функция величин $\frac{r_0}{H}$ и $\frac{H}{H_1}$, где H_1 — мощность водоносного слоя, т. е. высота непонижeнного ненапорного уровня грунтовых вод над водонепроницаемой подошвой.

Значения A приведены в нижеследующей табл. 15.

Таблица 15

Значения A в формуле (22)

$\frac{r_0}{H}$ \ $\frac{H}{H_1}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,10	2,54	2,49	2,39	2,26	2,12	1,92	1,71	1,48	1,24
0,05	2,09	2,05	1,99	1,895	1,78	1,65	1,50	1,34	1,172
0,01	1,489	1,471	1,441	1,401	1,35	1,291	1,225	1,153	1,077
0,0075	1,425	1,410	1,384	1,349	1,304	1,253	1,196	1,133	1,067
0,005	1,347	1,340	1,313	1,284	1,248	1,206	1,159	1,108	1,055
0,0025	1,250	1,235	1,221	1,200	1,175	1,145	1,112	1,077	1,039
0,001	1,154	1,149	1,139	1,126	1,112	1,092	1,071	1,048	1,024
0,0005	1,109	1,105	1,099	1,090	1,078	1,065	1,050	1,034	1,017
0,0001	1,049	1,047	1,044	1,040	1,035	1,029	1,022	1,015	1,008

Из таблицы [1] видно, что даже для значений $\frac{r_0}{H}$ и $\frac{H}{H_1}$, имеющих наибольшую вероятность при понижении уровня грунтовых вод, значения A

[1] Приводится в сокращении.

могут значительно превышать 1,1 и 1,2, т. е. прибавление 10—20% к вычисленному дебиту может оказаться недостаточным.

Однако самый вывод формулы Козени не является вполне убедительным, а поэтому вычисленные и приведенные в табл. 15 значения коэфициента A не могут быть приняты к руководству, тем более, что они еще не получили практической проверки.

Принятие за мощность водоносного слоя H высоты непониженного уровня грунтовой воды над основанием колодца имеет практический смысл, так как часто бывает весьма трудно установить, на какой глубине находится непроницаемый слой, не имеющий часто ровной поверхности.

Вопрос о том, как влияет неполнота колодца на производительность при разных глубинах понижения уровня воды, несмотря на выводы Форхгеймера и Ротера, Козени и предложение Зихардта, остается еще недостаточно выясненным.

Поэтому в дальнейших рассуждениях будем иметь в виду только полные колодцы или же колодцы с подошвой, не доходящей до водоупора на незначительную высоту.

Таким образом под H будем понимать высоту непониженного уровня над дном колодца и над водонепроницаемой подошвой одновременно.

§ 3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГРУППОВОЙ УСТАНОВКИ ПОНИЖЕНИЯ НЕНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД

Практические установки понижения представляют собою группы колодцев, взаимное расположение которых зависит главным образом от формы сооружения в плане.

Так как понижение уровня грунтовой воды является результатом совместного действия всех колодцев группы, влияющих друг на друга, то расчеты установок понижения должны основываться на тех основных уравнениях, которые аналитически выражают явления совместного действия нескольких колодцев.

1. Уравнения Ф. Форхгеймера

Ф. Форхгеймер теоретическим путем вывел уравнение, выражающее зависимость между высотою пониженного уровня грунтовых вод y над непроницаемой подошвой водоносного слоя в какой-либо точке A, удаленной от каждого из колодцев соответственно на расстоянии x_1, $x_2 \ldots x_n$:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{Q}{n\pi k}\left(\ln\frac{x}{r_0} + \ln\frac{x_2}{r_0} + \ldots + \ln\frac{x_n}{r_0}\right), \qquad \text{(а)}$$

где: h_0 — уровень воды у наружной поверхности каждого колодца, одинаковый для всех колодцев; Q — количество воды, откачиваемое в единицу времени из всех вместе колодцев, причем из каждого поровну $\left(q = \frac{Q}{n}\right)$; r_0 — радиус каждого колодца (рис. 61).

Чтобы уяснить себе происхождение этого уравнения, воспользуемся нижеследующими рассуждениями.

Представим себе поток грунтовых вод с поверхностью уровня, изображенной горизонталями (рис. 62), и с горизонтальной водонепроницаемой подошвой в плоскости XOY.

Возьмем на одной из горизонталей точку A с координатами x, y и z и выделим мысленно из всего потока столбик с основанием в виде прямоугольника, центр тяжести которого совпадает с горизонтальной проекцией точки A и бесконечно-малые стороны dx и dy параллельны координатным

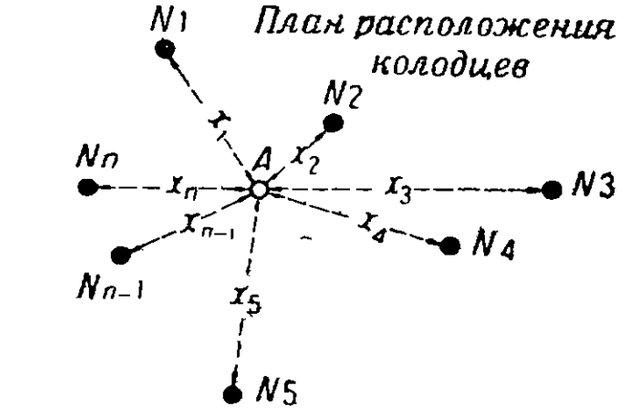
осям OX и $OУ$. Средняя высота этого столбика равна высоте z точки A уровня над водопроницаемой подошвой.

Из пределов этого столбика в направлении оси OX налево через воображаемую вертикальную грань шириною dy в единицу времени вытекает количество воды

$$q'_x = dy \cdot z \cdot v_x'.$$

На основании закона Дарси $v_x' = kI_x'$, где I_x' — гидравлический градиент (уклон), который выразим так:

$$I_x' = \frac{\partial\left(z - \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}\right)}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \frac{dx}{2},$$



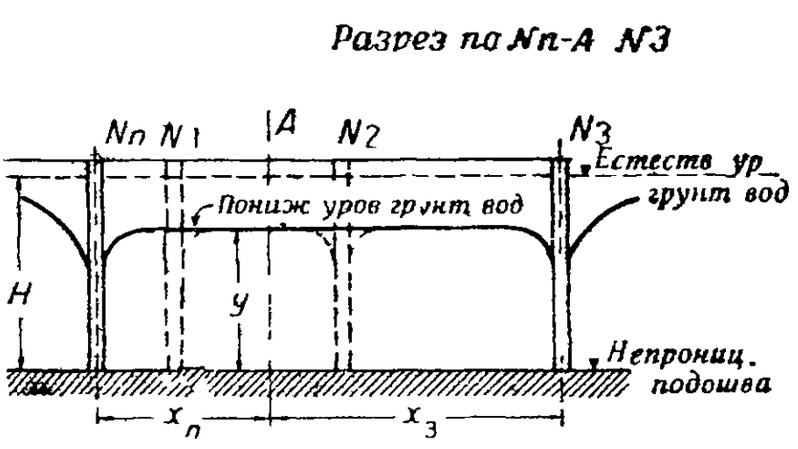
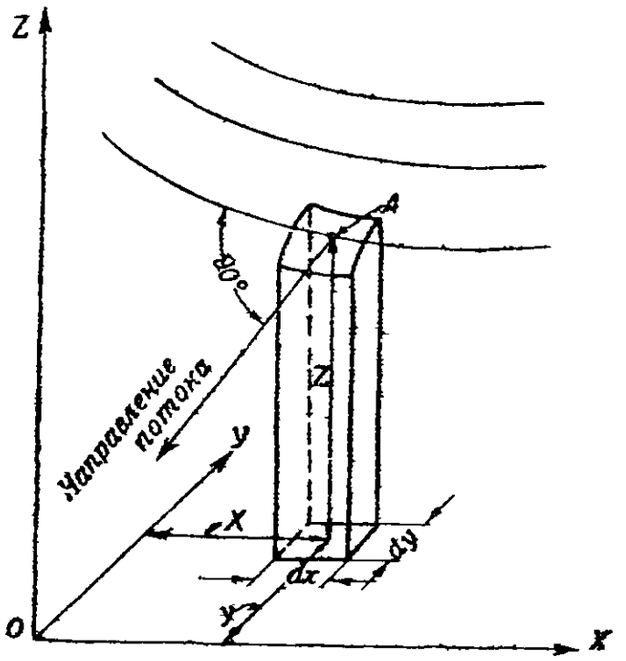


Рис. 61



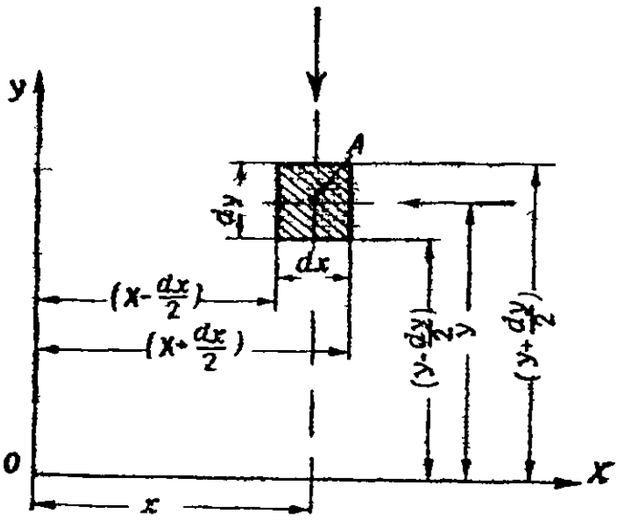


Рис. 62

откуда:

$$q_x' = \frac{k}{2} dy \left[\frac{\partial(z^2)}{\partial x} - \frac{\partial^2(z^2)}{\partial x^2} \cdot \frac{dx}{2} - 2\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \frac{dx}{2}\right].$$

В этом уравнении бесконечно-малой второго порядка $2\frac{dx}{2}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2$ можно пренебречь и тогда получаем:

$$q_x' = \frac{k}{2} dy \left\{\frac{\partial(z^2)}{\partial x} - \frac{\partial^2(z^2)}{\partial x^2} \cdot \frac{dx}{2}\right\}.$$

В пределы столбика по тому же направлению притекает в ту же единицу времени количество воды:

$$q_x'' = \frac{k}{2} dy \left\{\frac{\partial(z^2)}{\partial x} + \frac{\partial^2(z^2)}{\partial x^2} \cdot \frac{dx}{2}\right\}.$$

Превышение притока воды над вытеканием по направлению оси OX в единицу времени составляет:

$$q_x'' - q_x' = \frac{k}{2} dy \frac{\partial^2 (z^2)}{\partial x^2} dx.$$

Аналогично этому превышение притока над вытеканием по направлению оси OY составит:

$$q_y'' - q_y' = \frac{k}{2} dx \frac{\partial^2 (z^2)}{\partial y^2} dy.$$

Но так как в действительности при установившемся движении грунтовых вод объем воды в столбике не изменяется, то избыток прихода воды над расходом по обоим вместе направлениям должен быть равен нулю, т. е.

$$\frac{k}{2} \frac{\partial^2 (z^2)}{\partial x^2} dxdy + \frac{k}{2} \frac{\partial^2 (z^2)}{\partial y^2} dydx = 0$$

или

$$\frac{\partial^2 (z^2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (z^2)}{\partial y^2} = 0. \qquad (b)$$

Полученное уравнение есть дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять всякая потенциальная функция $z^2 = f(x, y)$, выражающая поверхность уровня грунтовой воды, движущейся выше горизонтальной водонепроницаемой подошвы водоносного слоя с небольшим уклоном, при котором сохраняет справедливость закона Дарси.

В частности этому дифференциальному уравнению удовлетворяет функция, выражающая высоту уровня грунтовой воды, движущейся к реке или к каналу:

$$y^2 = \frac{2q_0}{k} x + C;$$

$$\frac{\partial (y^2)}{\partial x} = \frac{2q_0}{k} \text{ и } \frac{\partial^2 (y^2)}{\partial x^2} = 0.$$

Здесь движение воды происходит по направлению оси OX, y — высота уровня над непроницаемой подошвой.

Тому же дифференциальному уравнению удовлетворяет и уравнение уровня воды, движущейся к колодцу по радиальным путям:

$$y^2 = \frac{q}{\pi k} \ln x + C,$$

так как

$$\frac{\partial (y^2)}{\partial x} = \frac{q}{\pi k} \cdot \frac{1}{x},$$

но

$$q = q_0 \cdot 2\pi x.$$

Следовательно

$$\frac{\partial (y^2)}{\partial x} = \frac{q_0 \cdot 2\pi x}{\pi k} \cdot \frac{1}{x} = \frac{2q_0}{k} \text{ и } \frac{\partial^2 (y^2)}{\partial x^2} = 0.$$

Здесь ось OX совпадает с направлением потока.

Если имеется несколько поверхностей уровня [$z^2 = f_1(x, y)$; $z^2 = f_2(x, y)$ и т. д.], взаимно влияющих друг на друга и лежащих одна над другой, то можно составить уравнение новой поверхности уровня:

$$z^2 = f_1(x, y) \pm f_2(x, y) \pm \ldots$$

Это будет действительно поверхность уровня, так как эта функция также удовлетворяет диференциальному уравнению:

$$\frac{\partial^2(z^2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(z^2)}{\partial y^2} = 0.$$

Если имеется несколько колодцев, из которых производится откачка воды, то для каждого колодца, если бы он работал только один, были бы справедливы соответственно уравнения:

$$y^2 - h_1^2 = \frac{q_1}{\pi k}(\ln x_1 - \ln r_1);$$

$$y^2 - h_2^2 = \frac{q_2}{\pi k}(\ln x_2 - \ln r_2);$$

. . . . . .

. . . . . .

$$y^2 - h_n^2 = \frac{q_n}{\pi k}(\ln x_n - \ln r_n).$$

Если бы все колодцы были в действии одновременно, то при совмещении создаваемых ими поверхностей уровня было бы:

$$y^2 - h_0^2 = \frac{q_1}{\pi k}(\ln x_1 - \ln r_1) + \frac{q_2}{\pi k}(\ln x_2 - \ln r_2) + \ldots + \frac{q_n}{\pi k}(\ln x_n - \ln r_n).$$

Если все колодцы одинакового радиуса r_0 и из каждого откачивается одинаковое количество воды

$$q_1 = q_2 = \ldots = q_n = \frac{Q}{n},$$

то предыдущее уравнение переходит в уравнение (а).

Если взять какую-нибудь точку, лежащую на границе между пониженным и непониженным уровнем грунтовых вод, т. е. высота уровня воды в которой равна H — высоте естественного уровня, и обозначить расстояние этих точек от каждого из n колодцев соответственно через R_1, $R_2 \ldots R_n$, то уравнение (а) примет вид:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{Q}{n\pi k}\left(\ln\frac{R_1}{r_0} + \ln\frac{R_2}{r_0} + \ldots + \ln\frac{R_n}{r_0}\right). \qquad (c)$$

Решая уравнение (а) и (с) совместно, получим:

$$H^2 - y^2 = \frac{Q}{n\pi k}\left(\ln\frac{R_1}{x_1} + \ln\frac{R_2}{x_2} + \ldots + \ln\frac{R_n}{x_n}\right) \qquad (d)$$

или иначе:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}(\ln\sqrt[n]{R_1\ R_2\ \ldots\ R_n} - \ln\sqrt[n]{x_1 . x_2 \ldots x_n}). \qquad (e)$$

Если численные значения R_1, $R_2, \ldots$, R_n достаточно велики по сравнению с размерами групповой установки в плане, то разница между R_1, R_2 и т. д. невелика. В таких случаях не будет большой погрешности, если в уравнение (е) вместо $\sqrt[n]{R_1 R_2 \ldots R_n}$ подставить R — радиус действия установки, т. е. расстояние от центра тяжести группы колодцев в плане до точек линии, ограничивающей площадь с пониженным уровнем грунтовых

вод и приближенно принимаемой за окружность. Тогда уравнение (е) примет вид:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}(\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1\ x_2\ \ldots\ x_n}. \qquad (23)$$

Если колодцы расположены по окружности радиуса X_0, то высота уровня y в центре крута A (рис. 63) определяется из уравнения:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}(\ln R - \ln X_0), \qquad (24)$$

представляющего частный вид уравнения (23).

Обыкновенно колодцы установки понижения располагаются по периметру котлована и следовательно только в случаях круглого котлована — по окружности.

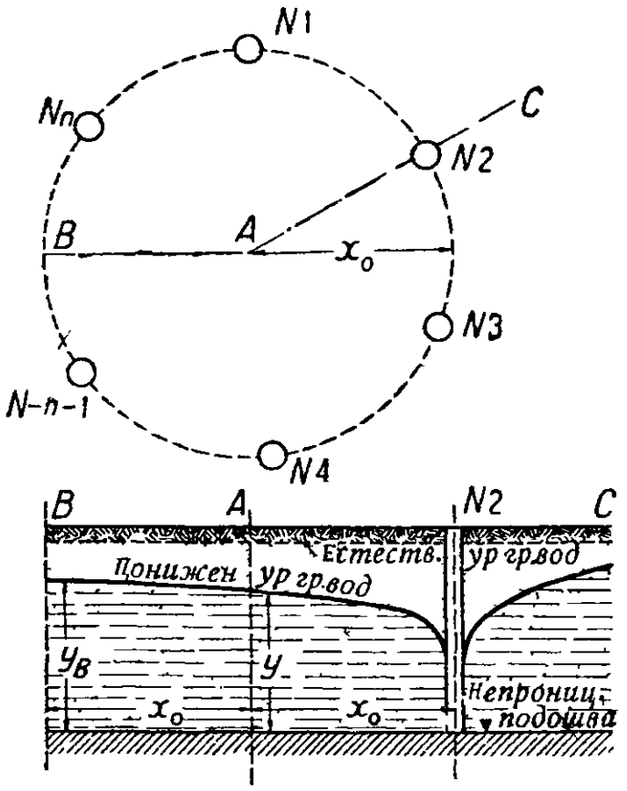


Рис. 63

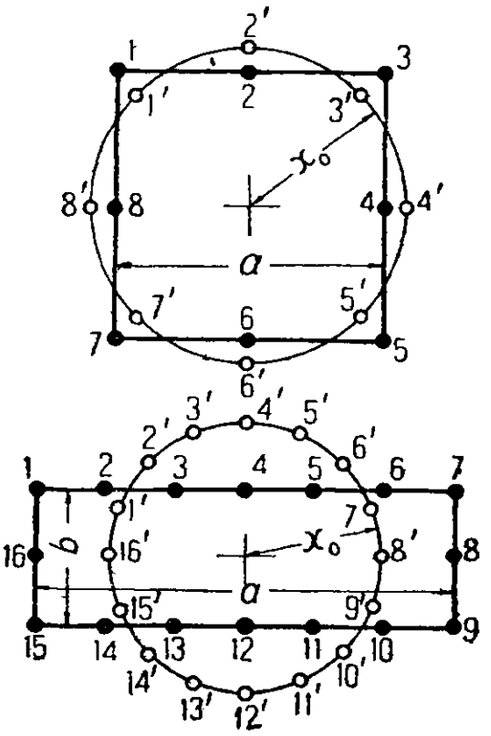


Рис. 64

Если колодцы расположены по периметру не очень вытянутой в одном направлении фигуры, то не будет большой ошибки, если в уравнении (23) заменить величину $\sqrt[n]{x_1\ x_2\ \ldots\ x_n}$ радиусом равновеликого круга $X_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$, где F — площадь установки, т. е. заменить действительное расположение колодцев круговым (рис. 64).

Следовательно уравнение (24) можно применить не только для круговой установки, но и для всякой другой, если отношение длины к ширине не слишком велико и если для этой установки допустимо применение общего уравнения (23).

2. Подобные установки

Количество воды Q_1, которое надо откачивать в единицу времени из всех вместе n колодцев установки для получения высоты пониженного уровня y в какой-либо точке, удаленной на соответственные расстояния

$x_1, x_2, \cdots, x_n$ от всех колодцев, определяется из уравнения (23), которое можно переписать в таком виде:

$$Q_1 = \frac{(H^2 - y^2)\pi k}{\ln R - \frac{1}{n}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_n)}. \tag{23a}$$

Допустим, что мы имеем вторую установку, фигура расположения которой в плане подобна фигуре первой, причем размеры ее в b раз больше соответствующих размеров первой.

Допустим далее, что число колодцев, а также H, k и R одинаковы для обеих установок. Для получения такой же высоты уровня y в соответствующей точке второй установки потребуется откачивать в единицу времени количество воды Q_2, которое определяется из уравнения

$$Q_2 = \frac{(H^2 - y^2)\pi k}{\ln R - \frac{1}{n}\ (bx_1\ bx_2\ \ldots\ bx_n)} = \frac{(H^2 - y^2)\pi k}{\ln R - \frac{1}{n}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_n) - \ln b} \tag{23b}$$

Если $K = \ln R - \frac{1}{n}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_n)$, то можно написать:

$$Q_2 = Q_1 \frac{K}{K - \ln b}. \tag{25}$$

Если расстояния между колодцами в обеих установках одинаковы, то для второй установки число колодцев равно bn

Так как разница между $\frac{1}{n}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_n)$ и $\frac{1}{bn}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_{bn})$ при достаточно большом числе колодцев n очень мала, то уравнение (25) можно считать справедливым и для числа колодцев bn.

Поэтому уравнение (25) будет справедливо для определения общего количества откачиваемой воды рассчитываемой установки, если известно количество воды, откачиваемой подобной установкой меньших размеров.

Если для второй установки требуется понизить уровень в известной точке больше или меньше, чем для первой, то, обозначив высоту пониженного уровня для первой установки y_1, а для второй y_2, будет иметь

$$Q_1 = \frac{(H^2 - y_1^2)\pi k}{\ln R_1 - \frac{1}{n}\ln\ (x_1\ x_2\ \ldots\ x_n)}; \tag{23c}$$

$$Q_2 = \frac{(H^2 - y_2^2)\pi k}{\ln R_2 - \frac{1}{n}\ln(x_1\ x_2\ \ldots\ x_n) - \ln b}. \tag{23d}$$

Уравнения (23 b) и (25) для равного числа колодцев и для равных расстояний между колодцами в сравниваемых подобных установках предложены в 1911 г В. Кирилейсом.

Уравнения (23 c) и (23 d) отличаются от предложенных Кирилейсом для различных достигаемых глубин понижения уровня в подобных установках только тем, что в них подставлены различные значения радиуса действия: R_1 — для первой установки с высотой пониженного уровня y_1 и R_2 — для второй подобной установки с высотой пониженного уровня y_2.

Если принять согласно изложенному ниже, что R пропорционально глубине понижения S, т е $R_2 = R_1 \frac{S_2}{S_1}$ и

$$\ln R_2 = \ln R_1 + \ln S_2 - \ln S_1,$$

и учесть, что $H^2 - y^2 = (2H - S)S$, то уравнение (23d) можно переписать так:

$$Q_2 = \frac{Q_1(2H - S_2)S_2K}{(2H - S_1)S_1(K - \ln b - \ln S_1 + \ln S_2)}, \qquad (25a)$$

где

$$K = \ln R_1 - \frac{1}{n} \ln (x_1 \; x_2 \; \ldots \; x_n).$$

Предложенный Кирилейсом метод подобия имеет большое практическое значение для расчета проектируемой установки понижения по результатам наблюдений на пробной установке.

В самом деле, если в пробной установке колодцы расположены по периметру фигуры, подобной фигуре расположения колодцев проектируемой установки, если глубина колодцев обеих установок одинакова и если пробная установка расположена на самом месте проектируемой установки, т. е. в одном и том же водоносном грунте, характеризующемся общими для обеих установок значениями k и H, то помимо сокращения вычислений большая практическая ценность уравнений (25) и (25а) заключается в том, что неизбежные погрешности при определении k и H совершенно или почти отпадают.

Следует заметить, что случай одинакового числа колодцев в подобных установках с достаточно большим значением отношения соответственных сторон в практике обычно не имеет места.

С другой стороны, уравнения (25) и (25а) могут быть применены и в том случае, когда расстояния между колодцами не одинаковы в обеих подобных установках, лишь бы эти расстояния в каждой отдельной установке были одинаковы. Наконец уравнения (25) и (25а) неприменимы для случаев неполного подобия установок, т. е. когда колодцы расположены по периметрам хотя и подобных фигур, но в одной установке они расположены на одинаковых расстояниях, а в другой — на разных (например в углах на более близких расстояниях, чем в середине длинных сторон прямоугольника). Последнее особо важно отметить в связи с изложенными в § 2 главы VI соображениями о неравномерном расположении колодцев.

3. Установки удлиненной формы

Кроме разобранных выше случаев расположения колодцев по окружности и по периметру не очень удлиненных фигур заслуживает внимания часто встречающееся на практике расположение колодцев по периметру прямоугольников большой длины и малой ширины, а также расположение колодцев в один ряд.

Кирилейсом разобран частный пример действия установки, состоящей из 20 колодцев одинаковой глубины и диаметра, расположенных в два ряда, в расстоянии ряд от ряда и друг от друга в каждом ряду 20 *м* (рис. 65).

По уравнению (23) были вычислены высоты пониженного уровня непосредственно у боковой поверхности каждого колодца, в середине между каждой парой колодцев одного ряда и через каждые 10 *м* на продольной оси установки. Вычисленные высоты нанесены на продольный разрез как по оси установки AB, так и по ряду колодцев (рис. 65), причем верхняя кривая для $Q = 100$ *л/сек* и нижние для $Q = 200$ *л/сек*.

Основные величины были заданы: $H = 20$ *м*, $k = 0{,}002$ *м/сек*, $r_0 = 0{,}1$ *м* (радиус колодца) и $R = 1000$ *м* (как для $Q = 100$ *л/сек*, так и для $Q = 200$ *л/сек*, что между прочим неправильно).

Из разрезов воронки понижения видно, что наибольшее понижение уровня воды получилось в центре тяжести площади установки. По мере удаления от середины продольной оси к концам пониженный уровень располагается все выше и выше. Особенно важно, что уровень у наружной поверхности концевых колодцев № 1 и 10 стоит выше, чем в центре тяжести установки. Из этого примера видно, что для достижения равномер-



Рис. 65

ного понижения уровня в пределах площади установки потребовалось бы откачивать из колодцев различные количества воды, при этом дебит колодца от середины установки к концам должен был постепенно возрастать или расстояние между колодцами по мере удаления их от середины уменьшаться.

На практике так и поступают: в середине длинных сторон прямоугольной установки колодцы устанавливаются реже. на концах и на тор-

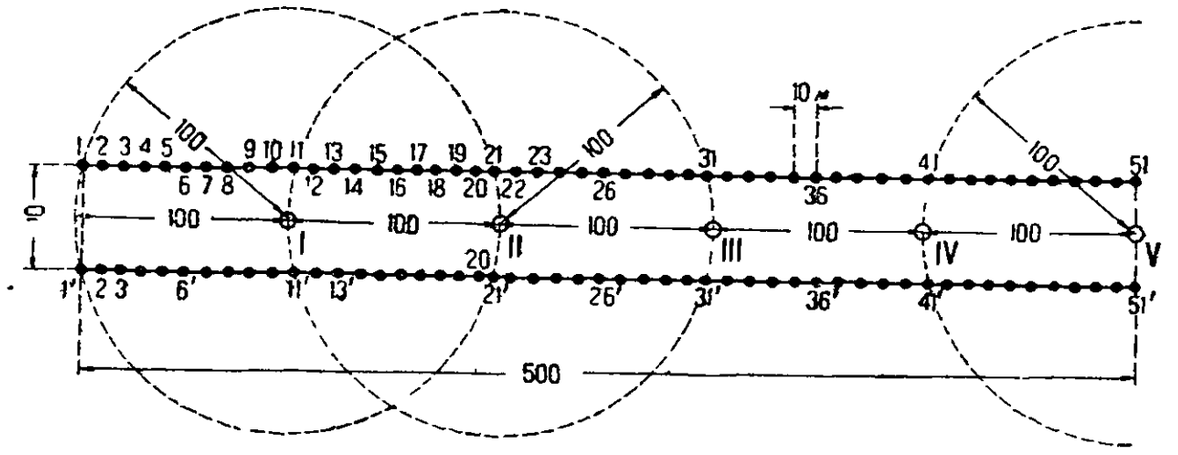


Рис. 66

цевых сторонах — чаще; если же этого не делают, то при эксплоатации установки из более удаленных от середины колодцев откачиваются большие количества воды, чем из более близких.

Пользование уравнениями (23) и (24) для расчета удлиненных установок возможно только при соблюдении условия, о котором говорится ниже.

Допустим, мы имеем установку в виде двух рядов колодцев длиною 500 *м* при расстоянии между рядами 10 *м* и между колодцами в ряду — 10 *м* (рис. 66).

Допустим, что в порядке расчета требуется определить количество воды, которое необходимо откачивать из всех колодцев установки для достижения определенной глубины понижения уровня грунтовой воды в точках *I*, *II*, *III*, *IV*, находящихся друг от друга на одинаковых расстояниях — 100 *м*, причем предел действия установки $R = 100$ *м*.

Наиболее сильное понижающее действие на уровень трунтовых вод в точке *I* несомненно окажут колодцы *11* и *11′*, как самые близкие к ней. Колодцы *10*, *10′* и *12* и *12′* оказывают меньшее понижающее действие на уровень в точке *I*, а колодцы *9*, *9′*, *13* и *13′* еще меньшее и т. д. Колодцы *1*, *1′*, *21* и *21′*, удаленные от точки *I* на расстояние, равное пределу действия установки $R = 100$ *м*, и все другие вправо от *21* и *21′* уже не оказывают никакого влияния на уровень воды в точке *I*, находящейся за пределами их влияния. Если бы все колодцы от *1* и *1′* до *21* и *21′* были удалены от точки *I* на расстояние 100 *м*. т. е. лежали бы на окружности радиуса $x = 100$ *м* с центром в точке *I*, то в последней не обнаруживалось бы никакого понижения уровня грунтовой воды, как это следует из уравнения (24):

$$y^2 = H^2 - \frac{Q(\ln R - \ln X_0)}{\pi k} = H^2 - \frac{Q(\ln R - \ln R)}{\pi k} = H^2,$$

т. е. $y = H$.

Только потому в точке *I* уровень понижается, что колодцы от *2* и *2′* до *20* и *20′* расположены на меньших расстояниях от нее чем колодцы *1*, *1′*, *21* и *21′*.

Из этого видно, что при удлиненной установке для расчета понижения в какой-либо точке следует брать только такой участок, который помещается в пределах круга, радиус которого равен R и центр находится в данной точке.

Таким образом для расчета понижения в точке *I* следует принимать в расчет колодцы от *1* и *1′* до *21* и *21′*; для понижения в точке *II* — от *11* и *11′* до *31* и *31′*, в точке *III* — от *21* и *21′* до *41* и *41′* и в точке *IV* — от *31* и *31′* до *51* и *51′*. Во всех других точках в промежутках между *I* и *II*, *II* и *III*, *III* и *IV* будет достигаться совершенно одинаковое понижение, если все прочие условия, определяемые величинами k, H, R, и количества воды

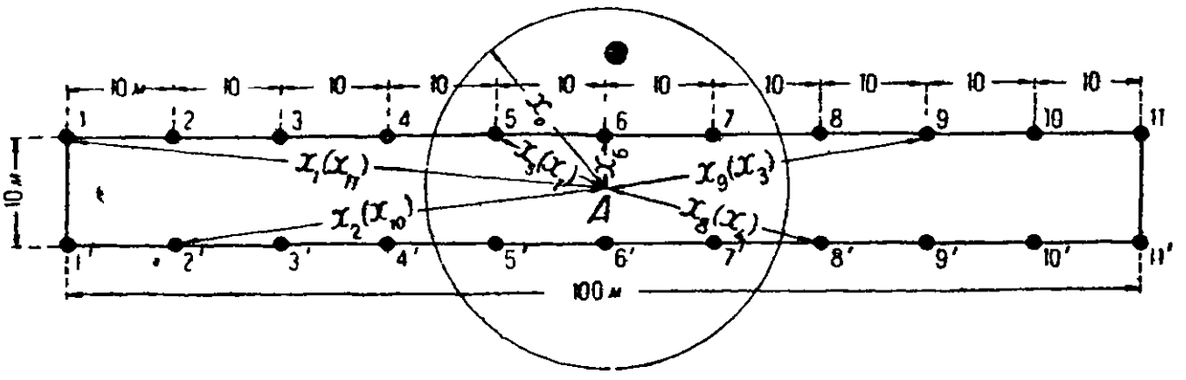


Рис. 67

откачиваемой из каждого колодца, остаются одинаковыми во всех точках установки. Только влево от точки *I* и вправо от точки *IV* уровень грунтовой воды по мере приближения к концам всей установки будет постепенно повышаться при одинаковом дебите всех колодцев, как указано выше.

Итак, уравнение (23) применимо только для такой установки или части ее, которая состоит из колодцев, удаленных от точки, в которой определяется высота пониженного уровня y, не более, чем на величину радиуса действия установки R. Этот вывод относится не только к удлиненным установкам, но и ко всяким другим, в том числе и к круговым.

Выше было указано, что уравнение (23) может быть заменено уравнением (24), если установка не очень вытянута в длину. Какую установку считать очень вытянутой и какую не очень вытянутой, иначе говоря, какое отношение длины к ширине фигуры расположения колодцев допускает замену $\sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$ на X_0, зависит от целого ряда условий. Если предел действия R во много раз превышает наибольшие линейные размеры установки, то замену можно произвести при довольно большом отношении длины к ширине.

Так как R зависит от k, H и s, то чем больше последние величины, тем более удлиненные установки допускают применение уравнения (24).

Допустим, что установка в виде прямоугольника, длина которого равна 100 *м*, ширина 10 *м*, состоит из 22 колодцев глубиною 10 *м*, отстоящих друг от друга на 10 *м* (рис. 67). Пусть в центре тяжести установки A требуется достигнуть понижения уровня грунтовых вод $S = 4$ *м*.

Для этого случая имеем:

$$\lg \sqrt[22]{x_1\ x_2\ \dots\ x_{22}} = 1{,}36;$$

$$\lg \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \lg \sqrt{\frac{100 \cdot 10}{3{,}14}} = 1{,}25.$$

Разница между $\lg \sqrt[22]{x_1\ x_2\ \dots\ x_{22}}$ и $\lg \sqrt{\frac{F}{\pi}}$ составляет 0,11, или 8% от первой величины.

Разберем два случая.

1. Пусть в первом случае водопроницаемость грунта $k = 0{,}00036$ *м/сек* и предел действия $R = 120$ *м*. Принимая $H = 10$ *м*, получим:

$$Q_1 = \frac{(2H - S)S \cdot 1{,}36 \cdot k \cdot 1000}{\lg R - \lg \sqrt[22]{x_1\ x_2\ \dots\ x_{22}}} = 43{,}5 \text{ } л/сек;$$

$$Q_2 = \frac{(2H - S)S \cdot 1{,}36 \cdot k \cdot 1000}{\lg R - \lg \sqrt{\frac{F}{\pi}}} = 37{,}8 \text{ } л/сек.$$

Разница между Q_1 и Q_2 составляет 5,7 *л/сек* или 13% от Q_1.

2. Пусть во втором случае $k = 0{,}00009$ и $R = 60$ *м*. При $H = 10$ *м* получим:

$$Q_1 = \frac{(2H - S)S \cdot 1{,}36 \cdot k \cdot 1000}{\lg R - \lg \sqrt[22]{x_1\ x_2\ \dots\ x_{22}}} = 18{,}7 \text{ } л/сек;$$

$$Q_2 = \frac{(2H - S)S \cdot 1{,}36 \cdot k \cdot 1000}{\lg R - \lg \sqrt{\frac{F}{\pi}}} = 14{,}8 \text{ } л/сек.$$

Разница между Q_1 и Q_2 составляет 3,9 *л/сек* или 20,8% от Q_1, т. е. почти вдвое больше, чем в первом случае.

Если с преуменьшением расчетного дебита установки на 13% при замене уравнения (23) на (24) в первом случае еще можно мириться, то преуменьшение на 20,8% во втором случае уже является недопустимым.

Следовательно, если при $k = 0{,}00036$ можно допустить применение уравнения (24) для установки с отношением длины к ширине, равным 10, то при $k = 0{,}00009$ для такого же расположения колодцев уравнение (24) применять нельзя. Как показывают вычисления для случая $k = 0{,}00009$, преуменьшение Q на 13% получается при отношении длины к ширине,

равном 8. Из этого примера видно, что предельное отношение длины к ширине установки зависит от степени проницаемости грунта.

В большинстве случаев можно считать приемлемой замену уравнения (23) уравнением (24), если отношение длины к ширине установки не превосходит 5, а в отдельных случаях до 10 и более. если в расчет принимаются колодцы, отстоящие от данной точки не далее предела действия установки.

Вебер по аналогии с одиночным колодцем вводит в формулы многоколодезной установки поправку; вместо уравнения Форхгеймера (23) он предлагает уравнение:

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}\left[\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1\, x_2\, \ldots\, x_m} - \frac{1}{m}\right], \qquad (26)$$

и соответственно вместо (24):

$$y^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}\left(\ln R - \ln X_0 - \frac{1}{m}\right),$$

где m — также принимается в пределах от 1 до 2.

Вебер не указывает никакого критерия для выбора значения m, а само введение поправки $\frac{1}{m}$, как это отмечено выше в отношении одиночного колодца, не является вполне правильным.

Поэтому при современном уровне теории понижения грунтовых вод остается руководствоваться пока уравнениями Форхгеймера (23) и (24), которые дают результаты, не расходящиеся в значительной степени с результатами большинства произведенных до настоящего времени понижений.

Для определения высоты уровня в любой точке поля понижения по известной высоте уровня в какой-либо другой точке или для определения коэфициента проницаемости по измеренным общему дебиту установки Q и высотам пониженного уровня в двух точках поля понижения y_1 и y_2 может служить уравнение:

$$y_2^2 - y_1^2 = \frac{Q}{n\pi k}\left[\ln (x_1' x_2' \ldots x_n') - \ln (x_1\, x_2\, \ldots\, x_n)\right]. \qquad (28)$$

Итак, для расчета многоколодезных установок понижения неналорного уровня грунтовых вод будем принимать в дальнейшем формулы (23), (24) и (28) по следующим соображениям:

1. Эти формулы выведены из основного закона движения грунтовых вод Дарси, который для понижения грунтовых вод оправдывается с достаточной для практики точностью.

2. Сами формулы (23), (24) и (28) также с достаточной для практики точностью оправдались на многочисленных установках понижения грунтовых вод.

3. До настоящего времени для многоколодезных установок не предложено других формул, дающих более удовлетворительные результаты, и только дальнейшее развитие теории и практики искусственного понижения уровня грунтовых вод может дать возможность заменить их более совершенными формулами.

§ 4. РАДИУС ДЕЙСТВИЯ

1. Радиус действия одиночного колодца

Изменение величины R, которая входит в уравнение (6) в виде $\ln R$, при малых численных ее значениях оказывает существенное влияние на величину понижения уровня; по мере увеличения значения R влияние

изменения этой величины постепенно становится меньше и меньше. Последнее легко видеть на графике (рис 68), представляющем зависимость между R и величиной понижения уровня грунтовой воды S_0 у наружной поверхности колодца. График построен по формуле (6″) для частного примера

Самым надежным способом определения значения R было бы непосредственное измерение его при пробной откачке воды в том месте, для которого проектируется установка понижения. Но этот способ не всегда доступен, так как он требует довольно сложного и дорогого оборудования и затраты более или менее значительного времени. Поэтому чрезвычайно желательно найти способ теоретического определения величины R.

И. Шульце сделал первую попытку в этом направлении Путем теоретических рассуждений он вывел формулу, выражающую зависимость величины R от ряда других величин H — мощности водоносного слоя, k — коэфициента водопроницаемости грунта, p — активной пористости грунта и T — продолжительности действия колодца.

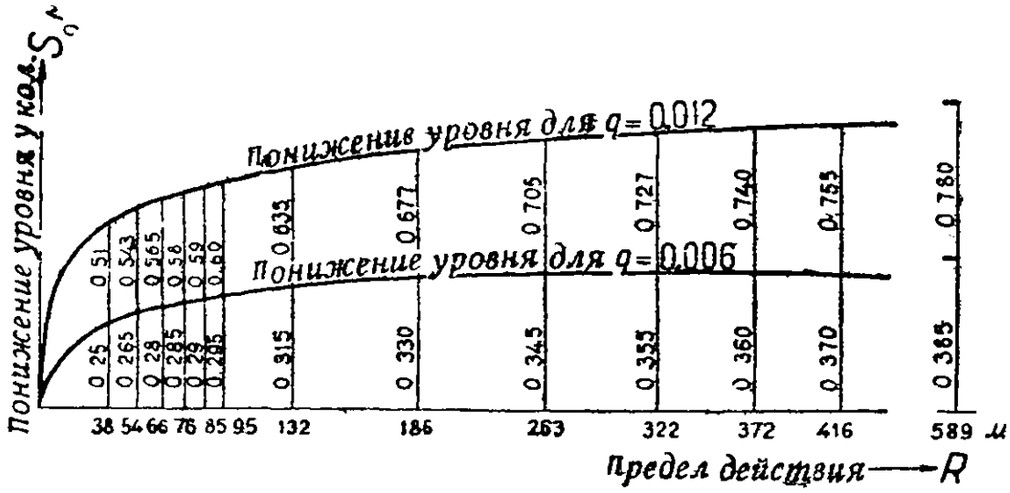


Рис. 68

В окончательном виде формула И. Шульце для одиночного колодца следующая:

$$R = 60\sqrt{\frac{6HkT}{p}}, \tag{29}$$

где H и R в метрах, k — в *м/сек* и T — в часах.

Независимо от вывода И Шульце автором настоящего труда выведена формула для R элементарным путем

$$R = 47\sqrt{\frac{6HkT}{p}}, \tag{30}$$

где обозначения те же, что и в формуле (29)

Формулы (29) и (30) различаются только численными коэфициентами, что не имеет существенного значения, так как расхождение коэфициентов может быть вполне объяснено неточностью тех вычислений, которые пришлось делать для элементарного вывода уравнения (30).

Исходя из тех же соображений, что и Шульце, Вебер предложил в 1928 г формулу.

$$R = 74\sqrt{\frac{6HkT}{p}}. \tag{31}$$

Из всех формул видно, что при постоянных значениях величин H, k и p величина R изменяется только в зависимости от изменений T и не за-

висит от дебита и следовательно от глубины понижения уровня воды в грунте и колодце.

В действительности же для одной и той же продолжительности откачки T величина R получает тем большее значение, чем больше дебит колодца, и наоборот. Это и понятно, так как на величину R влияют проникающие в грунт атмосферные осадки.

Чем меньше дебит колодца, тем меньше величина R, при которой создается такое положение, когда количество инфильтрующейся на площади $F = \pi R^2$ атмосферной воды будет достаточно для возмещения количества воды, откачиваемой из колодца, т. е. когда весь приток воды к колодцу будет происходить за счет инфильтрата. С этого момента возрастание величины R должно прекратиться, как бы долго после этого ни призводилась откачка.

Отсюда видно, что если формулы (29), (30) и (31) имеют какое-либо практическое значение, то только для сравнительно малых численных значений T или при абсолютной засухе.

Но так как в большинстве случаев практики требуются недели и месяцы для достижения и дальнейшего поддержания желательного понижения уровня грунтовых вод и в течение этого периода продолжают выпадать и просачиваться в грунт атмосферные осадки, то уравнения (29), (30) и (31) нельзя признать правильными и приемлемыми для практических расчетов Поэтому И. Шульце ввел в уравнение (29) поправку на просачивание в грунт атмосферных осадков и составил формулу:

$$R'' = \sqrt{(R')^2 + \frac{Hk\,21\,600}{p} \cdot \frac{q - \pi q_s (R')^2}{q - \frac{1}{3}\pi q_s (R')^2}\, dT}, \qquad (32)$$

где R'' — значение предела действия для того момента, до которого прошло время dT, считая с того предыдущего момента, когда радиус действия был равен R'. Чтобы вычислить для каждого момента величину $R^{(n)}$, необходимо знать предыдущее $R^{(n-1)}$, для вычисления которого в свою очередь надо знать $R^{(n-}$ и т. д. Практически следовательно надо поступать следующим образом: сначала надо вычислить R' для некоторого короткого отрезка времени от начала откачки воды из колодца, например для $T = 6$ час по формуле, соответствующей отсутствию дождя, т. е. по формуле (29), затем по формуле (32) вычисляется величина R'' для $T = 12$ час. от начала откачки, т. е. берется $dT = 6$ час., затем по R'' определяют R''' для $T = 18$ час. и т. д. То значение T будет окончательным, для которого будет справедливо равенство:

$$q = \pi [R^{(n)}]^2 q_s,$$

где q — дебит колодца, q_s — количество воды, инфильтрующейся в единицу времени с единицы поверхности участка.

Нетрудно видеть, что вычисление для каждого момента предела действия представляет очень кропотливую работу.

Но независимо от кропотливости вычислений, весьма трудно установить значение величины q_s. Даже допуская для простоты, что убыль грунтовой воды на участке искусственного понижения уровня грунтовых вод будет пополняться только просачивающимися в грунт жидкими атмосферными осадками, мы все же встанем перед чрезвычайно трудными вопросами

1 Какая часть выпадающих атмосферных осадков будет просачиваться в грунт и доходить до интересующего нас уровня грунтовых вод?

2. Какое количество атмосферных осадков можно ожидать в интересующее нас время производства работ в данном географическом пункте?

Если на первый вопрос и можно дать приблизительный ответ, то для этого требуются длительные исследования. В одном и том же географическом пункте в зависимости от рельефа местности, характера почвы и подпочвы, температуры воздуха, силы и направления ветра, барометрического давления и наконец интенсивности и длительности выпадения осадков относительное количество проникающей в грунт воды будет различно.

Хотя в результате многолетних наблюдений собрано большое количество материала и имеются некоторые формулы, выражающие влияние всех или некоторых факторов на относительное количество просачивающейся атмосферной воды, все же результаты вычислений по этим формулам часто настолько сильно отличаются от действительности, что пользоваться ими для предсказаний было бы по меньшей мере неосторожно.

Непосредственное измерение количества просачивающихся атмосферных осадков при помощи лизиметров, даже если бы условия действия последних совершенно соответствовали природным условиям, пришлось бы систематически производить в течение многих лет, чтобы на основании полученного материала можно было делать более или менее точные предсказания.

Что касается количества выпадающих осадков, то хотя и имеются также материалы многолетних наблюдений, но на основании их можно более или менее точно предсказать только общее количество осадков, которое может выпасть в течение того или иного сравнительно продолжительного периода времени; предсказать же то количество осадков, которое может выпасть в данном месте в течение сравнительно короткого периода действия установки понижения, почти невозможно.

Вебер также ввел в свою формулу поправку на инфильтрацию атмосферных осадков и пришел к следующей формуле:

$$R = \sqrt{\frac{q}{\pi\mu}\left(1 - \frac{1}{e^{\frac{\pi\mu R_0^2}{q}}}\right)}, \tag{33}$$

где: μ — высота столба воды, просачивающейся в грунт в 1 сек. (в метрах) на 1 $м^2$ поверхности земли; q — количество воды, откачиваемой из колодца в 1 сек. (в куб. метрах); R_0 — радиус действия колодца, определенный по формуле Вебера (31) в предположении отсутствия инфильтрации атмосферных осадков.

В пределе

$$R = R_g = \sqrt{\frac{q}{\pi\mu}}, \tag{34}$$

т. е. дебит колодца полностью покрывается атмосферными осадками, просачивающимися на круговой площади радиуса R, а теоретически вычисленное значение R_0 настолько велико, что

$$\frac{\pi\mu R_0^2}{q} = \infty.$$

Как видно, и для вычисления R по формуле (33) пришлось бы произвести не менее кропотливые вычисления, чем по формуле Шульце (32), и при этом полностью сохранились бы затруднительность и ненадежность определения μ.

А так как μ изменяется во времени, то это еще более осложнило и уменьшило бы надежность вычисления R.

Поэтому формулы Шульце (32) и Вебера (33) с поправкой на атмосферные осадки не могут считаться вполне надежными и удобными для практических расчетов установок понижения.

В. Зихардт в 1930 г. опубликовал свою эмпирическую формулу для вычисления R—радиуса действия колодца при установившемся состоянии:

$$R = 3000\, s\sqrt{k}, \tag{35}$$

где s — глубина понижения уровня воды в колодце.

Заслуживает особого внимания в этой формуле линейная зависимость между R и глубиной понижения, что не только совпадает с общепринятым представлением о воронке понижения уровня, но и подтверждается практическими данными многих осуществленных многоколодезных установок понижения уровня грунтовых вод. К сожалению Зихардт не привел тех данных, на основании которых им составлена формула (35), а потому трудно судить, насколько обоснован численный коэфициент 3000, а равно возникает сомнение в том, что R не зависит от мощности водоносного слоя H.

В 1933 г. Козени опубликовал свою формулу для R, выведенную теоретическим путем:

$$R = \sqrt{\frac{12t}{p}\sqrt{\frac{qk}{\pi}}}, \tag{36}$$

где: R — радиус действия колодца в метрах;
t — продолжительность откачки в секундах;
q — дебит колодца в $м^3/сек$;
p — пористость грунта;
k — коэфициент водопроницаемости в $м/сек$.

Подобно формулам Шульце и Вебера формула (36) выведена для случая отсутствия инфильтрации атмосферных осадков за все время откачки t, а потому она обладает тем же недостатком, что и формулы (29), (30) и (31).

В самом деле, если положить, что в уравнении:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k}\left(\ln R - \ln r_0 e^{\frac{1}{2}}\right),$$

из которого Козени исходит при выводе формулы (36), $h_0 = \frac{H}{n}$, то это уравнение можно переписать так:

$$q = \frac{\pi k H^2\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}{\ln R - \ln r_0 e^{\frac{1}{2}}}.$$

Тогда уравнение (36) перепишется так:

$$R = \sqrt{\frac{12t}{p}\sqrt{\frac{\pi k^2 H^2\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}{\pi\left(\ln R - \ln r_0 e^{\frac{1}{2}}\right)}}} = \sqrt{\frac{12t}{p}\cdot\frac{kH\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}{\sqrt{\ln R - \ln r_0 e^{\frac{1}{2}}}}}.$$

Козени при выводе формулы (36) полагал, что $\sqrt{\ln R - \ln r_0 e^{\frac{1}{2}}} = 3$. Обозначив $\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = a^2$ и выразив время T в часах, получим:

$$R = \sqrt{\frac{12 \cdot 3600\, T \cdot kH \cdot a^2}{p \cdot 3}} = 49a\sqrt{\frac{6HkT}{p}}.$$

Если например $h_0 = \frac{H}{2}$, то $a = 0{,}93$ и тогда: $R = 46\sqrt{\frac{6HkT}{p}}$, т. е. почти полное совпадение с формулой (30), полученной автором путем элементарных вычислений, и следовательно формула (36) совершенно аналогична формулам (29), (30) и (31).

Если до настоящего времени не составлено сколько-нибудь удовлетворительной формулы для радиуса действия одиночного колодца, то для радиуса действия многоколодезной установки понижения уровня грунтовых вод нет вообще ни одной теоретической формулы.

Это объясняется главным образом многообразием тех факторов, от которых зависит величина R, и от трудности нахождения теоретическим путем зависимости R от каждого из этих факторов в отдельности.

В опубликованном в 1930 г. первом издании настоящей книги автор попытался использовать имевшиеся в его распоряжении фактические данные исполненных понижений уровня грунтовых вод и вывести на основании их эмпирическую формулу для вычисления предела действия многоколодезной установки понижения уровня ненапорных грунтовых вод.

Изложение вывода этой формулы приводится ниже.

№ п/п	Название установки	Ярусы	H Высота непонижен. уровня	s Глубина понижения в центре	y Высота пониженного уровня в центре	X_0 Радиус равновеликого круга	k м/сек — коэфициент водопроницаемости: По описанию	Вычисленный по кривой депрессии	Расчетный
1	Плёцензее, шлюз	I	14,00	4,90	9,10	31,27	0,0014		0,0014
2	То же	II	14,00	6,30	7,70	35,00	0,0014		0,0014
3	Ленидзее, шлюз близ Ораниенбурга	II	14,00	8,00	6,00	36,00	—	0,002	0,002
4	Гартенфельд, кабельный завод	I	8,25	2,30	5,95	17,80	0,002		0,002
5	Галле н/Заале (резервуар для аммиака)	I	2,60	1,30	1,30	12,10	0,002		0,002
6	Лейпциг, главный вокзал	I	10,60	4,74	5,86	25,20	0,0053		0,0053
7	Шахта „Матадор" в Зенфтенберге	I	9,74	5,24	4,50	17,00	0,0003		0,0003
8	То же	II	15,68	9,18	6,50	14,00	—	0,000206	0,000206
9	„	III	18,00	12,30	5,70	12,70	—	0,000235	0,000235
10	Везермюнде, опытная	I	19,60	6,97	12,63	12,40	0,000337		0,000337
11	То же	II	19,60	9,90	9,70	12,40	0,000337		0,000337
12	Везермюнде, шлюз	II	21,40	15,10	6,30	67,40	0,000337		0,000337
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2. Радиус действия многоколодезной установки понижения ненапорных грунтовых вод

Для вывода формулы радиуса действия многоколодезной установки автором были использованы в качестве исходных практические данные нескольких установок понижения ненапорного уровня грунтовых вод, исполненных в разное время в различных условиях; эти данные сведены в табл. 16.

Прежде чем перейти к рассмотрению этих данных, необходимо выяснить вопрос о том, что следует понимать под величиной радиуса действия установки R, как одной из основных величин для расчета установки.

Не подлежит сомнению, что величина R постепенно возрастает: сначала по мере понижения уровня грунтовых вод в какой-либо точке площади

Таблица 16

R *м* — предел действия установки				Q *м³/сек* — общий дебит установки							Литературный источник
По описанию	Вычисленный			По описанию			Расчетный	Вычисленный при $R=575s\sqrt{Hk}$	Превышение % над средним	Разница от % расчетного	
	По формуле (37)	По формуле (38)	По формуле $R=575s\sqrt{Hk}$	Средний	Наибольший	Без указания					
395	—	—	395	—	0,200	—	0,195	0,195	—	0	W. Kyrieleis, Über Grundwasseradsenkung bei Fundierugsarbeiten, 1913
500	—	—	508	—	0,216	—	0,225	0,224	—	— 0,45	
—	777	—	768	—	0,325	—	0,325	0,327	—	+ 0,62	
—	156	161	171	—	0,0944	—	0,0928	0,0905	—	— 2,50	I. Schultze, Die Grundwasserabsenkung, 1924
50	—	—	54	—	0,0224	—	0,0224	0,0214	—	— 4,7	То же
1500	—	—	645	0,333	—	—	—	0,398	+19,6	—	
—	—	156	160	—	—	0,027	0,0316	0,0314	—	— 0,65	H. Müller, Der Aufschluss des zweiten Flotzes u. s. w., „Zts. f. Gewinnung und Verwertung der Braunkohle“, № 1, 1925
—	—	440	300	—	—	0,038	0,038	0,041	—	+8,0	
—	—	1145	460	—	—	0,048	0,048	0,0598	—	+25	
—	(1300) 750	—	325	—	—	(0,052)	0,058	0,072	—	+24	Arp u. Detmers, Grundwasserabsenkung beim Bau der Doppelschleuse in Wesermünde — Geestemünde, „Zts. f. Bauwesen“, H. VI u. VIII, 1926
—	1060	—	462	—	—	0,069	0,069	0,085	—	+23	
—	561	—	740	—	—	0,209	0,209	0,181	—	— 9,75	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

установки, например в центре тяжести окруженной колодцами фигуры, а затем после достижения требуемого понижения в этой точке, когда дальнейшее понижение прекращается и приток грунтовой воды к колодцам при продолжающейся откачке происходит за счет расширения воронки в горизонтальных направлениях. Если бы грунт на большое расстояние от установки понижения во все стороны был совершенно однороден и в течение длительного периода не просачивались в грунт атмосферные осадки, то чем дольше продолжался бы водоотлив из колодцев для поддержания достигнутого пониженного уровня грунтовых вод в центре установки, тем все больше и больше становилась бы величина R, а величина дебита постепенно уменьшалась бы.

Например при понижении грунтовых вод для отрывки котлована на кабельном заводе Сименс-Шуккерт в Гартенфельде вблизи Берлина по справке И. Шульце[1] дебит установки в первый период по достижении требуемой глубины понижения уровня грунтовых вод в середине установки был равен 94,4 *л/сек*, а три месяца спустя при той же глубине понижения упал до 54,4 *л/сек*. Следовательно наибольший дебит в момент достижения требуемого и оставшегося затем неизменным понижения в центре установки был на $\frac{94{,}4 - 54{,}4}{54{,}4} \cdot 100 = 74\%$ больше дебита, который был достаточен для поддержания того же пониженного уровня грунтовых вод по истечении трех месяцев.

Из этого примера ясно видно, что если бы число колодцев, мощность насосов, диаметры трубопроводов, т. е. все главнейшие элементы установки, были рассчитаны по минимальному или даже среднему дебиту, то могли бы получиться серьезные затруднения, или при производстве понижения пришлось бы перегрузить эти элементы, что могло бы угрожать порчей их, или для достижения цели потребовалось бы недопустимо много времени, что затянуло бы выполнение строительных работ.

С другой стороны, если рассчитывать установку на очень интенсивную откачку, при которой дебит в момент достижения требуемого понижения очень значительно превышал бы средний дебит за все время действия установки, то размеры установки могли бы получиться слишком большими, что экономически было бы невыгодно.

Если календарный план работ и в том числе календарный план понижения составлены в экономическом отношении правильно и если нет особых обстоятельств, вызывающих ускорение понижения, то наибольший дебит в момент достижения требуемого понижения обыкновенно может превышать величину среднего дебита не более чем на 20—25%. Отсюда ясно, что расчет установки следует вести для этого наибольшего дебита, т. е. для момента достижения требуемого понижения в середине площади установки. Отсюда выясняется и то значение предела действия R, которое является, так сказать, «эффективным», т. е. определяющим размеры воронки понижения в тот решающий момент, когда в пределах котлована только что достигается требуемая глубина понижения, а не в последующие периоды — спустя недели и месяцы после этого момента, когда только поддерживается достигнутый успех. Следовательно под величиной предела действия установки понижения R следует понимать величину радиуса верхнего основания той воронки депрессии, которая образуется в момент достижения требуемой глубины понижения уровня грунтовых вод в центре установки.

Условившись в таком понимании радиуса действия, обратимся к рассмотрению приведенных в табл. 16 данных. Прежде всего следует отметить, что, несмотря на сравнительно большое число описанных в литературе

[1] J Schultze, Grundwasserabs in Th. u Pr 1924 г., стр. 126—129.

установок понижения, данные для производства расчетов в большинстве описаний далеко не полны, а имеющиеся данные не всегда достаточно объяснены.

Например в большинстве описаний дается величина общего дебита установки без указания, является ли эта величина наибольшей, средней или наименьшей за все время действия установки; если указывается численное значение величины R, то не указывается, к какому моменту оно относится и т. п. Относительно отдельных установок ниже даются необходимые объяснения и замечания.

1. Для установки Плёцензее для простоты принято $H = 14$ *м* для обоих ярусов (по указанию Кирилейса $H_1 = 14{,}125$ и $H_2 = 13{,}80$). Поэтому величина дебита пересчитана для обоих ярусов и занесена в графу 18.

2. Для установки Ленницзее принят в качестве примера II ярус, так как для I яруса в описании недостает многих данных. Значение k вычислено по уравнению (28) сначала для одной пары точек (центр установки и наблюдательная скважина № 2), затем для другой (тот же центр установки и наблюдательная скважина № 13).

Для центра установки $\sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x'_n} = x_c = 36$ *м* и $y_c = 6{,}00$ *м*; для наблюдательной скважины № 2: $\sqrt[n]{x_1' x_2' \ldots x_n} = 64$ и $y_2 = 7{,}8$ *м*. Наибольший дебит установки согласно описанию — $Q = 0{,}325$ *м³/сек*.

Подставив все эти значения в уравнение (28), получаем:

$$k = \frac{0{,}325\,(\lg 64 - \lg 36)}{1{,}36\,(7{,}8^2 - 6^2)} = 0{,}00245 \text{ м/сек}.$$

Для скважины № 13: $\sqrt[n]{x_1'' x_2'' \ldots x_n''} = 70$ и $y_{13} = 8{,}5$ *м*;

$$k = \frac{0{,}325\,(\lg 70 - \lg 36)}{1{,}63\,(8{,}5^2 - 6^2)} = 0{,}00165 \text{ м/сек}.$$

Среднее из обоих значений:

$$k = \sqrt{0{,}00245 \cdot 0{,}00165} = 0{,}002 \text{ м/сек}.$$

Подставив $k = 0{,}002$ в формулу

$$\lg R = \lg x_c + \frac{1{,}36 \cdot k\,(2H - s)\,s}{Q}, \qquad (37)$$

представляющую в преобразованном виде уравнение (23) или (24), причем s — понижение уровня в центре установки, получаем для понижения в Ленницзее расчетное значение предела действия

$$R = 777 \text{ м}.$$

Указанным выше путем определены значения k для установки шахты «Матадор» в Зенфтенберге (II и III ярусы), а по формуле (37) вычислены значения R для установки в Гартенфельде и Везермюнде (шлюз).

3. Для установки Гартенфельда принята величина $k = 0{,}002$ *м/сек* (графа 8), определенная помощью пробного понижения Шульце, задавшись произвольно величиною $R = 375$ при $Q = 0{,}0941$ *м³/сек*, вычислил $k = 0{,}0028$, что неправильно, так как величина R, определенная по отметкам пониженного уровня в трех разных точках поля понижения, равна 161 *м*, что более соответствует $k = 0{,}002$, как показывает вычисление по формуле (37) (графа 12).

Ниже приводится вычисление R по трем точкам установки Гартенфельда, для чего взяты из описания (J. Schultze, Die Grundwasserabsenkung и т. д.) высоты пониженного уровня в центре установки и в двух наблюдательных скважинах III и IV, расстояния которых до каждого из колодцев установки измерены по плану.

Оказалось, что для центра установки $x_c = \sqrt[10]{x_1 x_2 \ldots x_{10}} = 17{,}8$, и $y_c = 5{,}95$; для наблюдательной скважины III: $x_{III} = \sqrt[10]{x_1' x_2' \ldots x_n'} = 27{,}9$ и $y_{III} = 6{,}56$; для наблюдательной скважины IV: $x_{IV} = \sqrt[10]{x_1'' x_2'' \ldots x_n''} = 40{,}4$ и $y_{IV} = 6{,}80$.

Для пары точек, а именно — центра котлована и точки III, можно написать два уравнения:

$$Q = \frac{1{,}36k\,(H^2 - y_c^2)}{\lg R - \lg x_c}; \qquad (a)$$

$$Q = \frac{1{,}36\,k\,(y_{III}^2 - y_c^2)}{\lg x_{III} - \lg x_c}. \qquad (b)$$

Решая уравнения (a) и (b) совместно, получим.

$$\frac{H^2 - y_c^2}{\lg R - \lg x_c} = \frac{y_{III}^2 - y_c^2}{\lg x_{III} - \lg x_c},$$

откуда

$$\lg R = \lg x_c + \frac{(H^2 - y_c^2)(\lg x_{III} - \lg x_c)}{y_{III}^2 - y_c^2},$$

или

$$\lg R = \lg x_c + \frac{(2H - s)\, s\, (\lg x_{III} - \lg x_c)}{y_{III}^2 - y_c^2}, \qquad (c)$$

где s — понижение уровня в центре установки

Подставив в уравнение (c) все вышеуказанные значения и произведя вычисления, получаем

$$\lg R = 2{,}09542$$

Такое же уравнение (c) можно составить и для другой пары точек центра установки и точки IV

$$\lg R = \lg x_c + \frac{(2H - s)\, s\, (\lg x_{IV} - x_c)}{y_{IV}^2 - y_c^2}, \qquad (c')$$

причем вычисления дают

$$\lg R = 2{,}32042$$

Среднее из двух найденных значений

$$\lg R = \frac{2{,}09542 + 2{,}32042}{2} = 2{,}20792 \text{ и } R = 161 \text{ м}.$$

Таким же образом, т. е по формуле

$$\lg R = \lg x_c - \frac{(2H - s)\, s\, (\lg x_n - \lg x_c)}{y_n^2 - y_c^2}, \qquad (38)$$

вычислены значения величины R всех трех ярусов установки понижения для проходки шахт «Матадор» в Зенфтенберге

При подстановке значений R, вычисленных по формуле (38) и занесенных в графу 13 табл 16, в уравнение (23) или (24), получились значения «расчетного дебита» Q (графа 18)

4 При описании установки понижения для постройки подземной части главного вокзала в Лейпциге И Шульце произвольно принял $R = 1\,500$ м, при среднем дебите установки $Q = 0{,}333$ м³/сек При этих данных вычислением было получено $k = 0{,}0053$ м³/сек, что нами и принято для дальнейших расчетов, так как других данных о действительном значении k в данном случае не имеется

Принимая за исходные значения R, приведенные в графах 11, 12 и 13 табл 16, попытаемся установить зависимость R от других величин.

Из предыдущего известно, что $R = A\sqrt{Hk}$.

Так как согласно вышеприведенному пониманию величина R соответствует наибольшему дебиту в момент достижения требуемого понижения в центре установки, рассмотрим те примеры, для которых определенно указан в описании наибольший дебит. Разделим исходные значения R для этих установок (из граф 11, 12 и 13) на выражение $s\sqrt{Hk}$.

1) Плецензее I ярус $\dfrac{395}{4{,}9 \cdot \sqrt{14 \cdot 0{,}0014}} = 575;$

2) Плецензее II „ $\dfrac{500}{6{,}3 \cdot \sqrt{14 \cdot 0{,}0014}} = 567;$

3) Ленинцзее II „ $\dfrac{777}{8 \cdot \sqrt{14 \cdot 0{,}002}} = 580;$

4) Гартенфельд: $\dfrac{161}{2{,}3 \cdot \sqrt{8{,}25 \cdot 0{,}002}} = 546,$

5) Галле: $\dfrac{50}{1{,}3 \sqrt{2{,}6 \cdot 0{,}002}} = 540.$

Особенно показательны результаты для Плё
при равных значениях H и k получаются почти
шения $\frac{R}{s}$:

Плёцензее I ярус: $R_0 = \frac{R_I}{s_I} = \frac{395}{4{,}9} = 80{,}6.$

Плёцензее II „ $R_0 = \frac{R_{II}}{s_{II}} = \frac{500}{6{,}3} = 79{,}4,$

В среднем $R_0 = \frac{R}{s} = 80.$

Величину R_0 можно назвать «удельным радиусом действия» установки, так как она представляет теоретическую величину радиуса действия установки в момент достижения в центре последней понижения $s = 1$ *м*.

Тогда согласно уравнению (30) получим:

$$R_0^2 = 47^2 \frac{6 \cdot HkT}{p}. \qquad \alpha)$$

Положив $p = 0{,}3$ и подставив $R_0 = 80$, вычислим для установки в Плёцензее время T, необходимое для достижения R_0.

Из уравнения (α) получим:

$$T = \frac{R_0^2 \cdot 0{,}3}{47^2 \cdot 6 \cdot Hk} = \frac{80^2 \cdot 0{,}3}{47^2 \cdot 6 \cdot 14 \cdot 0{,}0014} = 7{,}4 \text{ часа}.$$

Если с округлением принять $T = 7{,}5$ час. и подставить в формулу:

$$R = sR_0 = s \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot HkT}{0{,}3}}$$

для перечисленных выше установок, то получим следующие результаты:

		По табл. 16
1) Плёцензее I ярус:	$R = 4{,}9 \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot 14 \cdot 0{,}0014 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} = 395$	395
2) Плёцензее II „	$R = 6{,}3 \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot 14 \cdot 0{,}0014 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} = 508$	500
3) Ленинцзее II „	$R = 8{,}47 \sqrt{\frac{6 \cdot 14 \cdot 0{,}002 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} = 768$	777
4) Гартенфельд:	$R = 2{,}3 \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot 8{,}25 \cdot 0{,}002 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} = 171$	161
5) Галле:	$R = 1{,}3 \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot 2{,}6 \cdot 0{,}002 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} = 54$	50

Как видно из этих примеров, величина R пропорциональна глубине понижения s в центре установки, причем коэфициентом пропорциональности является «удельный радиус действия»

$$R_0 = 47 \sqrt{\frac{6 \cdot H \cdot k \cdot 7{,}5}{p}}.$$

Не будет большой погрешности, если для всякого водоносного песчаного грунта принять $p = 0{,}3$. Тогда для определения предела (радиуса) действия установки может служить уравнение:

$$R = s \cdot R_0 = s \cdot 47 \sqrt{\frac{6 \cdot 7{,}5}{0{,}3}} \sqrt{Hk},$$

или

$$R = 575 \cdot s \sqrt{Hk}. \qquad (39)$$

Вычисленные по формуле (39) значения R помещены в графе 14 табл. 16, а в графе 19 — соответствующий общий дебит установки.

При рассмотрении полученных результатов выясняется

1 Для установки в Лейпциге вычисленное значение R почти в 2,5 раза меньше приведенного в описании значения Но последнее значение ($R = 1500$, графа 11) справедливо при среднем дебите, т е относится не к моменту достижения требуемого понижения, а, повидимому, к более позднему. Вычисленное для $R = 645$ *м* значение Q (графа 19) на 19% больше приведенного в описании среднего значения Q, что не противоречит практике.

2. Для I яруса установки шахты «Матадор» значение R, вычисленное непосредственно по разрезу воронки депрессии ($R = 156$, графа 13), получилось даже несколько меньше чем по формуле (39) ($R = 160$, графа 14)

Соответствующий значению $R = 156$ расчетный дебит ($Q = 0{,}0316$ *м³/сек*, графа 18) оказался на 17% больше дебита, указанного в описании ($Q = 0{,}027$, графа 17) Следовательно и для этого примера формула (39) дает вполне удовлетворительные результаты.

3 Для II яруса шахты «Матадор» вычисленное по разрезу воронки значение R (равное 440 *м*) почти в 1,5 раза больше вычисленного по формуле (39) Здесь возможны различные предположения

а) Разрез воронки понижения II яруса составлен не для момента достижения понижения уровня, а для более позднего

б) В грунте имеются прослойки и включения, нарушающие правильность воронки

в) Ввиду довольно продолжительного действия первого яруса предел действия его распространяется так далеко, что еще прежде достижения полного понижения в центре установки II яруса существовал больший предел действия, чем мог бы получиться при понижении сразу до глубины, требуемой для II яруса.

г) В течение некоторого времени (четверо суток, как видно из исполнительного графика работ) установки I и II ярусов работали совместно, и в это время общий дебит был больше приведенного в описании дебита II яруса.

д) Наконец все перечисленные причины могли иметь место одновременно и послужить причиной расхождения между значениями R по формулам (38) и (39)

Как бы ни было, но определение R по формуле (39) и в этом случае является практически целесообразным, так как соответствующий дебит только на 8% больше приведенного в описании (графа 21), что является не только вполне допустимым, но и полезным запасом.

Для III яруса установки шахты «Матадор» вычисленное по разрезу воронки значение величины $R = 1145$ в 2,5 раза больше вычисленного по формуле (39) Соответствующий последнему дебит на 25% больше приведенного в описании Причину такого расхождения между двумя указанными значениями R можно объяснить тем, что еще до начала действия установки III яруса предел действия при длительной работе II яруса достиг большей величины, чем $R = 460$ *м*

Хотя превышение дебита против действительного на 25% и не является чрезмерным все же можно было бы без него обойтись, если бы учесть при проектировании медленный темп производства понижения, вызываемый сравнительно медленными работами по проходке штреков Но так как предусмотреть рост величины R в зависимости от продолжительности действия установки, как выше указано, затруднительно, то и в данном случае вычисление R по формуле (39) приводит к определению ожидаемого дебита с допустимым и полезным запасом — 25%.

4 Для опытной установки I яруса в Везермюнде вычисленная по данным описания величина $R = 1300$, тогда как для II яруса $R = 1060$ Этого не может быть при нормальных условиях действия установки, если при действии II яруса не было сильных дождей или не было прорыва воды из особо водоносных включений в грунте

Если допустить, что условия были одинаковы как для I, так и для II ярусов, то

$$R_1 = \frac{1060 \cdot 6{,}97}{9{,}9} = 750 \text{ м},$$

так как пропорциональность между R и s можно считать доказанной вышеприведенными примерами Тогда расчетный дебит I яруса составит

$$Q_1 = \frac{(2 \cdot 19.6 - 6{,}97)\, 6{,}97 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}000337}{\lg 750 - \lg 12{,}4} = 0{,}058 \ м^3/сек,$$

т е на 24% меньше вычисленного при $R = 325$, определенном по формуле (39) Итак, для I и II ярусов опытной установки Везермюнде вычисленный по $R = 575 \cdot s\sqrt{Hk}$ дебит оказался на 23—24% больше приведенного в описании

5. Из рассмотрения данных установки понижения при самой постройке шлюза Везермюнде оказывается, что соответствующий приведенному в графе 17 дебиту предел действия $R = 561$ по формуле (37) Вычисленное по формуле (39) $R = 740$ м и соответствующий дебит $Q = 0{,}181$ *м/сек*, т е. на 9,75% меньше действительно имевшегося

Из этого примера видно, что если бы рассчитывать установку по тому пределу действия, который был установлен хотя бы для II яруса опытной установки, то при практическом выполнении работ установка оказалась бы не достаточно мощной, чтобы выполнить задачу в необходимый срок без вредного перенапряжения колодцев В самом деле, пусть $R = 1060$ м. Соответствующий дебит $Q = 0{,}161$ *м³/сек*, т е составляет 77% от действительного

Если принять во внимание, что фильтры при увеличении производительности колодца свыше 2,22 *л/сек* быстро загрязняются и обнаруживают сопротивление до 2,5 м (рис. 4), то количества колодцев, рассчитанного на дебит 161 *л/сек*, т е 72 шт, не хватило бы для понижения уровня грунтовых вод до требуемой глубины, пришлось бы или производить понижение более медленным темпом, чем требовалось, или устанавливать 22 дополнительных колодца, что также повело бы к задержкам и внесло бы ряд затруднений технического характера

Из всех этих примеров с достаточной ясностью видно, что определение предела действия установки по формуле (39) не только дает вполне удовлетворительные для практики результаты, но еще и гарантирует от неудач в случае неожиданного появления большого притока воды из слоев и включений с повышенной водоносностью, чего особенно можно ожидать среди общей массы мелкозернистых грунтов.

Поэтому впредь до уточнения на основе теоретических и дальнейших практических данных аналитической зависимости R от других величин автор считает возможным предложить для определения расчетной величины предела действия установки понижения ненапорных вод приближенную формулу:

$$R = 575 \cdot s\sqrt{Hk}. \qquad (39)$$

§ 5. ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОГО КОЛОДЦА И ГРУППОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ НАПОРНЫХ ВОДАХ

1. Одиночный колодец

Исходя из закона Дарси, Дюпюи, а также и Тим составили уравнение движения напорной грунтовой воды при откачке последней из одиночного трубчатого колодца:

$$y = H - \frac{q}{2\pi hk} \ln \frac{R}{x}. \qquad (40)$$

Входящие в это уравнение величины обозначают (рис 69):

h — мощность напорного водоносного слоя;
H — непониженная высота напора того же слоя,
R — радиус влияния колодца, т. е. то расстояние от оси колодца, на котором понижение напора водоносного слоя становится весьма незначительным,
q — количество воды, откачиваемой в единицу времени из колодца (дебит колодца),
k — коэффициент водопроницаемости водоносного слоя;
x — расстояние любой точки поля понижения от оси колодца;
y — высота пониженного пьезометрического уровня в той же точке.

Уравнение (40) относится к такому понижению пьезометрического уровня, при котором в данной точке сохраняется условие:

$$y > h.$$

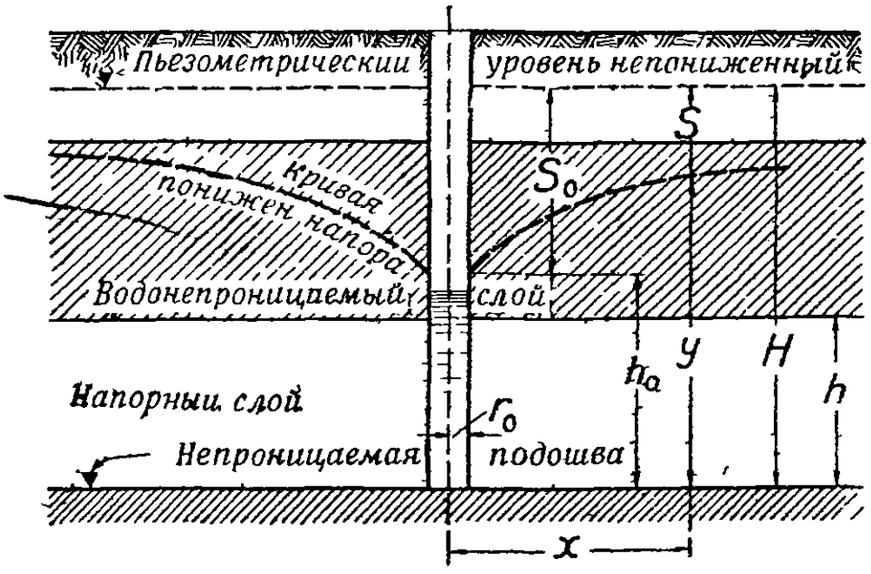


Рис. 69

Если мощность напорного водоносного слоя достаточно велика и в ближайшем к колодцу участке поля понижения окажется, что $y < h$, то явление придется рассматривать раздельно (рис. 70):

а) во внешней кольцевой части поля, т е в пределах расстояния от оси колодца от R_0 до R, происходит движение напорной воды, для одиночного колодца согласно уравнению (40) будет:

$$H - h = \frac{q}{2\pi hk} \ln \frac{R}{R_0}. \qquad (41$$

Из этого уравнения можно найти величину R_0:

$$\ln R_0 = \ln R - \frac{(H-h)\,2\pi hk}{q}; \qquad (42)$$

b) во внутренней круговой части поля с радиусом R_0 движение ненапорной воды будет выражаться уравнением:

$$h^2 - y^2 = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R_0}{x}.$$

Подставив в последнее уравнение вместо R_0 вышеуказанное выражение (42) и произведя некоторые преобразования, получим.

$$y^2 = 2Hh - h^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}. \qquad (43)$$

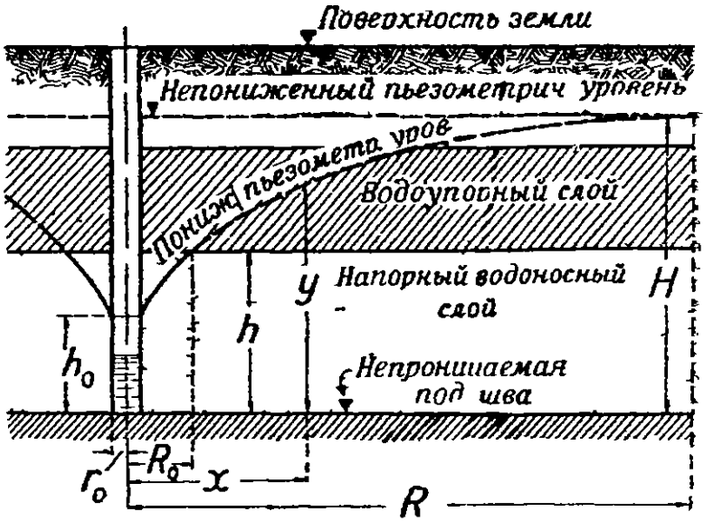


Рис. 70

2. Групповая установка

По аналогии с уравнением Форхгеймера для многоколодезной установки (23) действие групповой установки при напорных водах выражается уравнением:

$$y = H - \frac{Q}{2\pi hk} \ln \frac{R}{\sqrt[n]{x_1\, x_2 \ldots x_n}}, \qquad (44)$$

где x_1, x_2, . , x_n — расстояния всех действующих колодцев от какой-либо точки в пределах поля понижения,

R — радиус влияния установки понижения, т. е. расстояние между центром тяжести площади окруженной колодцами установки и теми точ-

ками, где понижение естественного пьезометрического уровня водоносного слоя становится весьма незначительным;

Q — общее количество воды, откачиваемой в единицу времени всеми колодцами установки (общий дебит установки);

H, h и k — имеют то же значение, что и для одиночного колодца,

y — высота пониженного напора в данной точке поля понижения.

Аналогично уравнениям (41) и (43) для групповой установки будем иметь:

а) для внешней части поля понижения:

$$H-h=\frac{Q}{2\pi hk}\ln\frac{R}{R_0}, \tag{45a}$$

b) для внутренней части поля понижения:

$$y^2=2Hh-h^2-\frac{Q}{\pi k}\left(\ln R-\ln\sqrt[n]{x_1\,x_2\ldots x_n}\right). \tag{45b}$$

Существенным отличием понижения уровня напорных вод от понижения уровня ненапорных вод является скорость распространения влияния колодца (или группы) в горизонтальных направлениях. При ненапорных водах для получения требуемой глубины понижения уровня в какой-либо точке надо освободить от воды определенный объем грунта, для чего требуется более или менее продолжительный водоотлив. При напорных водах водоносный слой остается наполненным водою так же, как он был наполнен и до понижения напора в нем, т. е. до производства водоотлива из колодца (или группы колодцев). В воде, как в упругой среде, понижение давления в одном месте очень быстро передается в другие пункты поля понижения. Поэтому величина R теоретически не зависит от времени.

Следовательно уравнения (29)—(32) и (36) для радиуса действия колодца в зависимости от времени при напорных водах были бы неприменимы даже в том случае, если бы они не страдали вышеуказанными недостатками.

Если вместо $\sqrt[n]{x_1\,x_2\ldots x_n}$ подставить в уравнение (44) величину радиуса равновеликого данной установке круга X_0, то получим:

$$y=H-\frac{Q}{2\pi hk}\ln\frac{R}{X_0}. \tag{44'}$$

§ 6. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОЛОДЦА E

Производительностью колодца называется то наибольшее количество воды, которое можно откачивать в единицу времени из данного колодца при продолжительной эксплоатации последнего.

Чем больше воды откачивается в единицу времени из данного колодца, тем большее понижение уровня воды создается в нем и вокруг него в грунте. Поэтому для достижения возможно большего понижения уровня грунтовых вод как будто бы надо было откачивать из колодца в единицу времени возможно большее количество воды.

Если откладывать по оси ординат вниз (рис. 71) понижения уровня грунтовой воды снаружи колодца, а по оси абсцисс — соответствующие этим понижениям значения q, вычисленные по формуле (6'), то получим кривую A, из которой видно, что q_{max} получается при $h_0=0$, т. е. при $s_0=H$ При таком положении уровня воды боковая поверхность фильтрующей части колодца $F=2\pi r_0h_0=0$. Так как при этом условии вода не может пройти в колодец, то следовательно при $s_0=H$ будет $q=0$.

Итак, с одной стороны, получается по уравнению (6′), что при $h_0 = 0$ $q = q_{max}$, а с другой стороны, при $h_0 = 0$, $q = 0$, откуда $q_{max} = 0$ — нелепость!

Следовательно, если пользоваться уравнением Дюпюи-Тима для вычисления дебита колодца и предположить, что эта формула справедлива для любых значении h_0 в пределах мощности водоносного слоя, то придем к нелепому выводу.

Допущение, что уровень грунтовой воды непосредственно у наружной поверхности одиночно действующего колодца может быть понижен до самой водонепроницаемой подошвы, совершенно неправильно. Это с несомненностью доказано лабораторными опытами Эренбергера, опубликованными в 1927 г.[1]. Эти опыты показали, что уровень грунтовой воды непосредственно у наружной боковой поверхности одиночно действующего колодца не может быть понижен более чем на половину высоты естественного уровня грунтовой воды относительно водонепроницаемой подошвы водоносного слоя в месте нахождения колодца, т. е.

$$s_0 \leqslant 0{,}5H.$$

К подобным же выводам приводят полевые опыты А. Тима, производившего откачку воды из колодца близ г. Нюренберга[2] еще в 70-х годах прошлого столетия, и обширные опыты с колодцами различных конструкций, произведенные строительным управлением по постройке шлюза Везермюнде — Геестемюнде[3] в 1925 г., как это более подробно изложено выше.

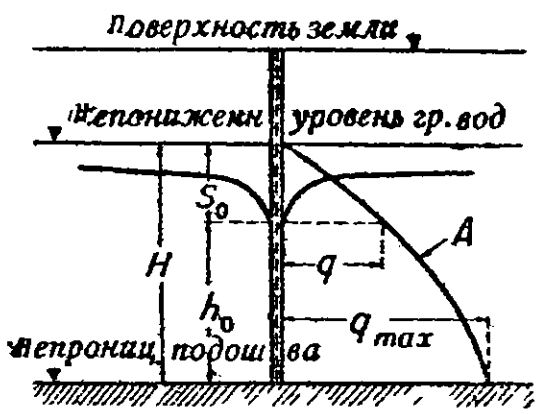


Рис. 71

Каков бы ни был предел s_0, при котором $q = q_{max}$, остается в силе очевидное положение: чем больше q и чем больше s_0, тем большая скорость развивается при поступлении воды из грунта в колодец. Если бы стремились при заборе воды из колодца к получению $q = q_{max}$, то имели бы дело с наибольшими для данных условий скоростями. При превышении какого-то предельного значения скорости входа воды в колодец пришлось бы считаться с явлением проникания через фильтр частичек грунта в бо́льшем количестве, чем это можно допустить. Кроме того сопротивление фильтра увеличивается с увеличением скорости, и при какой-то скорости это сопротивление стало бы настолько велико, что его практически допустить нельзя.

Эти причины, весьма важные в практике понижения уровня грунтовых вод, лишают возможности достижения того максимального дебита, который для колодца теоретически возможен и практически достижим, если не считаться с проникание грунта в колодец и с большим сопротивлением фильтра.

Как пример установления предельного дебита колодца в зависимости от допускаемого предела сопротивления можно указать приведенный уже выше случай понижения уровня грунтовых вод при сооружении шлюза в Везермюнде (гл. I, § 1).

Хотя, как показывают графики (рис. 4), примененные там колодцы и могли давать воды до 10 *л/сек*, но сопротивление фильтра при этом до-

---

[1] Ehrenberger, Versuche uber Ergiebigkeit von Brunnen u. s. w, Zts. d Oster Ing, № 9–14, 1927.

[2] E. Prinz, Handbuch der Hydrologie, 1923.

[3] Arp u Detmers, Grundwasserabsenkung beim Bau der Doppelschleuse in Weser munde—Geestemunde, „Zts. f Bauwesen", VI, VIII, 1926

стигало 4 *м*. Чтобы не превышать допустимого для установки предела сопротивления 2—2,5 *м*, пришлось понизить дебит колодца до 2,5 *л/сек*.

Этот пример ясно показывает, что величина сопротивления колодца является одним из важнейших факторов, определяющих величину допустимого дебита каждого колодца установки.

Кроме сопротивления приходится при выборе расчетной производительности колодца считаться с опасностью выноса частичек грунта внутрь колодца. При редкой фильтрационной ткани и при песчаном крупнозернистом грунте величина сопротивления может быть не столь большой, чтобы вызвать какие-либо затруднения.

Но при слишком большой скорости прохода воды через фильтр может происходить вынос частиц грунта, что неблагоприятно отражается на работе насосов, а также благодаря постепенному перемещению и удалению грунта из-под находящихся вблизи котлована сооружений может угрожать устойчивости последних.

В ответственных случаях, когда работа с понижением производится в непосредственной близости от сооружений и зданий, при производстве пробной откачки для установления величины производительности колодцев необходимо измерять сопротивление и наблюдать за выносом грунта.

Таким образом для определения допустимой величины производительности колодцев установки требуется производство продолжительной пробной откачки.

Однако производство длительной пробной откачки не всегда возможно за неимением достаточного запаса времени до начала строительных работ.

Поэтому для возможности производства хотя бы приближенных предварительных расчетов желательно иметь какое-то правило для выбора допустимой производительности колодца.

Наиболее существенной величиной, определяющей величину производительности, является скорость фильтрации воды через фильтр колодца. Поэтому задача определения допустимой величины производительности может быть сведена к задаче нахождения выражения для допустимой скорости фильтрации.

Так как по теории Дарси скорость движения грунтовых вод пропорциональна гидравлическому уклону, то следовательно ограничение скорости каким-то допустимым пределом равносильно ограничению уклона также каким-то пределом, который обыкновенно называют «предельным уклоном» уровня грунтовых вод у наружной поверхности колодца.

Еще в 1911 г. Кирилейс указал на необходимость соблюдения при понижении грунтовых вод предельного уклона у стенок колодца. Шульце несколько продвинул этот вопрос в том смысле, что он дал аналитическую зависимость между предельным уклоном и тем предельным дебитом, которые не должны быть превышены при эксплоатации колодцев для целей понижения.

Этот предельный дебит, названный Шульце «производительностью колодца», выражается уравнением:

$$E = -2r_0^2 m^2 \pi k \left(\ln \frac{R}{r_0} - \frac{1}{3} \right) + \sqrt{(2Hr_0^2 m^2 \pi k)^2 + \left[2r_0^2 m^2 \pi k \left(\ln \frac{R}{r_0} - \frac{1}{3} \right) \right]^2}, \quad (46)$$

где: m — предельный уклон у стенок колодца.

Шульце не дал способа определения величины m, но указал, что:

1) m должно определяться из наблюдений при пробных откачках;

2) где такие наблюдения отсутствуют, можно принимать m равным 1,5—2,5, причем к сожалению этих чисел не обосновал.

В. Зихардт посвятил свою диссертацию главным образом разработке

вопроса о предельном уклоне и о связанном с ним предельном дебите, который назван им «захватной способностью» колодца.

Ввиду большого значения вопроса о предельном дебите или о «захватной способности» (Зихардт) необходимо остановиться на этом вопросе.

Основные положения В. Зихардта следующие:

1. «Захватная способность» есть то количество воды, которое может быть захвачено колодцем в единицу времени соответственно смоченной поверхности фильтра, предполагая при этом, что имеет место наивысшая допустимая величина уклона пониженного уровня грунтовых вод у боковой поверхности колодца (рис. 72).

2. «Захватная способность» колодца находится в линейной зависимости от глубины погружения подошвы колодца относительно уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодца.

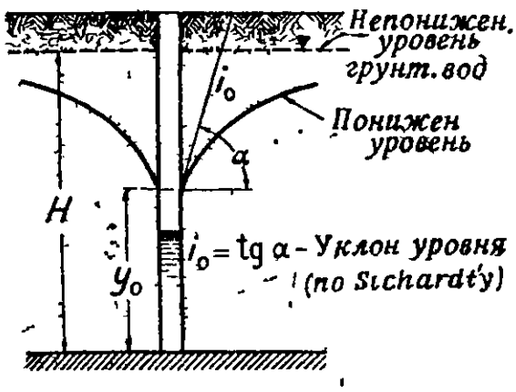


Рис. 72

Если длина фильтра меньше высоты уровня грунтовой воды у колодца, то «захватная способность» пропорциональна длине фильтра.

3. Для колодцев с одинаковой глубиной погружения, или длиной фильтра, и различными диаметрами «захватная способность» прямо пропорциональна радиусу колодца.

4. Наибольшее возможное понижение, а вместе с тем и максимальная величина притока воды в колодец достигаются тогда, когда этот приток равен «захватной способности» колодца.

5. Приходящаяся на единицу глубины погружения колодца «захватная способность» называется «степенью захвата».

Аналитически «захватная способность» по Зихардту выражается так:

$$f_m = 2\pi r_0 y_0 k i_0, \qquad (47)$$

где:

f_m — захватная способность колодца;

r_0 — радиус колодца;

y_0 — глубина погружения колодца (высота уровня воды у наружной боковой поверхности колодца), или длина фильтра, если последняя меньше высоты уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодца;

k — коэфициент водопроницаемости грунта;

i_0 — предельный уклон уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодца (рис. 72).

Для нахождения выражения i_0 Зихардт воспользовался данными ряда исполненных понижений уровня грунтовых вод.

Прежде чем перейти к использованию этих данных, Зихардт остановился на данных Пифке о тех критических уклонах, до превышения которых существует линейная зависимость между уклоном и скоростью.

По опытам Пифке получились данные, помещенные в табл. 17.

Произведя вычисление «производительности колодца» по формуле:

$$E = 2\pi r_0 y_0 m k \cdot 1000,$$

где:

$r_0 = 0{,}075$ *м* — радиус колодца,

$y_0 = 6$ *м*,

m — критический уклон по Пифке,

Зихардт получил результаты, помещенные также в табл. 17 (графа 4).

Таблица 17

Сорт песка	Коэфициент водопроницаемости k м/сек	Критический уклон m	$E = 2\pi r_0 y_0 mk \cdot 1000$ л/сек
1	2	3	4
Песок № 1	0,00303	0,20	1,72
„ № 2	0,000901	0,55	1,40
„ № 3	0,000338	0,75	1,14
„ № 4	0,000273	1,00	0,775
„ № 5	0,000101	1,07	0,306

Таблица 18

Наименование постройки	Коэфициент водопроницаемости k м/сек	Диаметр колодца d_0 м	Высота полевой поверхности фильтра h_0 м	Количество воды, откачивавшейся из каждого колодца q л/сек	Достигнутый уклон у поверхности колодца i_0	Ссылка на источники
1	2	3	4	5	6	7
Третий шлюз Вемельдинге в Голландии .	Восточная сторона 0,000123	0,15	5,00[1]	1,81	6,25	J. Schultze, Die Grundwasserabsenkung, 1924
	Северная сторона 0,000197	0,15	5,00[1]	2,22	4,78	
	Западная сторона 0,000103	0,15	5,00[1]	2,15	6,87	
Понижение грунтовых вод при постройке главного вокзала в Лейпциге . .	0,0053	0,15	5,00[1]	8,33	0,666	
Северный шлюз в Плёцензее	0,0014	0,18	4,00	4,90	1,55	Kyrieleis, Grundwasserabs. и т. д. 1911
Понижение грунтовых вод при постройке угольного склада в Тегеле .	0,002	0,15	4,85[1]	5,95	1,30	По наблюдениям Зихардта
Шахта I Горностроительного общества „Матадор“ в Зенфтенберге .	0,0003	0,15	1 ярус 4,78[1]	3,00	4,44	Наблюдения фирмы „Siemensbauunion“
			2 ярус 5,82[1]	2,92	3,54	
Понижение грунтовых вод в Гартенфельде (близ Берлина)	0,0028	0,15	5,50[1]	9,44	1,30	

[1] Высота фильтра вычислена теоретически по формуле многоколодезной установки, а не измерена непосредственно.

Полученные значения «производительности» получились слишком малыми по сравнению с наблюдаемыми в практике понижения уровня грунтовых вод.

На этом основании Зихардт сделал вывод, что критические уклоны, указанные Пифке, могут быть для практических целей значительно увеличены

Чтобы найти значения этих преувеличенных, допускаемых на практике уклонов, он воспользовался примерами нескольких исполненных понижений.

Разделив количество воды q, откаченной в среднем из каждого колодца в единицу времени, на $\pi d_0 h_0 k$, он получил значение уклона i_0 для каждого случая (табл. 18, графа 6).

Отложив по оси ординат полученные уклоны i_0, а по оси абсцисс — соответствующие значения коэфициента водопроницаемости k, Зихардт получил кривую (рис. 73), близко подходящую к типу гиперболы с ассимптотами — осями координат и выражающуюся уравнением:

$$i_0 = \frac{1}{15\sqrt{k}}. \qquad (48)$$

Это выражение Зихардт предлагает для вычисления того предельного уклона, который может быть допущен в установках понижения уровня грунтовых вод.

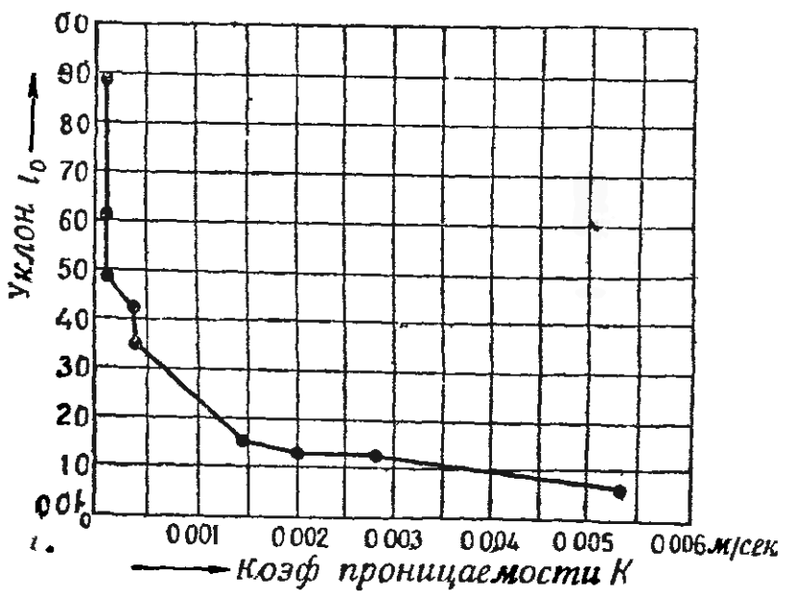


Рис 73

Под i_0 следует понимать тот практический предел уклона уровня у наружной поверхности колодца, который «сознательно или несознательно», как говорит Зихардт, устанавливается в практике понижения уровня грунтовых вод

Однако вполне можно ожидать, что на какой-либо установке будет или уже был допущен больший уклон, чем получается по формуле (48).

Сам Зихардт считает, что приведенные им значения i_0 (табл. 18) могут быть превышены на практике

Например при понижении уровня грунтовых вод при постройке аммиачного резервуара в Галле (Германия) каждый колодец давал воды в среднем 1,87 *л/сек* при $H = 2{,}6$ *м*, $h_0 = 0{,}87$ *м*, $k = 0{,}002$ *м/сек*, $r = 0{,}06$ *м* (см. J. Schultze, Grundwasserabsenkung in Th. u. Pr., изд. 1924 г., стр. 121). В таком случае получается:

$$2\pi r_0 h_0 k = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}87 \cdot 0{,}002 = 0{,}00065;$$

$$i_0 = \frac{q}{0{,}00065} = \frac{0{,}00187}{0{,}00065} = 2{,}86,$$

тогда как по формуле (48):

$$i_0 = \frac{1}{15\sqrt{0{,}002}} = 1{,}5.$$

Оказывается, что в Галле был допущен уклон i_0 почти вдвое больший, чем следует по указанию Зихардта.

В табл. 18 неправильно указан средний дебит колодца в Плёцензее — 4,9 *л/сек*.

В действительности там приходилось в среднем на один колодец [1]:

в I ярусе 7,7 *л/сек*,

» II » 12 »

Для I яруса при высоте фильтра $h_0 = 4$ *м*, при $k = 0{,}0014$ и при $r_0 = 0{,}09$ получается:

$$i_0 = \frac{0{,}0077}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 4 \cdot 0{,}09 \cdot 0{,}0014} = 2{,}4.$$

По Зихардту:

$$i_0 = \frac{1}{15\sqrt{0{,}0014}} = \frac{1}{15 \cdot 0{,}037} = 1{,}8,$$

т. е. в действительности i_0 было в 1,5 раза больше, чем получается по формуле (48).

Для II яруса:

$$i_0 = \frac{0{,}012}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 4 \cdot 0{,}09 \cdot 0{,}0014} = 3{,}74,$$

т. е. в $\frac{3{,}74}{1{,}8} = 2{,}1$ раза больше, чем по формуле (48) Зихардта.

Из этих примеров видно, что предложенная Зихардтом формула (48) для определения i_0, основанная на небольшом числе случайных и, повидимому, не вполне достоверных данных, не может рассматриваться как вполне всегда пригодная для практических расчетов установок понижения грунтовых вод.

С другой стороны, возникает сомнение в теоретической правильности формулы (48), если принять во внимание, что вычисленные по ней численные значения i_0 в несколько раз превышают те критические уклоны, при превышении коих нарушается линейная зависимость между скоростью и уклоном, как это видно из табл. 19.

Таблица 19

Коэфициент водопроницаемости k *м/сек*	Критический уклон по Пифке m	Предельный уклон по Зихардту i_0	$\frac{i_0}{m}$
0,00303	0,20	1,20	6
0,0009	0,55	2,20	4
0,000338	0,75	3,00	4
0,000173	1,00	4,00	4
0,000101	1,07	6,60	6,5

Между тем для определения скорости притока воды к колодцу Зихардт пользуется выражением:

$$v_0 = ki_0 = k\frac{1}{15\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{k}}{15},$$

т. е. исходит из закона Дарси, и для определения «захватной способности» колодца предлагает уравнение:

$$f_m = 2\pi r_0 y_0 v_0 = 2\pi r_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15}. \qquad (49)$$

Поэтому как формула для определения предельной скорости грунтовой воды у колодца, так и формула для определения «захватной способ-

[1] В. Кирилейс, Искусственное понижение уровня грунтовых вод, 1933 г.

ности» или «производительности» колодца не могут не вызывать сомнения в отношении приемлемости их для практических расчетов во всяких условиях.

Впрочем и сам Зихардт признает желательность проверки предложенных им формул при помощи новых и новых наблюдений при производимых понижениях уровня грунтовых вод.

Однако за неимением в настоящее время вполне надежного способа теоретического определения производительности колодцев, — с одной стороны, и считаясь с необходимостью ориентировочных предварительных подсчетов — с другой, приходится пока принять для этих подсчетов приближенные формулы Зихардта, а именно для определения предельной скорости

$$v_0 = \frac{\sqrt{k}}{15} \tag{50}$$

и для определения производительности колодца

$$E = \pi \cdot d \cdot y_0 \frac{\sqrt{k}}{15}, \tag{51}$$

где y_0 — высота пониженного уровня грунтовой воды над подошвой колодца у самой наружной боковой поверхности последнего и d — диаметр колодца.

Из всего вышеизложенного и в частности из рассмотрения попыток Шульце и Зихардта составить формулы для определения производитель-

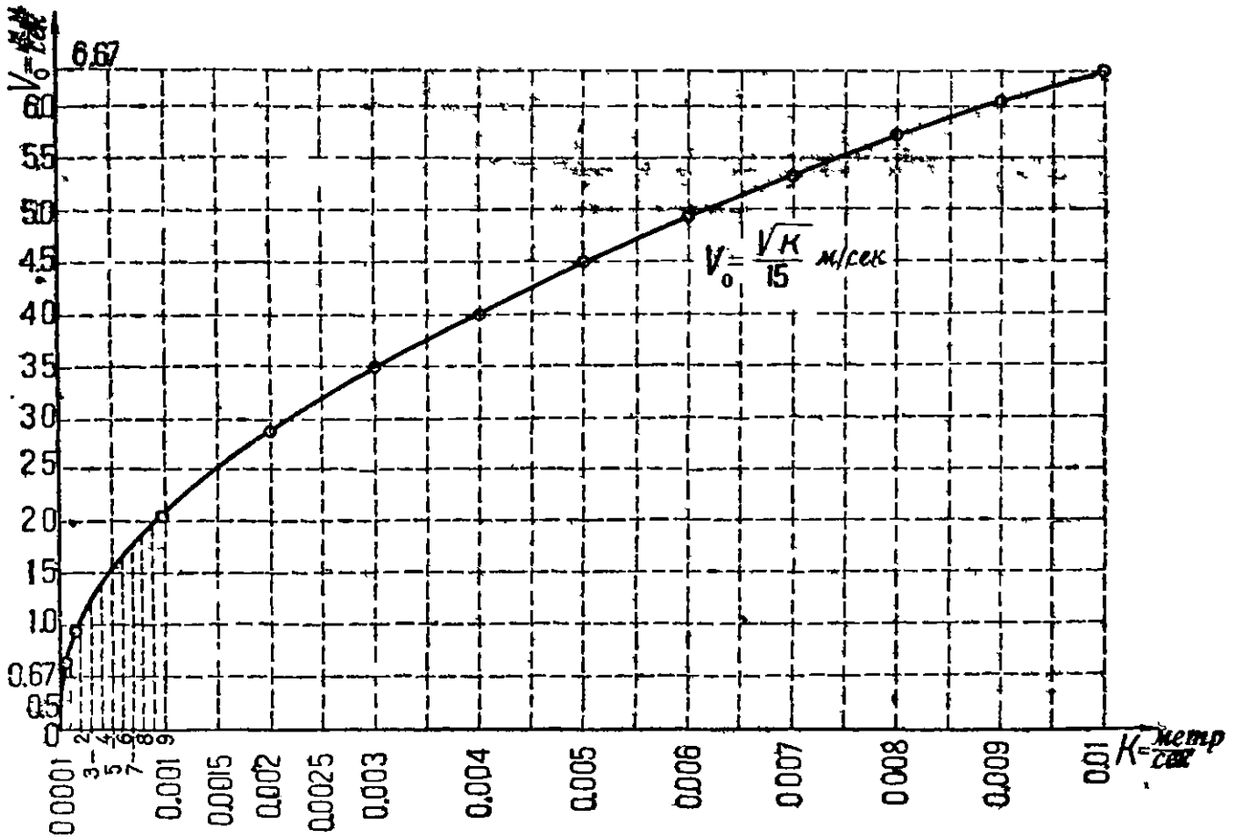


Рис 74

ности колодца можно с несомненностью заключить, что скорость притекания грунтовой воды к колодцу (непосредственно у его боковой поверхности) не должна превышать какого-то для каждого грунта особого предела, при котором могут получиться чрезмерное сопротивление колодца, засорение отверстий фильтра и проникание частиц грунта внутрь колодца.

Применить ту или иную из разобранных выше формул для определения этой предельной скорости и производительности колодца можно только при ориентировочных предварительных подсчетах.

Окончательное же установление предельной допустимой скорости и производительности можно произвести только на основании результатов надлежащим образом поставленных пробных откачек в каждом отдельном случае применения понижения уровня грунтовых вод

Вычисленные по формуле (50) значения v_0 при различных значениях k от 0,0001 до 0,01 приведены в табл. 20 и представлены графически на рис 74.

лица 20

Предельные скорост фильтрации воды в колодец по формуле Зихардта: $v_0 = \frac{\sqrt{k}}{15}$

k м/сек	v_0 мм/сек	k м/сек	v_0 мм/сек
0,0001	0,667	0,0015	2,58
0,0002	0,94	0,002	2,98
0,0003	1,153	0,003	3,66
0,0004	1,332	0,004	4,21
0,0005	1,485	0,005	4,71
0,0006	1,632	0,006	5,16
0,0007	1,700	0,007	5,58
0,0008	1,890	0,008	5,95
0,0009	2,000	0,009	6,33
0,001	2,105	0,01	6,67

§ 7. ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ВБЛИЗИ ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ

При понижении уровня грунтовых вод на участках, расположенных вблизи рек, озер и каналов, приходится считаться с влиянием последних на режим установки.

Если ложе водного резервуара покрыто слоем плотного и практически непроницаемого ила, то близость такого резервуара может оказать настолько ничтожное влияние на установку, что его можно не принимать в расчет.

Но в большинстве случаев заиление ложа открытых водоемов оказывается недостаточным для того, чтобы можно было исключить влияние этих водоемов на установку.

Прежде чем перейти к рассмотрению этого наиболее реального положения, обратимся к выводам Форхгеймера для теоретического случая полного отсутствия заиления ложа водоема.

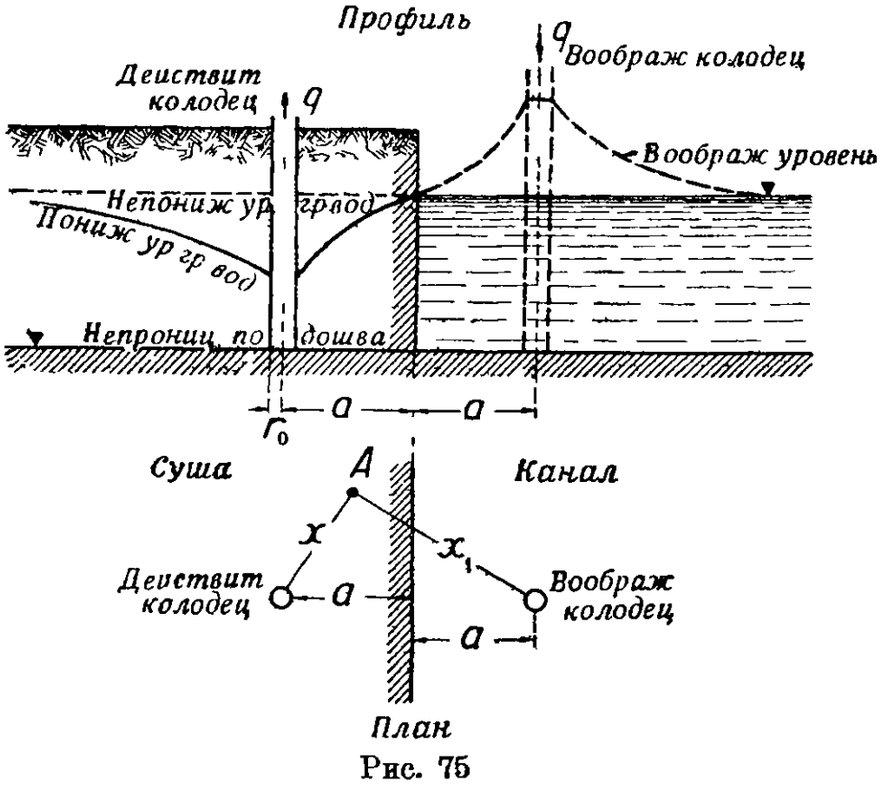


Рис. 75

Допустим, что колодец расположен на расстоянии a от отвесного берега канала (рис. 75), дно которого горизонтально и является продолжением поверхности водонепроницаемой подошвы водоносного слоя. Высота уровня грунтовой воды относительно водонепроницаемой подошвы равна H. Допустим далее, что канал засыпан таким же грунтом, из какого слагаются его берега, и что симметрично с действительным колодцем установлен таких же размеров поглощающий колодец. Если из действительного колодца откачивается в единицу времени количество

воды q, а в воображаемый наливается в ту же единицу времени такое же количество воды — q, то по Форхгеймеру явление движения грунтовых вод будет то же, что и при действительных условиях существования открытого водоема. Если высоту пониженного уровня в какой-либо точке A, отстоящей от действительного колодца на расстоянии x, а от воображаемого — на расстоянии $x_г$, обозначить через y, то движение грунтовой воды можно выразить уравнением:

$$H^2 - y^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln x_1 - \ln r_0) - \frac{q}{\pi k}(\ln x - \ln r_0),$$

где r_0 — радиус колодца.

Преобразовав последнее выражение, получим:

$$H^2 - y^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln x_1 - \ln x). \qquad (52)$$

Высота уровня грунтовой воды у поверхности действительного колодца h_0 определится из уравнения:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln 2a - \ln r_0), \qquad (53)$$

получаемого при подстановке в уравнение (52): $y = h_0$, $x_1 = 2a$ и $x = r_0$.

Из последнего уравнения видно, что, чем меньше a, т. е. чем менее колодец удален от берега, тем больше h_0, т. е. тем меньшее понижение создается вблизи него. Наоборот, чем дальше колодец отстоит от берега, тем большее понижение достигается около него.

Если взять точку, расположенную у самого берега канала, т. е. $x = x_1$, то по уравнению (52) получим:

$$y^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k} \cdot 0 \text{ или } y = H.$$

Следовательно у самого уреза воды никакого понижения не получается.

Если расстояние колодца от берега $a = \frac{R}{2}$, где R — радиус влияния колодца при отсутствии водоема, то вместо уравнения (53) получится:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln R - \ln r_0).$$

Это уравнение справедливо и при отсутствии водоема. Следовательно если водоем находится на расстоянии $a \geqslant \frac{R}{2}$ от колодца, то никакого влияния водоема на колодец не должно быть.

Пусть вместо одиночного колодца имеется группа колодцев, расстояния которых от любой точки (в пределах их совместного влияния) равны соответственно: x_1, x_2, x_3, ..., x_n, а воображаемые поглощающие колодцы удалены от той же точки соответственно на расстояния: x_1', x_2', ..., x'_n.

Тогда аналогично многоколодезным установкам без влияния водоемов — с одной стороны, и соответственно уравнению (52) для одиночного колодца — с другой, будем иметь:

$$H^2 - y^2 = \frac{Q}{\pi k}\left[\ln \sqrt[n]{x_1' x_2' \ldots x_n'} - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n}\right], \qquad (4)$$

где $Q = nq$ — общее количество воды, откачиваемой из всех колодцев группы вместе, причем из каждого колодца откачивается поровну.

Если группа колодцев достаточно удалена от берега водоема, то с достаточной точностью можно принять: $x'_1 = x'_2 = x'_3 = \ldots = x'_n = 2a$, где a — расстояние центра тяжести окруженной колодцами площади от уреза воды в водоеме.

Тогда уравнение (54) преобразуется в такое:

$$H^2 - y^2 = \frac{Q}{\pi k}\left[\ln 2a - \frac{1}{n}\ln (x_1 x_2 \ldots x_n)\right]. \qquad (55)$$

Если расположить вдоль берега два параллельных ряда колодцев (рис. 76), то расстояния точек пересечения линий I и II ряда с прямой

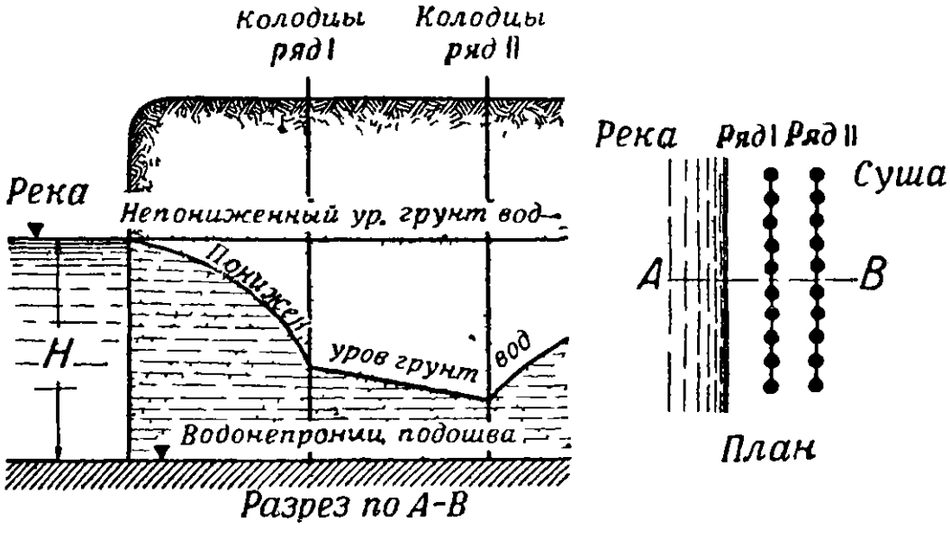


Рис 76

$A - B$, проходящей через середины обоих рядов, равны: для I ряда a_1, для II ряда a_2, причем $a_2 > a_1$. В то же время произведение $(x_1 x_2 \ldots x_n)$ будет одинаково для середины как I, так и II ряда, если в обоих рядах колодцы расположены на одинаковых взаимных расстояниях.

Тогда для середины ряда I будем иметь:

$$y_1^2 = H^2 - \frac{Q_1}{\pi k}\left[\ln 2a_I - \frac{1}{n}\ln (x_1 x_2 \ldots x_n)\right]; \qquad (I)$$

для середины ряда II:

$$y_2^2 = H^2 - \frac{Q_2}{\pi k}\left[\ln 2a_{II} - \frac{1}{n}\ln (x_1 x_2 \ldots x_n)\right]. \qquad (II)$$

Если из каждого колодца будет откачиваться одинаковое количество воды и количества колодцев обоих рядов одинаковы, то $Q_1 = Q_2$.

Нетрудно видеть из сравнения уравнений (I) и (II), что тогда $y_1 > y_2$.

Следовательно в центре тяжести первого ряда достигается меньшее понижение, чем в центре тяжести второго ряда.

Чтобы в обоих рядах достигнуть одинакового понижения, надо или увеличить производительность каждого колодца ряда I по сравнению с со-

ответственным колодцем ряда II или колодцы ряда I расположить теснее, чем колодцы ряда II.

Перейдем далее к наиболее вероятному в практике случаю неполного заиления ложа водоема.

Предположим, что нам известны толщина заиляющего слоя — s_1 (рис. 77) и коэфициент водопроницаемости его — k_1. Если мысленно заменить этот заиляющий слой тем грунтом, в котором установлены колодцы и проницаемость которого равна k, то толщина заменяющего слоя $s = s_1 \frac{k}{k_1}$.

Следовательно воображаемый поглощающий колодец должен находиться от нового воображаемого уреза воды на расстоянии $(a + s - s_1)$. Соответственно уравнению (53) тогда получим

$$h_0^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k}[\ln 2(a + s - s_1) - \ln r_0]$$

или

$$h_0^2 = H^2 - \frac{q}{\pi k}\left\{\ln \frac{2[ak_1 + s_1(k - k_1)]}{k_1} - \ln r_0\right\}, \qquad (56)$$

где h_0 — высота уровня грунтовой воды у наружной боковой поверхности колодца.

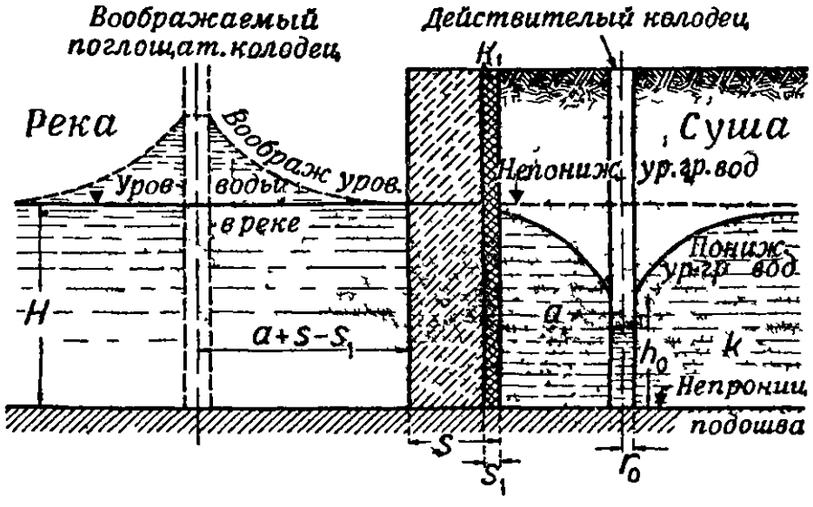


Рис 77

Уравнение (56), как и предыдущие (52)—(55), имеет только теоретическое значение, так как в действительности установить толщину заиляющего слоя s_1 и его водопроницаемость k_1 чрезвычайно затруднительно.

Только при помощи пробной откачки на месте можно более или менее надежно установить влияние открытого водоема на будущую понизительную установку.

§ 8. ВЛИЯНИЕ ДОЖДЯ

Обычные дожди с небольшим количеством выпадающих и просачивающихся в грунт в единицу времени осадков не могут оказать особого влияния на режим установки понижения. Это влияние может выразиться в равномерном по всей площади осушаемого участка подъеме уровня грунтовых вод на незначительную высоту и в несколько усиленном притоке воды к колодцам. Для ликвидации этого подъема уровня достаточно будет временно усилить водоотлив, что при обязательном для всякой установки резерве водоподъемных средств не вызовет особых затруднений.

По мнению Шульце гораздо важнее сильные ливни с количеством осадков, превышающим в десятки и сотни раз таковое обычных дождей.

Шульце считает, что при таких ливнях к колодцам притекают большие массы воды, которые вздымают как бы волны грунтовой воды перед колодцами; уклон уровня вблизи колодцев тогда становится значительно круче обычного, а следовательно значительно возрастают и скорость и количество притекающей к колодцам воды. В таком случае, если колодцы до ливня работают с полной производительностью, установка не в состоянии будет справиться с усиленным притоком воды, и уровень грунтовых вод начнет подыматься подобно тому, как он стал бы подыматься при искусственном насыщении грунта водою при помощи поглощающих колодцев.

При таком явлении не исключена опасность повреждения открытого котлована и начатого постройкой сооружения, так как следствием подъема уровня грунтовых вод будет наполнение котлована водой.

По нашему мнению положение, в котором оказалась бы установка во время ливня, может быть опасным только в том случае, если вся масса ливневой воды, выпадающей на поверхность участка, быстро проникает в грунт и быстро достигает поверхности пониженного уровня грунтовых вод. Если выпавшая в виде ливня вода скапливается на поверхности участка в виде слоя большой высоты, то можно ожидать более или менее значительной скорости просачивания ее в грунт. Однако такое скопление воды возможно только там, где ливневые воды стекают с окружающих строительный участок возвышенностей и при этом поверхностный естественный отвод воды с участка не обеспечен.

В таких случаях следует рассчитывать установку на бо́льший дебит, а кроме того надо окружать участок нагорными канавами, обеспечивающими быстрый отвод ливневых вод.

Если участок вполне обеспечен естественным или искусственным стоком вод, то образование значительного слоя воды на поверхности земли не может иметь места, следовательно и скорость просачивания воды в грунт и приток ее к колодцам не могут быть столь большими, чтобы создать угрозу катастрофического увеличения притока грунтовой воды в котлован.

Гораздо опаснее наполнение котлована поверхностным путем, т. е. наполнение его дождевой водой, выпадающей непосредственно на площадь котлована и стекающей с окружающей местности. Но эта опасность не исключена при работах и в сухих грунтах и с нею можно бороться только при помощи поверхностного отвода воды.

Для учета влияния обычных дождей с небольшим количеством осадков Шульце предложил формулы, выражающие величину радиуса действия одиночного колодца и глубины достигаемого понижения уровня у наружной боковой поверхности колодца. Но это влияние оказывается настолько незначительным, что практическая ценность такого учета почти исчезает.

Гораздо важнее правильное определение высоты непониженного уровня. Если например уровень грунтовых вод был измерен после продолжительного засушливого периода, а установка должна будет работать в период усиленного и длительного выпадения атмосферных осадков, то расчет установки по измеренному уровню может оказаться неправильным.

Поэтому следует измерять положение уровня грунтовых вод тогда, когда это положение является наивысшим или близким к таковому.

Существенным средством против вредного влияния дождей следует признать наличие надлежащего количества запасных колодцев и водоподъемных средств, а также обеспечение участка работ надлежащими устройствами для быстрого поверхностного отвода ливневых вод.

§ 9. ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ СЛОЯХ РАЗЛИЧНОЙ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ

Для понижения уровня воды в грунте, состоящем из нескольких слоев различной проницаемости, Шульце вывел формулы, сводящиеся в конечном счете к тому, что мощности всех слоев заменены эквивалентными мощностями одного основного слоя.

Пусть имеется два слоя: верхний — мощностью h и с проницаемостью k, нижний — мощностью h_1 и с проницаемостью k_1 (рис. 78).

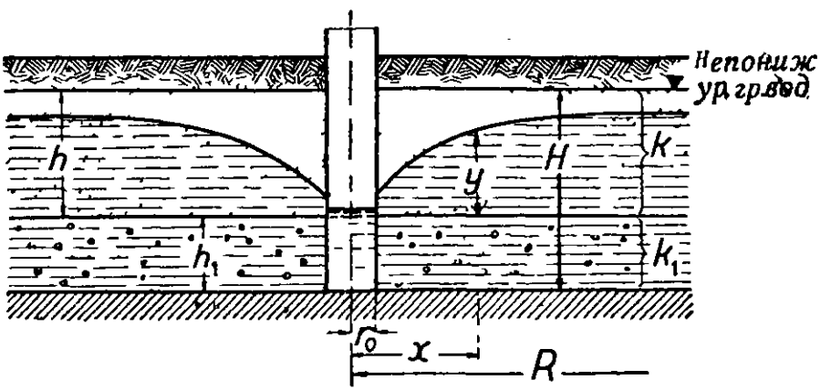


Рис. 78

Если заменить нижний слой эквивалентным ему слоем с проницаемостью k, то мощность нижнего слоя выразится:

$$h_1' = h_1 \frac{k_1}{k}.$$

Обозначив приведенную высоту воды непонижженного уровня $h + h'_1$ через H', предел действия колодца через R и приведенную высоту пониженного уровня через y', получим:

$$(y')^2 = (H')^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}. \qquad \text{(a)}$$

Но так как $y' = y + h_1 \frac{k_1}{k}$ и $H' = h + h_1 \frac{k_1}{k}$, то уравнение (а) можно переписать так:

$$\left(y + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 = \left(h + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}. \qquad \text{(b)}$$

Заменяя h величиной $H - h_1$, где H — действительная общая высота слоя воды и h_1 — действительная мощность нижнего слоя, получим:

$$\left(y + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 = \left(H - h_1 + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x},$$

или

$$y = -h_1 \frac{k_1}{k} + \sqrt{\left(H - h_1 + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}}. \qquad (57)$$

Если высоту уровня считать попрежнему от подошвы колодца, то последнее уравнение выразится так:

$$y' = \sqrt{\left(H - h_1 + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{R}{x}}. \qquad (58)$$

Соответственно для групповой установки будет:

$$y = -h_1 \frac{k_1}{k} + \sqrt{\left(H - h_1 + h_1 \frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{nq}{\pi k} \ln \frac{R}{\sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n}}}, \qquad (59)$$

или

$$y' = \sqrt{\left(H - h_1 + h_1\frac{k_1}{k}\right)^2 - \frac{nq}{\pi k}\ln\frac{R}{\sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n}}}, \qquad (60)$$

где n — число колодцев.

Вышеприведенные уравнения неудобны тем, что в них действительная высота непониженного уровня H заменяется фиктивной величиной $\left(H - h_1 + h_1 \cdot \frac{k_1}{k}\right)$, что может привести к ряду затруднений при расчете.

Поэтому удобнее было бы пользоваться при расчете не приведенной высотой, а приведенным коэфициентом водопроницаемости, сохраняя действительную общую высоту всей водоносной толщи.

В формулах (57)—(60) действительная водопроницаемость k_1 нижнего слоя заменена фиктивной для него водопроницаемостью k, но при этом действительная мощность h_1 нижнего слоя заменена фиктивной мощностью h'_1, определяемой из уравнения:

$$h'_1 k = h_1 k_1.$$

На том же основании возможно общую для всей толщи обоих слоев фиктивную водопроницаемость k заменить другой (фиктивной же) общей водопроницаемостью K, при которой фиктивная общая мощность $\left(H - h_1 + h_1\frac{k_1}{k}\right)$ заменилась бы действительной общей мощностью H, т. е. считать:

$$\left(H - h_1 + h_1\frac{k_1}{k}\right)k = HK,$$

откуда

$$K = \frac{Hk - h_1 k + h_1 k_1}{H} = \frac{hk + h_1 k_1}{h + h_1}. \qquad (61)$$

Таким образом K есть общий взвешенный коэфициент водопроницаемости толщи водоносного грунта общей мощностью H, состоящей в действительности из двух слоев различной проницаемости.

Применяя к этой толще уравнения для однородного слоя мощностью H и с коэфициентом водопроницаемости K, получим:

$$y = \sqrt{H^2 - \frac{q}{\pi K}\ln\frac{R}{x}}, \qquad (62)$$

где H и y измеряются от действительной водонепроницаемой подошвы или от дна колодца.

Соответственно для групповой установки:

$$y = \sqrt{H^2 - \frac{nq}{\pi K}\ln\frac{R}{\sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n}}}, \qquad (63)$$

По аналогии с случаем двух слоев различной проницаемости можно определять взвешенный коэфициент водопроницаемости K всей толщи, состоящей из нескольких слоев, по уравнению:

$$K = \frac{h_1 k_1 + h_2 k_2 + \ldots + h_n k_n}{h_1 + h_2 + \ldots + h_n}, \qquad (64)$$

если $h_1, h_2, \ldots, h_n$ — действительные мощности отдельных слоев и
$k_1, k_2, \ldots, k_n$ — соответственно действительные коэфициенты водопроницаемости тех же слоев.

При $h_1 = h_2 = \ldots = h_n$ — взвешенный коэфициент проницаемости всей толщи:

$$K = \frac{k_1 + k_2 + \ldots + k_n}{n}, \qquad (65)$$

т. е. равен среднему арифметическому из коэфициентов водопроницаемости всех слоев толщи.

Ввиду сложности явления движения воды при неоднородных (слоистых) грунтах вывод аналитического выражения без существенных допущений и упрощений представляется весьма затруднительным. Поэтому в случае существования резких изменений гранулометрического состава различных слоев самым целесообразным путем для получения исходных данных к расчету эксплоатационной установки являются пробные понижения, которые должны быть исполнены с наибольшей тщательностью.

§ 10. ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО УКЛОНА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД

Выше рассматривалась теория одиночного колодца и многоколодезной установки в предположении, что естественный непониженный уровень грунтовых вод представляет горизонтальную плоскость и следовательно до начала действия колодца грунтовая вода находится в состоянии покоя.

Далее следует рассмотреть часто встречающийся в практике понижения случай потока грунтовых вод, причем благодаря естественному движению воды непониженный уровень ее представляет наклонную поверхность.

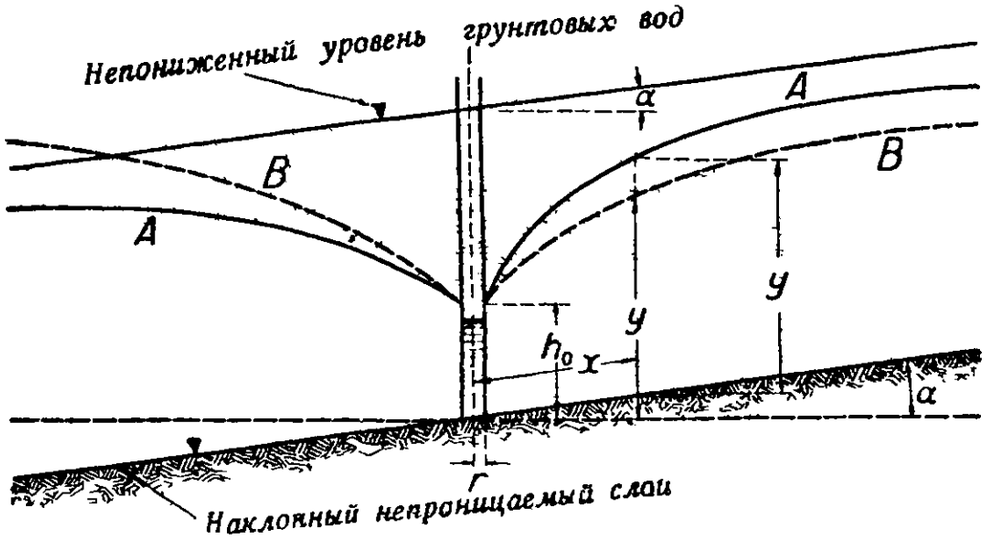


Рис. 79

А. Тим и Люгер считали, что для одиночного колодца естественный уклон уровня грунтовых вод не оказывает существенного влияния ни на дебит колодца, ни на глубину понижения уровня воды в нем. Кирилейс не возражал А. Тиму и Люгеру, но указывал, что при наклонном непониженном уровне воронка понижения имеет иную форму, чем при понижении в стоячей грунтовой воде. Если провести вертикальное сечение через ось колодца по направлению движения потока (рис. 79), то кривая пониженного уровня A в направлении вверх по течению от оси колодца располагается выше, чем кривая B того же колодца при том же дебите, но при стоячей грунтовой воде. В вертикальном сечении через ось колодца по направлению, перпендикулярному к направлению потока, обе воронки (при потоке и при стоячей грунтовой воде) совпадают.

На этом основании Кирилейс считал, что для построения воронки понижения, создаваемой одиночно действующим колодцем в потоке, следует поступать так: сначала вычислить высоты уровня y воронки, считая пони-

женный уровень и поверхность водоупора горизонтальными, а затем значения y отложить вверх от плоскости, проходящей через подошву колодца и параллельной наклонной поверхности непониженного уровня. Таким образом получается воронка понижения, вертикальное сечение которой в направлении потока представляет кривую A (рис. 79). При вычислении величины y расстояние данной точки от центра колодца следует измерять по наклонной плоскости водоупора.

Кирилейс распространял такой же способ построения воронки понижения и на многоколодезную установку; если все колодцы установки имеют одинаковую глубину относительно непониженного наклонного уровня грунтовых вод, то за плоскость водоупора принимается плоскость, проведенная через подошвы колодцев; для нахождения абсолютной высоты уровня воды в любой точке поля понижения следует вычислить высоту y по формуле многоколодезной установки в стоячей воде, а затем полученную величину y отложить вверх от наклонной плоскости, проходящей через подошвы колодцев. Для вычисления высоты y по формуле (23) за величину H принимается вертикальное расстояние между двумя параллельными наклонными плоскостями: непониженного уровня и водоупора. Из рис. 79 видно, что высота пониженного уровня у боковой поверхности колодца h_0 одинакова как с верховой стороны, так и с низовой. Хотя на самом деле при однородном грунте уровень с верховой стороны должен быть выше, чем с низовой, но практически разница бывает так мала, что ею можно пренебречь.

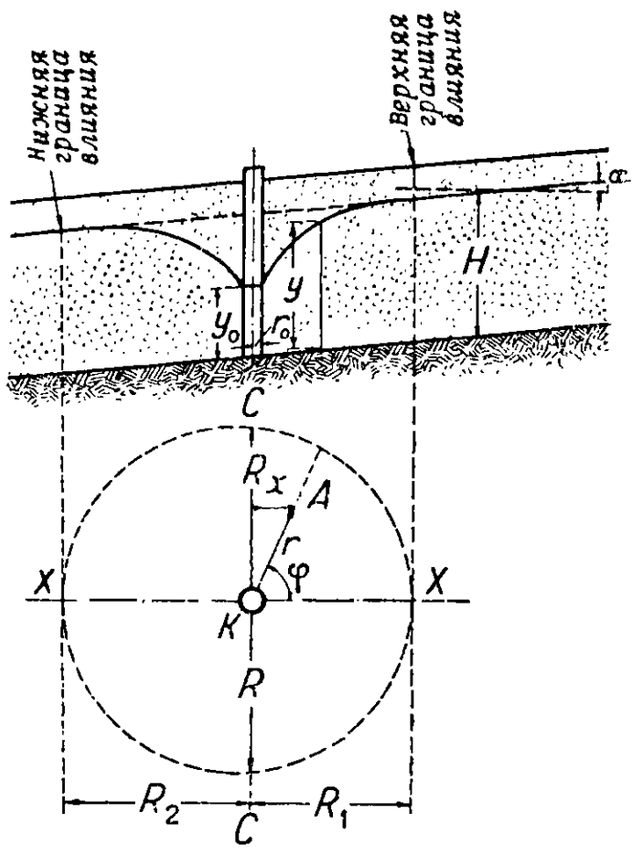


Рис. 80

Шульце в своей книге «Die Grundwasserabsenkung» 1924 г. сделал попытку выразить аналитически влияние естественного уклона уровня грунтовых вод на режим одиночного колодца и многоколодезной установки.

Сначала Шульце разобрал случай одиночного колодца (рис. 80).

Подобно Кирилейсу он взял для простоты случай, когда наклонная поверхность воды параллельна поверхности подстилающего непроницаемого слоя. Уклон естественной поверхности воды обозначен через I; высота слоя воды, измеренная по вертикали, обозначена через H; высота пониженного уровня воды у наружной боковой поверхности колодца (для простоты принятая одинаковой со всех сторон) обозначена через y_0. В плане пунктирной замкнутой линией обозначена граница влияния колодца на естественный уровень, а точка K обозначает центр колодца. Через точку K проведены две взаимно перпендикулярные оси, из коих ось $X-X$ направлена по падению естественного уровня и водоупора. Рассматривается некоторая точка A на расстоянии r от точки K, причем луч AK составляет с осью $X-X$ угол φ; через y обозначена высота пониженного уровня над плоскостью водоупора в точке A; $\operatorname{td}\alpha = I$ — уклон поверхности потока.

Шульце считал, что высота уровня в точке A должна удовлетворять двум частным диференциальным уравнениям:

$$2\pi r y k \frac{\partial y}{\partial x} = q \qquad \text{(a)}$$

и

$$yk\frac{\partial y}{\partial(r\cos\varphi)} = HIk. \tag{b}$$

Решая эти уравнения совместно, Шульце получил:

$$y^2 = \frac{q}{\pi k}\ln r + 2HIr\cos\varphi + C. \tag{c}$$

Если вместо y подставить высоту уровня у наружной поверхности колодца y_0, то уравнение (c) перепишется так:

$$y_0^2 = \frac{q}{\pi k}\ln r_0 + 2HIr_0\cos\varphi + C, \tag{d}$$

где r_0 — радиус колодца. Определив C из уравнения (d) и подставив его выражение в уравнение (c), Шульце получил уравнение линии депрессии для любого вертикального сечения потока:

$$y^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln r - \ln r_0) + 2HI(r - r_0)\cos\varphi. \tag{e}$$

При $\varphi = 90°$ или $270°$ уравнение (e) преобразовывается в такое:

$$y^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln r - \ln r_0), \tag{f}$$

откуда видно, что в сечении, перпендикулярном к направлению потока, линия депрессии имеет такую же форму, как в любом сечении при стоячей грунтовой воде. Поэтому для этого сечения справедливы все выводы, которые были сделаны для стоячей воды. Следовательно если R — предел действия колодца в поперечном сечении потока, то высота уровня грунтовой воды непосредственно у наружной поверхности колодца y_0 должна удовлетворять уравнению:

$$H^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}\ln\frac{R}{r_0}. \tag{g}$$

Если каким-либо способом будет определено значение величины R, то из уравнения (g) определится и значение величины y_0; зная y_0, можно определить предел действия R_x в любом вертикальном сечении потока. В самом деле, уравнение (e) справедливо для любой точки в пределах площади влияния колодца, включая и те точки, которые расположены на границе между пониженным и непониженным уровнем грунтовой воды, т. е. имеющие высоту уровня H и находящиеся на расстоянии R_x от центра колодца.

Для этих точек уравнение (e) примет следующий вид:

$$H^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln R_x - \ln r_0) + 2HI(R_x - r_0)\cos\varphi. \tag{6б}$$

Для выражения линии депрессии в вертикальном сечении вдоль оси потока вверх по течению, т. е. для $\varphi = 0°$, получим уравнение:

$$H^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln R_1 - \ln r_0) + 2HI(R_1 - r_0); \tag{6бa}$$

для того же сечения, но вниз по течению:

$$H^2 - y_0^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln R_2 - \ln r_0) - 2HI(R_2 - r_0). \tag{6бb}$$

Из уравнений (66a) и (66b) нетрудно видеть, что предел действия колодца вверх по течению потока R_1 меньше, чем вниз по течению R_2.

К последнему выводу в общих чертах пришел и Смрекер, который исходил из своей теории движения грунтовых вод, а не из теории Дарси-Дюпюи.

Е. Принц в «Hydrologie» довольно подробно остановился на случае действия колодца в потоке грунтовых вод. Он различает область пи-

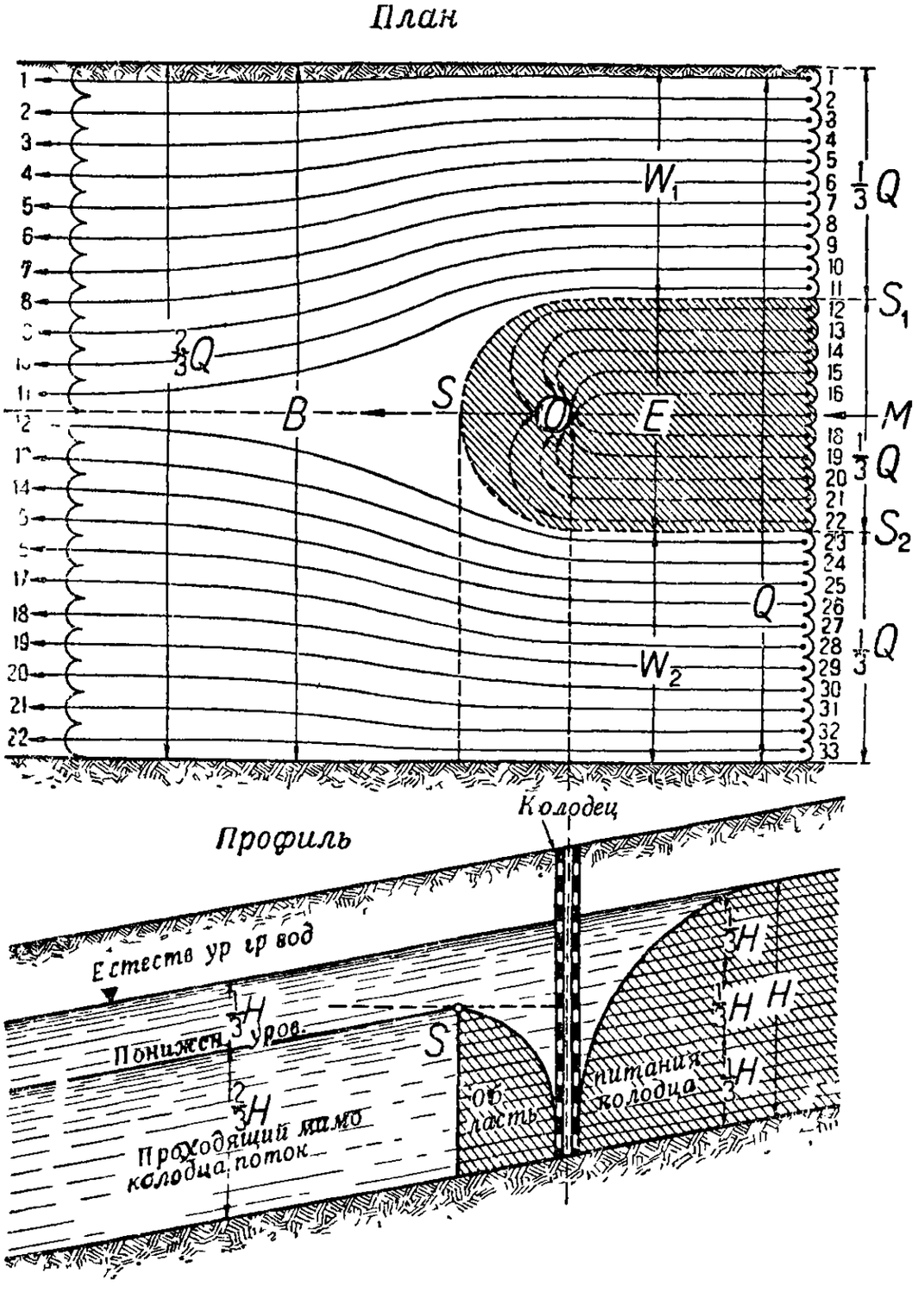


Рис 81

тания и область влияния колодца (рис. 81). Область питания, заштрихованная в плане и продольном разрезе, есть та область, из которой вода притекает в колодец. Область влияния — та область, в которой обнаруживается искривление струй потока, вызываемое действием колодца, или иначе — та область, где естественный уровень понижен благодаря действию колодца.

На рис. 81 видно, что область питания имеет меньшее распространение вниз по течению, чем вверх, а область влияния, наоборот, вниз по течению распространяется значительно дальше, чем вверх. На продольном профиле ясно видно, что вниз по течению потока пониженный уровень воды распространяется на большое расстояние от колодца, в то время как вверх по течению понижения уровня не замечается уже на небольшом расстоянии.

Следовательно и по Принцу предел влияния вверх по течению потока имеет меньшую величину, чем вниз по течению, причем, очевидно, разница между этими пределами тем больше, чем больше уклон потока.

Для многоколодезной установки в потоке грунтовых вод Шульце аналогично случаю одиночного колодца предложил формулу:

$$H^2 - y^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R_x}{\sqrt[n]{r_1\, r_2 \ldots r_n}} + 2HI\,(R_x - r_s)\cos\varphi, \qquad (67)$$

где:

r_s — расстояние данной точки поля понижения от центра тяжести площади установки;

y — высота пониженного уровня грунтовой воды в этой точке;

$r_1, r_2, \ldots, r_n$ — расстояния всех колодцев от данной точки;

R_x — предел действия группы колодцев (считая от центра тяжести площади установки) в направлении, составляющем с направлением потока угол φ и проходящем через данную точку;

H — мощность водоносного слоя;

I — уклон поверхности потока;

Q — общий дебит установки;

n — число колодцев.

Практическое пользование уравнением (67) для расчета многоколодезной установки понижения уровня грунтовых вод весьма затруднительно, кропотливо и сопряжено с рядом произвольных допущений и упрощений. Поэтому впредь до разработки практически приемлемого и теоретически обоснованного метода расчета понижения уровня грунтового потока следует руководствоваться нижеследующими практическими приемами:

1. Рассчитывать установку понижения по формулам для многоколодезной установки при горизонтальном естественном уровне грунтовых вод, руководствуясь вышеизложенными указаниями Кирилейса.

2. Полученное расчетом общее число колодцев следует распределять таким образом, чтобы наиболее тесно колодцы располагались с верховой стороны потока и более редко — с низовой.

3. Чем больше величина естественного уклона, тем больше должна быть разница расстояний между колодцами с верховой и низовой сторон.

4. Предварительное определение способа расположения колодцев должно производиться при помощи пробного понижения, причем пробная установка должна отличаться от проектируемой эксплоатационной только числом колодцев.

5. При очень большом уклоне поток должен быть перехвачен рядом колодцев, устанавливаемых с верховой стороны относительно сооружения.

При значительных уклонах спроектированная вышеуказанным способом установка может оказаться не вполне достаточной для достижения поставленной задачи. Поэтому при проектировании следует предусмотреть запас инвентаря (главным образом колодезных фильтров) для добавления колодцев по мере надобности.

Накопление опыта в деле понижения уровня потока грунтовых вод и систематизация этого опыта наряду с чисто теоретической и экспериментальной разработкой вопроса о влиянии уклона должны заполнить существующий в настоящее время пробел в теории понижения грунтовых вод.

ГЛАВА IV

КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ

§ 1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Все вышеприведенные теоретические рассуждения относятся к идеальным условиям, в природе редко встречающимся. В выведенных формулах в качестве величины, характеризующей и определяющей грунт, в котором заключена вода, приводимая в движение под влиянием искусственно создаваемой депрессии, фигурирует одна только величина k — коэфициент водопроницаемости грунта. Определяя всю толщу грунта одной величиной, тем самым уже предполагают, что эта толща на полную рассматриваемую глубину и на достаточно больших расстояниях в плане представляет некоторую однородную пористую рыхлую массу.

Между тем самое образование грунтов свидетельствует о том, что этой однородности, вообще говоря, не бывает; только в особо благоприятных условиях на ограниченном пространстве и до ограниченной глубины можно приближенно считать грунт однородной массой. Закон Дарси, положенный в основу всей вышеизложенной теории, относится главным образом к рыхлым обломочным, более или менее отсортированным породам, преимущественно к чистым пескам. Практически грунты далеко не всегда можно назвать чистым песком, так как они более или менее загрязнены различными размельченными примесями (глинами, растительными остатками, слюдами и др.). До тех пор, пока пустоты между частицами песка способны пропускать воду, т. е. до тех пор, пока грунты обладают хотя бы слабыми свойствами фильтров, мы полагаем практически возможным представлять себе процесс движения воды в них, как в некотором пористом теле. Таким образом мы рассматриваем грунт, как некоторую рыхлую (не спементированную) обломочную породу, являющуюся продуктом деятельности различных геологических агентов — ветра, воды и льда.

Состав и строение грунтов не только зависят от вида, но и от силы геологического агента. Например эоловые образования — результат деятельности ветра: в одном и том же месте, в пределах короткого промежутка времени и следовательно при неизменной окружающей обстановке сила ветра меняется, и потому переносится и отлагается материал разной крупности.

Текучая вода переносит то тончайшие глины, то пески, то гальки, то наконец перекатывает тяжелые каменные глыбы и отлагает весь этот материал в разных местах соответственно скорости течения.

Благодаря изменению силы геологических агентов рыхлые осадочные породы отличаются в большинстве случаев слоистым расположением частиц.

Там, где имеются довольно большие глубины, где уровень воды на продолжительное время остается неизменным, там отлагаются мощные слои материала приблизительно одинаковой крупности.

Мощные континентальные потоки, т. е. глубокие и многоводные реки с большой скоростью течения и незначительным годовым колебанием уровня, также не создают в результате своей отлагающей деятельности резкой изменчивости строения песчаных наносов как в глубину, так и в горизонтальных направлениях. Но реки мелкие и маловодные, с резко меняющимся уровнем и скоростью течения, отлагают материал, который в вертикальном разрезе представляет чередование слоев неодинаковой мощности и состава: тонкие слои песка или гравия сменяются тонкими слоями ила и глины; эти слои часто неправильны, т. е. на коротких расстояниях изменяют свою толщину или выклиниваются.

Для проектирования установки понижения уровня грунтовых вод понимание результатов минувшей деятельности геологических агентов имеет большое значение: чем более мощные слои однородного песка, гальки или гравия отлагались в данном месте, тем с большим основанием мы можем характеризовать грунт в пределах данного слоя одной величиной k, т. е. рассматривать его как более или менее однородный фильтр.

Чем чаще меняются состав и строение отложений в глубину и чем резче их изменения в горизонтальных направлениях, тем менее имеется оснований для принятия грунта за однородную фильтрующую массу, определяемую хотя бы средней общей величиной k. Дело особо осложняется, когда песчаные отложения прослаиваются тонкими слоями глины и разделяются последними на целую серию тончайших водоносных слойков, ведущих себя при действии установки понижения почти независимо друг от друга.

Чем тоньше глинистые прослойки и линзочки, тем они труднее уловимы при исследовании и тем труднее общую толщу прослоенных ими песков отличить от неслоистой однородной породы. Механический анализ проб, в которых перемешаны частицы водоносных и хорошо фильтрующих песчаных слоев с частицами илистых прослойков, может обнаруживать большой процент крупных фракций, и тем не менее фильтрующие свойства всей массы грунта в целом оказываются слабыми.

Поэтому говорить о сортах грунтов и характеризовать фильтрующие их свойства в зависимости от их строения и состава можно только с известной осторожностью: надо иметь в виду, что знание состава и строения[1] грунта еще не решает вопроса о фильтрационных свойствах его и следовательно о том эффекте понижения, который может получиться в действительности

Если слои не резко отличаются друг от друга и есть возможность тем или иным путем определить общий коэфициент фильтрации всей толщи, то будем условно называть такие грунты н е с л о и с т ы м и.

Если слои по составу и строению сильно отличаются друг от друга, так что общего коэфициента фильтрации всей толщи установить нельзя, то такие грунты будем называть с л о и с т ы м и.

Слоистые грунты в свою очередь следует различать:

1) по составу и строению отдельных слоев;

2) по относительной и абсолютной мощности слоев;

3) по взаимному расположению слоев.

---

[1] Под составом грунта понимается минералогический состав частиц грунта, под строением — крупность частиц или гранулометрический состав.

Если ясно различимы лежащие один над другим чередующиеся слои гравия и мелкого песка или крупного и очень мелкого относительно мало проницаемого песка, то в слоях более крупнозернистых можно встретить напорную воду; если более или менее проницаемые слои чередуются с совершенно непроницаемыми (в практическом смысле) прослойками, то в таких случаях большею частью приходится иметь дело с напорными водами. Признак слоистости является важным средством для понимания тех явлений, которые могут наблюдаться при пробных откачках.

Этот признак позволяет судить о том, имеет ли смысл лабораторное определение коэфициента водопроницаемости, возможно ли в данном месте понижение грунтовых вод и какие результаты может оно дать: будет ли понижен уровень и грунт освобожден от воды или можно добиться только уменьшения напора и при отрывке котлована все же иметь дело с насыщенным водою грунтом.

Ввиду того что предварительные буровые исследования всегда связаны с не особенно желательным увеличением стоимости постройки, понятно стремление строителя ограничиться минимумом изыскательских работ. Между тем для решения вопроса о понижении геогидрологические условия должны быть достаточно выяснены. Совместное решение двух задач — наименьшая затрата средств и времени и наибольшая ясность и точность результатов изысканий — может быть лучше всего достигнуто тогда, когда исследователь отдает себе отчет в генезисе отложений данного места или данного района. Расположение и число скважин, а также частота взятия проб при бурении будут тем более целесообразны, чем яснее цель установки каждой разведочной скважины.

Ниже в главе V об изысканиях изложены те признаки, которыми следует руководствоваться для выработки рабочей гипотезы о происхождении исследуемых грунтов. Один из важнейших признаков заключается во взаимном расположении прослойков слоистых грунтов. Следует различать следующие случаи:

1. Прослойки располагаются согласно (параллельно один другому), причем может быть два типа:
   а) прослойки сохраняются на более или менее значительном протяжении;
   б) быстро выклиниваются и сменяются один другим.
2. Прослойки располагаются несогласно, образуя диагонально-слоистую породу или породу с косой слоистостью. Совместно с рядом других признаков этот признак может дать возможность составить более или менее вероятное предположение о происхождении исследуемых грунтов. Например параллельная слоистость, сохраняющаяся на более или менее значительных расстояниях, является одним из признаков постоянного режима водного бассейна, в котором происходило осаждение частиц грунта. Они свойственны прибрежно-морским, озерным и мощным речным отложениям, где не было резких изменений направления течения и уклона. Диагональная косая слоистость свойственна чаще всего отложениям рек с блуждающим руслом, с частым чередованием плёсов и перекатов и т. п.

Подводя итог всему сказанному о составе и строении грунтов как рыхлых обломочных пород, можно остановиться на следующей классификации.

I. По способу образования

1. Морские.
2. Озерные.
3. Ледниковые и флювиогляциальные.
4. Аллювиальные и дельтовые.
5. Эоловые.

6. Делювиальные.
7. Элювиальные.

II. По залеганию и расположению частиц

1. Неслоистые { неоднородные (перемешанные, хаотические)
однородные

2. Слоистые { а) по мощности слоев { толсто-слоистые,
тонко-слоистые,
прерывчато-слоистые,
б) по взаимному расположению слоев { согласно-слоистые,
несогласно-слоистые.

III. По строению (по гранулометрическому составу)

1. Гравий (гальки).
2. Пески.
3. Суглинки.
4. Глины.

§ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ ПО СПОСОБУ ОБРАЗОВАНИЯ

1. Морские осадки обыкновенно разделяются на:
а) Осадки прибрежной зоны: валуны, гальки, грубый песок.
б) » мелководной зоны: мелкий песок, ил, органические отложения.
в) » глубоководной зоны: терригеновые илы.
г) » абиссальной зоны: абиссальные илы.

Осадки прибрежной и мелководной зон хотя и отличаются тонкой параллельной слоистостью, но ввиду обычно не резкого различия между слоями их возможно относить с точки зрения понижения к неслоистым грунтам (конечно могут быть исключения, вызванные теми или иными изменениями в условиях образования осадков). Это дает возможность считать коэфициент водопроницаемости k практически неизменным на достаточно большую глубину и на довольно большой площади.

Следует также отметить, что форма частиц прибрежно-морских песков, галек и валунов преимущественно окатанная.

Что касается размеров частиц, то чем далее от берега и чем на большей глубине отлагаются осадки, тем большей частью они мельче; поэтому среди грунтов морского происхождения можно встретить разные сорта — от глин до крупных валунов включительно.

2. Грунты озерного происхождения могут быть всякой крупности (от гравия до глины) и преимущественно слоистые. Вообще грунты озерного происхождения настолько разнообразны, что весьма трудно установить наиболее характерные их свойства.

В озерных грунтах наиболее вероятны включения растительных (торфяных) остатков, а также целых слоев и пластов торфа, бурого и каменного угля и т. д.

3. Ледниковые образования. Среди обломочных пород ледникового происхождения можно встретить все размеры частиц — от тончайшей пыли до исполинских валунов.

Отложения чисто ледниковых потоков в большинстве случаев не представляют хорошо сортированного материала. Эти отложения характеризуются постоянно меняющейся величиной зерна, постоянной сменой слоев крупного и мелкого гравия и крупного песка, среди которых встречаются также мелкопесчаные и глинистые слои.

По мере таяния ледников отложенные ими материалы подвергались сортировке талыми водами, причем глина уносилась в низовья потоков и отлагалась в озерных и морских дельтах и в самих озерах или морях; пески, гравий и более крупные материалы отлагались на пути потоков, образуя флювиогляциальные наносы.

Переходя к вопросу об установлении коэфициента водопроницаемости, приходится на основании сказанного признать, что для грунтов чисто ледникового происхождения вообще трудно рассчитывать на возможность определения единого коэфициента водопроницаемости на глубину нескольких метров и на сколько-нибудь значительных площадях; что же касается флювиогляциальных образований, то они приближаются к аллювиальным отложениям и наносам, для которых коэфициент водопроницаемости определяется более легко.

4. Грунты аллювиального происхождения. Размывая и перенося размытый материал, текучие воды отлагают его при уменьшении скорости течения на поворотах, в излучинах, в местах расширения, углубления и уменьшения продольного уклона дна реки, в результате чего образуются береговые и пойменные отложения, речные острова, косы, отдельные отмели и перекаты.

Все эти образования, отлагаемые проточными водами, называются аллювиальными наносами.

Аллювиальные наносы отлагаются по всей длине потока, но характер их в различных местах различен.

В верховьях горных рек наносы представляют в большинстве случаев неправильные несортированные нагромождения обломков твердых горных пород.

В верховьях равнинных рек отлагается более или менее сортированный крупный материал — гравий, галечник, крупный песок; в среднем течении, где скорость течения вообще меньше, отлагается более сортированный крупный и среднезернистый песок; в нижнем течении преимущественно отлагаются средние, мелкие и мельчайшие пески и наконец в устьях — мельчайшие частицы, образуя слоистые отложения мелких песков, илов и глин. Однако в одном и том же месте ни количество воды, ни скорость не являются постоянными. Они изменяются и в течение коротких промежутков времени (в зависимости от метеорологических условий) и в течение более продолжительных периодов формирования и постепенного одряхления реки.

Ранее отложенные наносы смываются в одних местах и перекрываются другими, более или менее крупнозернистыми, смотря по тому, увеличивается или уменьшается скорость течения воды. В результате получается слоистое расположение частиц разной крупности. Так как направление и угол наклона слоев грунта, отлагающегося в движущейся воде, приблизительно соответствуют уклону дна, то с изменением последнего изменяются расположение и наклон слоев, а потому получается несогласная, косая и диагональная слоистость, причем отдельные слои часто перемежаются и выклиниваются на небольших расстояниях. Но так как отдельные слои и прослойки не весьма резко отличаются по крупности частиц, то аллювиальные грунты сравнительно легко можно оценивать определенным коэфициентом водопроницаемости.

Неблагоприятными для понижения грунтовых вод являются дельтовые отложения, образующиеся в результате совместной деятельности речной и морской или озерной воды. В состав дельтовых отложений входят главным образом ил и мелкий песок и только отчасти галька и мелкий гравий. Среди дельтовых образований встречается и органический размельченный материал, сносимый рекою или погребенный на месте. В результате разложения органических остатков нередко образуются газы.

Дельтовые отложения часто отличаются тонкой и прерывчатой слоистостью с резкими изменениями строения и состава слоев, благодаря чему они могут быть особенно неблагоприятными для понижения в них уровня грунтовых вод.

5. Грунты эолового происхождения. В зависимости от того, отлагается ли переносимый ветром обломочный материал в континентальных странах или в приморских полосах, образуются барханы или приморские песчаные дюны.

Песчаные дюны — скопления чистого песка, причем величина частиц соответствует силе ветра. В зависимости от довольно узких пределов колебания силы ветра колеблется в узких пределах и крупность песчинок.

В дюнах редко встречаются зерна с поперечником более 1 *мм*, да и то в редких и тонких прослойках; преобладающий поперечник частиц дюнных образований — от 0,5 до 0,1 *мм*.

Дюны отличаются слоистостью, вызванною изменениями силы ветра. но лишь в редких случаях слои резко отличаются друг от друга в отношении водопроницаемости; вся масса дюн и барханов состоит из более или менее чистого песка, иногда только с примесью извести; поэтому эоловые образования с точки зрения понижения грунтовых вод можно считать однородными неслоистыми образованиями.

Кроме приморских и пустынных эоловых песков встречаются иногда довольно значительные и мощные эоловые песчаные накопления и в континентальных странах с умеренно влажным климатом — приозерные, приречные и степные дюны, песчаные поля и бугры.

К числу эоловых относятся также лёссовые отложения, являющиеся результатом деятельности пылевых вихрей. Крупность частиц лёсса колеблется от 0,01 до 0,05 *мм*, вследствие чего водопроницаемость его чрезвычайно мала и понижение уровня грунтовой воды в нем в большинстве случаев невозможно.

6. Делювиальные образования. Очень важное значение имеют делювиальные грунты, представляющие накопления обломочного материала по склонам и у подошв гор и возвышенностей. Они могут являться как непосредственным результатом обвалов и осыпей, так и результатом смывающего действия горных потоков, ливней и талой воды.

В первом случае они состоят из частиц самой разнообразной крупности, причем под собою могут скрывать более правильно сортированные породы. В таких случаях грунты нельзя характеризовать одним общим коэфициентом водопроницаемости.

Что же касается продуктов смыва, то в них проявляется некоторая сортировка материала, и если уклон местности не очень велик (делювий и пролювий равнин), то иногда замечается некоторая слоистость, причем. правда, один и тот же слой редко распространяется на большое расстояние. а большею частью выклинивается и сменяется другим. Среди водоносных прослойков могут встречаться отдельные неправильные включения водонепроницаемого материала и, наоборот, среди водонепроницаемых могут обнаруживаться скопления водоносных пород.

Ввиду такого неопределенного, хаотического распределения делювиальных образований предварительные изыскания, расчет и осуществление установок понижения в них в большинстве случаев представляются чрезвычайно затруднительными.

7. Элювиальные образования. Грунты элювиального происхождения, т. е. продукты химического выветривания коренных горных пород, остающиеся на месте своего образования, представляют в большинстве случаев неслоистый и несортированный материал.

Ввиду того что химическое выветривание под влиянием различных причин (неравномерность состава и строения коренной породы, неровность защитного верхнего покрова и др.) проникает в глубину неравномерно, то кроме самого верхнего (почвенного) покрова элювиальные образования представляют большею частью неоднородную массу, иногда со включением твердых, неправильных по форме водонепроницаемых включений среди остального водопроницаемого материала. Благодаря этому не только затрудняется определение коэфициента водопроницаемости элювиальных грунтов, но и создаются трудности самого производства понижения грунтовых вод.

Впрочем в случаях химического выветривания сортированных обломочных пород (песчаников и конгломератов) и превращения их в рыхлые грунты может наблюдаться однородность элювиальных образований. Но в таком случае более характерным для них является первоначальный способ их образования, а не позднейшее элювиальное происхождение.

Из изложенного видно, что способ образования имеет тесную, хотя во многих случаях и не вполне ясную связь с минералогическим и гранулометрическим составом, с расположением частиц и залеганием. Поэтому более или менее правильное представление о способе образования грунтов в данном месте должно способствовать успеху изысканий и дать возможность с меньшими затратами средств и времени выяснить те действительные геогидрологические условия, в которых будет работать будущая установка понижения уровня грунтовых вод.

§ 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ ПО СТРОЕНИЮ (ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ)

Вся масса грунта или отдельного слоя составлена из частиц различного размера, формы и минералогического состава. Если взять из какого-нибудь слоя пробу грунта и просеять через сита разной частоты, а более мелкие частицы подвергнуть отмучиванию, то вся проба разделится на столько частей, сколько имеется сит разной частоты и сколько установлено фракций отмучивания. Чем больше будет таких частей, т. е. чем больше фракций, тем однороднее размеры частиц будут в отдельной фракции. Можно было бы дробить пробу на какое угодно большое число фракций, но практически это число бывает ограничено.

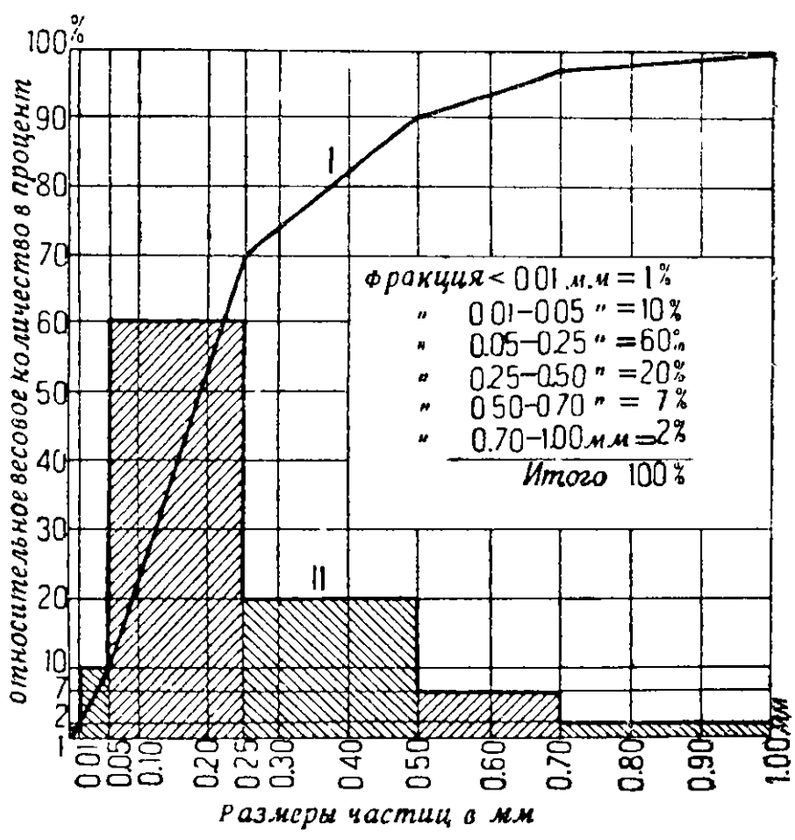


Рис. 82

Если по оси абсцисс (рис. 82) откладывать размеры зерен, а по оси ординат — сумму процентного содержания (по весу) отдельных фракций, то получим кривую механического анализа (I), которая дает наглядное представление о непрерывности изменения размеров частиц всякого песчаного грунта.

Чтобы отличить один грунт от другого, пользуются различными признаками. Пески различаются или по преобладающей величине

Наиболее употребительные названия грануло-

Диаметр фракций в *мм*	По Сабанину, 1909 г.	По Аттербергу, 1913 г.	По Вильямсу, 1920 г.	По геологической системе Англии и США, 1923 г.
>10	Камни	Гравий	Камни	Гравий
10,0 —7,0	Хрящ крупный		Хрящ крупный	
7,0 —5,0	Хрящ средний		Хрящ мелкий	
5,0 —3,0	Хрящ мелкий			
3,0 —2,0	Крупный песок	Крупный песок	Крупный песок	Очень грубый песок
2,0 —1,0				Крупный песок
1,0 —0,5	Средний песок		Средний песок	Средний песок
0,5 —0,25			Мелкий песок	Мелкий песок
0,25—0,20	Мелкий песок	Мелкий песок	Пыль песчаная	
0,20—0,10				Очень мелкий песок
0,10—0,06				
0,06—0,05		Мучнистый песок		
0,05—0,04	Пыль крупная		Пыль крупная	Ил
0,04—0,02				
0,02 —0,01		Пыль		
0,01 —0,006	Пыль средняя		Пыль средняя	Глина
0,006—0,005				
0,005—0,002	Пыль мелкая		Пыль мелкая	
0,002—0,001		Коллоидные частицы или глина		
<0,001	Ил		Ил	

Таблица 21

метрических (механических) фракций грунтов

По британской правительственной системе, 1924 г.	По правительственной системе США, 1924 г.	По международной системе, 1925 г.	По I Всесоюзной конференции по научно-исследов. вопросам дорожи. стр. СССР, 1931 г.	По комиссии при Институте геологической карты, 1931 г.
Камни	Гравий	Гравий	Булыжник, щебень, галька, гравелистые (хрящ.) частицы крупные $>$ 4 *мм*	Щебень (угловатый), галька (окатанная)
Крупный гравий			Гравелистые (хрящ.) частицы средние до 4 *мм*	Дресва (угловатая) Гравий (окатанный)
Мелкий гравий			Гравелистые (хрящ.) мелкие до 4 *мм*	
	Мелкий гравий	Песок	Песчаные частицы крупные	Грубый песок
	Крупный песок		Песчаные частицы средние	Крупный песок
Крупный песок	Средний песок		Песчан. частицы мелкие	Средний песок
	Мелкий песок		Песчано-пылеватые частицы	Мелкий песок
Мелкий или тонкий песок	Очень мелкий песок	Мо		Пыль
Ил	Ил		Пылеватые частицы крупные	
Тонкий ил		Ил	Пылеватые частицы мелкие	Ил
	Глина		Глинистые частицы (глинистая субстанция)	
Глина		Глина		Глина

зерна или по так называемому эффективному зерну, т. е. по тому наибольшему поперечнику зерен самых мелких частиц, общее весовое количество которых составляет тот или иной процент от веса всей пробы (например по Хазену — 10%).

Если приходится иметь дело с грунтами, в которых имеются кроме песка примеси пылевых (илистых) и глинистых частиц, то их приходится различать еще по большему или меньшему содержанию так называемой физической глины, т. е. частиц с поперечником, меньшим 0,01 *мм*.

В табл. 22 приведены некоторые из наиболее известных старых классификаций чистых песков.

Таблица 22

Наименование грунта	По преобладающей величине зерна (*мм*)				По эффективному зерну по Хазену (*мм*)
	Гефер	Люгер	Мушкетов И. В.	Кейльгак	
Крупный гравий	>7	—	10	—	—
Средний „	4—7	4—7	4—5	4—7	—
Мелкий „	2—4	4	—	4—2	5—1
Очень крупный песок	2—1	2	2—1	—	—
Крупный песок	1—0,5	1	1—0,5	2—1	1—0,5
Средний „	0,5—0,25	—	0,5—0,2	1—0,25	0,5—0,25
Мелкий	0,25—0,05	0,33—0,25	0,2—0,02	0,25	0,25—0,1
Очень мелкий песок	—	—	—	—	0,1—0,05
Пыль (ил)	<0,05	—	—	—	0,05—0,01

Понятие «преобладающая величина зерна» равнозначно понятию «преобладающая фракция». Если по оси абсцисс (рис. 82) отложить диаметры зерен, а по оси ординат — процентные содержания (по весу) соответствующих гранулометрических фракций механического состава (график II), то преобладающей будет та фракция, которая имеет наибольшую ординату. По графику I преобладающей будет фракция, которая соответствует наиболее крутому участку линии I.

Например для грунта, гранулометрический состав которого представлен графически на рис. 82, преобладающей является фракция с диаметрами зерен от 0,05 до 0,25 *мм*.

Такие случаи, когда преобладающими оказываются две или более фракций, не являющиеся соседними на графике, в природе редко встречаются. Если же имеются две соседние фракции одинакового веса, то грунт следует именовать по мелкой фракции, если сумма весов еще более мелких фракций преобладает над суммой весов более крупных фракций, и по крупной фракции, если, наоборот, преобладает сумма весов более крупных фракций.

Если принять определенную номенклатуру различных гранулометрических фракций, то достаточно на основании механического анализа узнать преобладающую фракцию, чтобы название этой фракции присвоить всему данному грунту.

Номенклатур гранулометрических фракций известно довольно много.

Наиболее употребительные номенклатуры гранулометрических фракций, как видно из сводной табл. 21, более или менее отличаются одна от другой, но ни одна из них не может по тем или иным причинам полностью удовлетворить запросам искусственного понижения грунтовых вод.

Например в номенклатуре акад. В. Р. Вильямса все фракции с диаметром зерна менее 0,25 *мм* именуются пылью, тогда как для понижения грунтовых вод фракция 0,05—0,25 оказывается практически водопроницаемой и более близкой к песку; пыль же при насыщении водой приобретает свойства ила, не только не проводящего, но и с трудом отдающего воду. Тем более неправильно было бы именовать пылью грунт с преобладающей фракцией 0.05—0,25, так как помимо этой фракции в нем имеются обыкновенно и более крупные фракции, суммарное процентное содержание которых может быть больше процентного содержания одной лишь преобладающей фракции.

Таблица 23

Наименование грунта	Величина зерен преобладающей фракции в *мм*
Крупный гравий	>7
Среднезернистый гравий	7 — 4
Мелкий гравий	4 — 2
Очень крупный песок	2 — 1
Крупный песок	1 — 0,5
Среднезернистый песок	0,5 — 0,25
Мелкий песок	0,25 — 0,05
Очень мелкий песок	0,05 — 0,01
Ил	<0,01

За неимением возможности останавливаться здесь на подробном критическом разборе известных номенклатур, остается только отметить, что на основании сопоставления наиболее употребительных номенклатур (табл. 21 и 22) более удобной для целей понижения грунтовых вод представляется номенклатура чистых песков и гравия, приведенная в табл. 23.

Таблица 24

	Наименование грунта	% частиц <0,01 *мм* по весу	% извести по весу	Примечание
Песчаные грунты	Чистый песок	0 — 5		
	Слабоглинистый песок	5 — 10		
	Глинистый песок (супесь)	10 — 15		
Суглинки	Суглинно-супесь	15 — 25		
	Тощий суглино	25 — 30		
	Средний „	30 — 40		
	Жирный „	40 — 55		
Глинистые грунты	Песчавистая глина	55 — 65		
	Обыкнов. (средн.) глина	65 — 80		
	Жирная глина	>80		
Мергели	Песчаный мергель	до 20	20	По Теер-Шюблеру
	Суглинистый мергель	20 — 50	15 — 25	
	Глинистый „	50 — 70	15 — 25	
	Известковый „	20 — 50	50 — 70	

Чистыми песками обыкновенно считаются такие, в которых илистых частиц (< 0,01 *мм*) встречается не более 5%. Чем больше содержится таких частиц, тем более пески теряют свои фильтрующие свойства и приближаются к водонепроницаемым суглинкам и глинам.

Условимся именовать грунты по содержанию в них частиц < 0.01 *мм* согласно табл. 24.

§ 4. СВОЙСТВА ГРУНТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ВОДЕ

Прежде чем перейти к характеристике грунтов по отношению их к грунтовой воде, необходимо остановиться на пористости вообще рыхлых обломочных пород, как на признаке, в известной степени определяющем отношение этих пород к воде.

Пористостью называется отношение общего объема пустот к общему объему воды.

Теоретически пористость не зависит от объема отдельных частиц, если последние представить себе в виде шаров одинакового размера. В зависимости от расположения шаров теоретическая пористость рыхлых пород составляет от 26 до 47%. Но так как форма отдельных частиц неодинакова, а еще менее одинаковы размеры частиц, то пористость иногда значительно отличается от теоретической. Чем крупнее материал, тем менее он однороден; пустоты между крупными частицами заполняются более мелкими; в промежутках между последними размещаются еще более мелкие частицы и т. д., благодаря чему пористость уменьшается.

Ниже приводятся для сравнения значения пористости некоторых обломочных пород:

среднего гравия	36%	по Люгеру
мелкого песка	42%	
очень глинистой почвы	40,4%	
ила	44—50%	
песчаников	от 4 до 40%	

Водопроницаемость хотя и связана с пористостью, но далеко не во всех грунтах увеличивается вместе с нею. Если в естественных грунтах пористость зависит от формы частиц, взаимного их расположения и степени разнообразия размеров, то водопроницаемость зависит главным образом от размеров частиц, а затем уже от формы и расположения их. Чем больше величина зерен, тем более грунт водопроницаем, хотя бы коэфициент его пористости и был меньше. Песок, поперечник зерен которого менее 0,01 *мм*, почти вовсе не пропускает воды, хотя пористость его обыкновенно более 40%. Пористость ила иногда достигает 50%, а проницаемость его почти равна нулю. Последнее объясняется не только присутствием коллоидов, которые суживают поры между частицами, но и тем, что в мелкозернистой породе больше действие капиллярных сил, благодаря которым вода удерживается в порах. Чем более мелкозернисты породы, тем большей капиллярностью они обладают.

Капиллярность измеряется высотой подъема воды в капиллярных трубках, которая удовлетворяет следующему уравнению:

$$h = \frac{30\,(1 - 0{,}02t)}{d}\ мм,$$

где d — диаметр капиллярной трубки в *мм*, t — температура по Цельсию.

Капиллярность грунтов вообще трудно поддается вычислению и обыкновенно находится опытным путем.

По исследованиям Аттерберга капиллярность песка разной крупности выражается следующими высотами (h):

$d = 5{,}00 - 2{,}00$	*мм*;	$h =$ 25	*мм*
$d = 2{,}00 - 1{,}00$	„	$h =$ 55	„
$d = 2{,}00 - 0{,}50$	„	$h =$ 131	„
$d = 0{,}50 - 0{,}25$	„	$h =$ 246	„
$d = 0{,}20 - 0{,}10$	„	$h =$ 428	„
$d = 0{,}10 - 0{,}05$	„	$h =$ 1055	„
$d = 0{,}05 - 0{,}02$	„	$h =$ 1860	„

где d — диаметр зерен песка.

В крупнозернистых породах действие силы тяжести значительно больше действия капиллярных сил, в глинистых — наоборот.

Количество воды, проходящее в единицу времени через некоторое сечение водоносного слоя, существенно зависит от величины трения, которое в свою очередь зависит от величины поверхности пор, образованных частицами грунта. При малом размере пор трение становится настолько значительным, что несмотря на большую пористость движение воды затрудняется. Благодаря этому все мелкозернистые грунты практически мало проницаемы для воды.

Температура воды также влияет на степень водопроницаемости грунтов: с повышением температуры увеличивается водопроницаемость.

Вообще условия, влияющие на степень водопроницаемости, настолько многочисленны и разнообразны и настолько трудно поддаются учету, что ни опытные таблицы, ни вычисления по некоторым эмпирическим формулам, ни даже результаты лабораторных испытаний не могут считаться пока еще вполне надежными для более или менее точных расчетов.

Принятие водопроницаемости за постоянную для каждого данного грунта величину справедливо лишь при условиях равномерного строения и отсутствия слоистости. Глина считается практически водонепроницаемой, пока вода над ней или перед ней находится под малым давлением. Увеличение давления до величины, при которой преодолевается энергия капиллярных сил, может повести к тому, что глина сделается водопроницаемой.

Теоретически водонепроницаемых пород нет; это понятие можно применять только в практическом смысле.

Отсюда вытекает то положение, что проницаемость и водонепроницаемость можно рассматривать как понятия относительные. Если например под крупным песком залегает мелкозернистый слабо-глинистый песок, то последний можно считать по сравнению с вышележащим крупным песком непроницаемым.

Принимая деление грунтов на водопроницаемые и водонепроницаемые, можно условно считать:

I. Водопроницаемыми грунтами — песок с преобладающей величиной зерна $d > 0{,}1$ *мм*, пористый песчаник с неглинистым цементом, галечник, пористые конгломераты с неглинистым заполняющим поры или пементирующим веществом, брекчии, вулканические пески, пузырчатые и ячеистые горные породы, многие доломиты, угли, бурый железняк, все слоистые горные породы с открытыми плоскостями напластования или сланцеватости и трещиноватые породы всех родов.

При этом надо указать, что такие породы, как песок, гравий и вообще породы рыхлые и не слишком крупнозернистые рассматриваются как породы, проницаемые en petit, и движение воды в них подчиняется закону Дарси; породы трещиноватые и с большими размерами пор (горный щебень,

валуны), слоистые горные породы с открытыми плоскостями напластования считаются проницаемыми en grand, и движение воды в них не подчиняется закону Дарси.

II. Водонепроницаемыми грунтами — глины, глинистые сланцы, мергель, мергелистые сланцы, плотный известняк, гранит и другие изверженные породы, когда они мало разбиты трещинами, песчаники и конгломераты с сильно глинистым цементом, мерзлая почва и многие насыщенные водой торфы.

Для целей понижения интересны главным образом рыхлые породы: пески, гравий, галечник, супеси, суглинки, глины и отчасти торфы и мергелистые почвы. Что же касается сцементированных трещиноватых пород, то они могут представлять большой интерес для понижения в них уровня грунтовой воды только в случаях проникания из них воды в рыхлые породы, в которых производятся глубинные работы. При разработке же выемок в таких породах можно не опасаться обрушения последних, а потому можно ограничиться открытым водоотливом. Если же допускать воду в котлован или шахту вообще нельзя, то более рациональным представляется применение цементации трещиноватых пород.

Таким образом обломочные породы, имеющие наиболее обычное значение для понижения, можно разделить на:

1) водопроницаемые — пески, галечники, гравий, пористые песчаники и конгломераты;

2) водонепроницаемые — глины, суглинки, слои растительных остатков, мергелистые грунты, торфы;

3) относительно водонепроницаемые — мелкозернистые пески, глинистые пески и супеси (по сравнению с подстилающими или перекрывающими их крупнозернистыми водопроницаемыми грунтами).

ГЛАВА V

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

В предыдущих главах была выяснена важность предварительного определения свойств грунтов и заключенных в них вод, т. е. численных значений величин k, H и R, входящих в формулы для расчета установок понижения.

Но прежде определения значений этих величин в каждом отдельном случае необходимо выяснить условия залегания вод и заключающих их масс грунта, т. е. изучить геологическую и гидрологическую обстановку. Таким образом решение задачи понижения должно начинаться с геологических исследований.

§ 1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологические исследования заключаются в изучении имеющихся в данной местности наносных и коренных пород путем осмотра обнажений, отрывки шурфов и бурения. Изучение имеющихся литературных и архивных материалов о геологическом строении данного района может также принести большую пользу. В тех случаях, когда геологическое строение района довольно однообразно, а имеющиеся документы достаточно подробны и достоверны, могут потребоваться только небольшие дополнительные разведочные работы, а в некоторых случаях и совсем не потребоваться.

Но в большинстве случаев из имеющихся документов (в виде геологических и геогидрологических карт, разрезов и описаний) можно составить только общее представление о том районе, где проектируется постройка. С другой стороны, в равнинных местностях с высоким уровнем грунтовых вод не всегда можно найти достаточно показательные естественные обнажения.

Отрывка глубоких шурфов в водоносных грунтах настолько затруднительна, дорога и продолжительна, что к этому способу можно прибегать только в тех случаях, когда для выяснения геологических условий можно ограничиться небольшим количеством шурфов.

В большинстве случаев наиболее целесообразным и доступным (в экономическом смысле) оказывается бурение скважин и взятие из них проб грунта с соответствующими замерами глубин залегания и мощностей вскрываемых слоев.

1. Бурение, план работ, добывание проб, документация

Здесь нет надобности описывать буровые инструменты, производство буровых работ, способы взятия проб и т. д., так как все эти данные имеются

в руководствах по бурению и геологической разведке вообще, но следует отметить те особенности, которые имеют существенное значение для понижения грунтовых вод.

П л а н б у р е н и я. Задача исследования состоит в том, что при помощи наименьшего числа скважин требуется наиболее полно и правильно осветить геологические условия местности.

Расположение и число скважин зависят от характера и размеров сооружения и степени сложности геологических условий.

Планом бурения должна предусматриваться прежде всего общая ориентировка в геологии данного района. Для этой ориентировки предусматривается закладка нескольких «опорных» скважин (не менее трех).

При назначении мест этих скважин большую пользу может оказать поверхностный рельеф местности.

Например, если имеется ясно выраженная речная долина (рис. 83), то

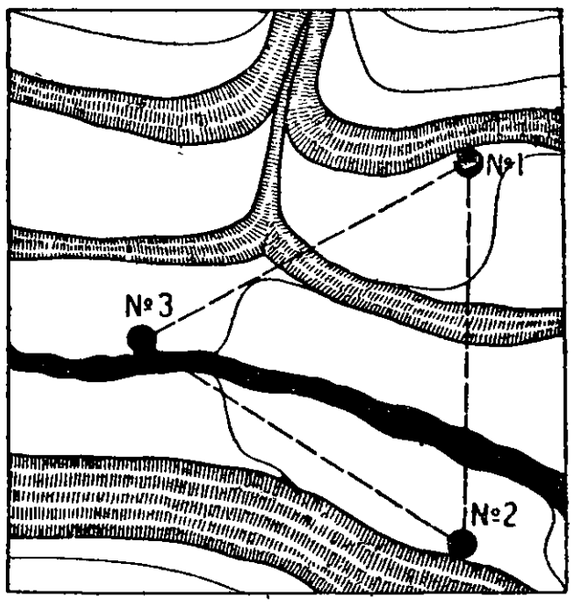


Рис. 83

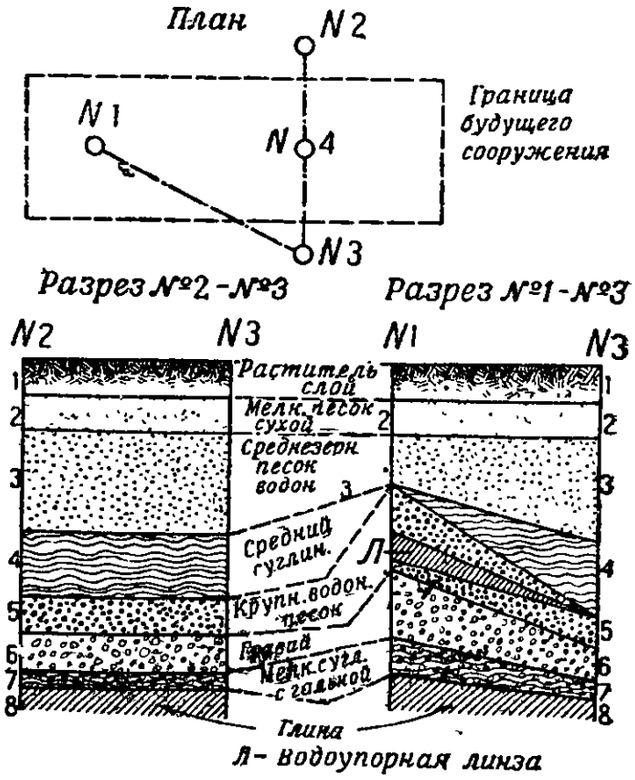


Рис. 84

желательно заложить три скважины так, чтобы две из них находились в каком-нибудь поперечном сечении ближе к краям долины, а третья — в тальвеге или просто на середине долины, причем так, чтобы треугольник *1—2—3* был приблизительно равносторонний.

Указать общие подробные правила выбора мест опорных скважин довольно трудно; опытность исследователя, как и во всей вообще разведке, должна играть здесь главную роль.

Если район большой, то закладывается несколько опорных групп скважин, которые или связываются между собою каким-либо общим признаком, или же скважины назначаются независимо друг от друга и связываются только потом, когда обнаружится их геологическая связь.

В тех случаях, когда рельеф местности не дает никаких указаний на возможный характер отложений, первые скважины следует закладывать на месте будущего сооружения по каким-нибудь руководящим направлениям, например — по продольной и поперечной осям сооружения.

Первые сведения или даже намеки на характер залегания пород, равно как на состав и строение их, могут подсказать уже некоторую предварительную руководящую мысль для дальнейшего расположения скважин.

П р и м е р (рис. 84). Местность ровная. Все три скважины на первых метрах глубины вскрыли приблизительно одинаковые слои почвы и под-

почвы, но глубже стал замечаться некоторый наклон слоев от скважины № 1 к № 2 и № 3, причем в скважине № 1 встречены некоторые грунты, которых не оказалось в скважинах № 2 и № 3.

Это наводит на мысль, что под прикрытием первого и второго слоев находятся отложения засыпанного потока с направлением его течения от скважины № 1 к скважинам № 2—3.

Для возможности составления поперечного профиля предполагаемого потока между скважинами № 2 и № 3 закладывается скважина № 4. Допустим, что большинство поверхностей напластования оказалось наклоненным от скважин № 2 и № 3 к скважине № 4 и что наклон особенно ясно выражен для поверхности нижней водоупорной глины (рис. 85).

Если продолжить стороны угла *ABC* в обе стороны, то точки пересечения их с горизонтальной прямой *DE*, представляющей в разрезе первую снизу горизонтальную поверхность напластования, дают приблизительное указание, где находятся берега засыпанной долины. Если эти точки уходят слишком далеко за пределы строительной площадки, то закладывают следующие скважины № 5 и № 6 на расстояниях, имеющих практическое значение для понижения уровня грунтовых вод в данном случае.

Развивая бурение по направлению, перпендикулярному к линии № 2—№ 3, можно или установить направление долины или обнаружить, что место постройки представляет замкнутую котловину (что, кстати, для нашего примера менее вероятно, так как на дне имеется крупный гравий, указывающий на сортировку наносов при довольно быстром течении бывшего открытого потока).

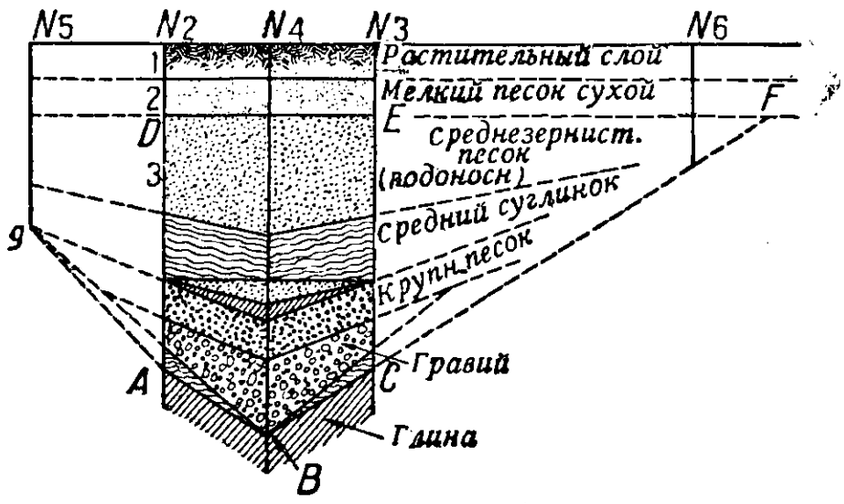


Рис. 85

Уяснив общий характер отложений, далее легче будет наметить и провести бурение по тем направлениям, по которым можно выяснить геологическое строение местности при меньших затратах средств и времени.

Из сказанного видно, что первоначальный план бурения может быть составлен только в самых общих чертах. Далее бурение следует вести, руководствуясь результатами первых скважин. Такое бурение в отличие от бурения по заранее разработанному детальному плану (с предварительной разбивкой скважин и назначением глубин их) можно назвать активным бурением. Таким образом основным правилом при составлении плана бурения должна быть активность его: план не должен иметь характера заранее подготовленной детальной программы, а должен развертываться по ходу работ, причем каждая новая скважина предназначается для выяснения конкретного вопроса.

Неудобства такого не точно очерченного плана, а именно трудность заблаговременного определения потребных денежных средств, количества буровых комплектов и рабочих при заданном сроке, только кажущиеся. На самом деле можно при известном опыте предусмотреть и общее количество необходимых скважин, и потребные средства, и количество буровых комплектов и рабочих. Смотря по роду сооружений, по их размерам в плане и по глубине их заложения можно более или менее точно сказать, сколько потребуется скважин и какова должна быть средняя глубина бурения. Задача же активного бурения будет состоять в том, чтобы расположить эти

скважины наиболее рационально для получения ясных и точных результатов разведки. Относительно производства самого бурения необходимо сделать несколько замечаний.

При проходке слоистых грунтов, при наличии перемежающихся проницаемых и непроницаемых прослойков, необходимо часто вынимать бур и брать пробы, так как иначе могут быть пропущены очень тонкие водонепроницаемые прослойки, которые могут играть серьезную роль при решении вопроса о понижении уровня грунтовых вод.

При прохождении песчаных слоев с большим напором воды вместе с поднимающимся уровнем воды поднимается грунт, который заполняет обсадную трубу и образует «пробку». В таком случае надо постараться осадить обсадную трубу до водоупора и пробку выбрать постепенно (при помощи желонки или ложки).

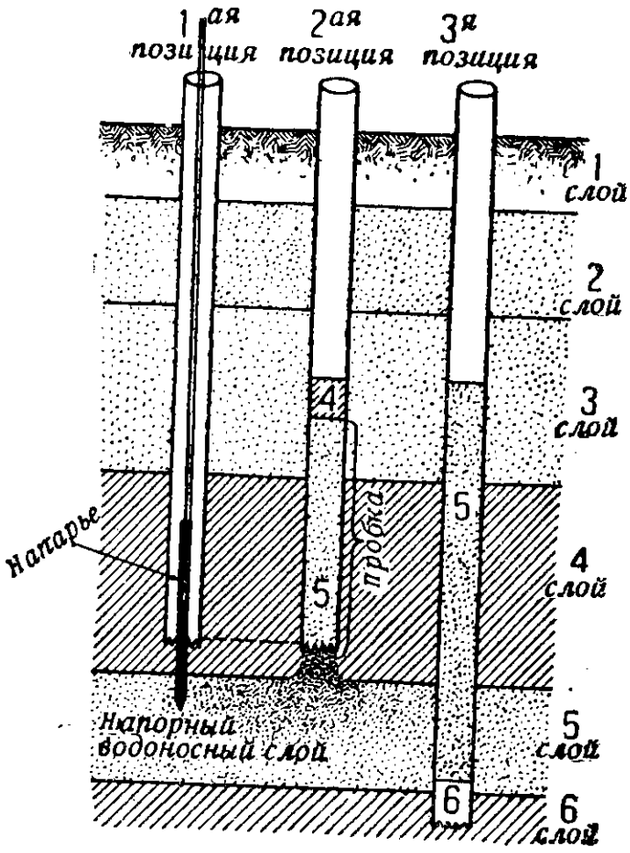


Рис. 86

При бурении в слоях грунта, не насыщенных водою, следует при каждом залоге опускать конец бура на несколько сантиметров ниже фрезера обсадной трубы. Допустим, что при некотором положении (рис. 86, позиция 1) в скважине появилась вода. Еще до извлечения бура, а особенно после этого, вода под напором проникает в обсадную трубу и увлекает с собою разжиженный грунт, образуя пробку (позиция 2). Замерив глубину, на которой появилась вода и взята последняя проба с конца напарья, следует затем осаживать обсадную трубу, одновременно выбирая пробку желонкой. Пока слой *5* не перекрыт обсадной трубой, пробка после выбирания части ее и некоторого выжидания снова поднимается. Чередуя осаживание трубы и выбирание пробки, мы в конце концов заметим, что при выбирании пробки поверхность ее более не поднимается. Это показывает, что водоносный слой *5* перекрыт обсадной трубой, фрезер которой врезался в подстилающий водоупор (позиция 3). После этого приступают к окончательному извлечению пробки.

Выбрав пробку до той глубины, на которой появилась вода, начинают далее выбирать ее осторожно, стремясь уловить смену грунтов, образующих пробку. Когда встретится новый грунт (вслед за песком глина или суглинок), то его относят уже к водоупору *6* и далее пробы берут нормально. Если желательна бóльшая точность в установлении положения водоупора, то можно по извлечении пробки приподнять трубу и замерить ту отметку, на которой в трубе снова появится вода; эта отметка будет приблизительно тем уровнем, на котором находится поверхность водоупора.

Но последняя операция требует большой осторожности, так как может снова образоваться пробка, что сопряжено с новой потерей времени. При отсутствии особой необходимости и при большом напоре лучше этого не делать, а ограничиться приблизительной отметкой поверхности водоупора.

2. Механический анализ грунтов

Для составления геологических разрезов необходимо иметь достаточную уверенность в том, что относимые к одному слою пробы грунта дей-

ствительно одинаковы по своему гранулометрическому составу, который, как выше было указано, обусловливает степень водопроницаемости.

При очень частых сменах слоев количество проб может быть очень велико, между тем производство анализов требует известного времени, особенно для мелкозернистых пород с большим содержанием глинистых частиц.

В основном все известные методы гранулометрического (механического) анализа грунтов можно разделить на следующие:

1) просеивание через решета и сита;
2) отмучивание (по скорости выпадения частиц в стоячей воде);
3) промывание (по скорости выпадения частиц в текучей воде);
4) по разнице высот разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах;
5) аэрометрический способ;
6) центрофугирование;
7) разделение током воздуха.

Просеивание через решета и сита. Грунт в воздушно-сухом и рыхлом состоянии просеивается через последовательный ряд решет и сит с определенными размерами отверстий. Набор сит обыкновенно бывает, не считая более крупных, следующий:

I — 5 *мм*	IV — 1 *мм*
II — 3 „	V — 0,5 „
III — 2 „	VI — 0,25 „

Бывают сита и с меньшими размерами отверстий, как например в приборе Вольфа — Гучерсхофа (1,00; 0,5; 0,25; 0,10; 0,05 *мм*), в котором просеивание материала через сита производится при помощи вращающихся щеток, причем грунт предварительно высушивается в сушильном шкафу при температуре не менее 100° С.

Методы осаждения в стоячей воде основаны на различии скоростей осаждения частиц разной крупности, а именно (табл. 25):

Таблица 25

Диаметр частиц *мм*	Скорость осаждения в *мм/сек*		
	по Хазену	по опытам Берлинской лаборатории	по Сабанину
0,001	0,00154	—	< 0,2
0,005	0,0385	—	
0,01	0,154	—	
0,05	2,9	2,0	0,2—2
0,05—0,10	—	7,0	> 2
0,10—0,20	—	25,0	
0,20	—	25,0	
0,25	26,5	—	
0,50	53	—	—
1,00	100	—	—

Из этих методов наиболее известны:

1) метод Сикорского,
2) » Вольфа,
3) » Кноппа,
4) полевой способ Глушкова,

Простые, но неточные, служащие главным образом для грубого определения содержания глины.

5) метод Фаддеева—Вильямса,
6) » Сабанина,
7) » Робинсона,
8) » Кюне,
9) » Свен-Одена,
10) » Осборна,
11) » Американского почвенного бюро,
12) » Аттерберга и ряд др.

} Более точные, но сложные.

Из способов, основанных на скорости выпадения частиц разной крупности в движущейся воде, наиболее известны:

1) способ Шульце,
2) » Нёбеля,
3) » Шёне,
4) » Копецкого и Копецкого-Крауса,
5) непрерывный способ проф. Глушкова и др.

Эти методы требуют лабораторной обстановки и более или менее значительной затраты времени. Поэтому большое количество проб анализировать этими способами затруднительно. Способы Нёбеля и Шульце довольно просты и требуют сравнительно мало времени, но дают результаты настолько грубые, что точных анализов этими способами производить нельзя [1].

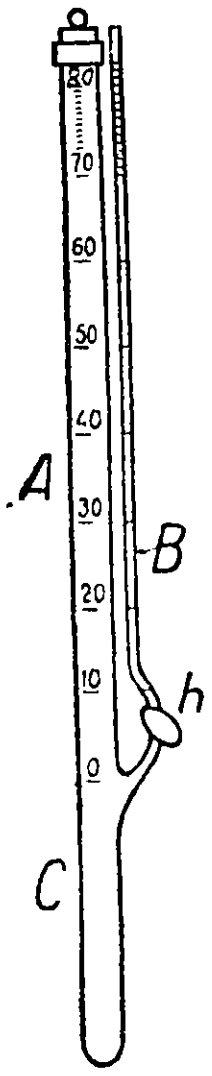


Рис. 87

Из способов, основанных на разности уровней разнородных жидкостей, заслуживает внимания сравнительно новый способ Вигнера, пригодный для анализа мельчайших грунтов, так как он дает возможность определить процентное содержание частиц любых поперечных размеров от 2 *мм* до 2 *μ*.

Аппарат Вигнера (рис. 87) состоит из двух трубок *A* и *B*, сообщающихся между собою при открывании крана *h*.

Испытуемый материал помещается при закрытом кране в трубку *A*, а в трубку *B* наливается дестиллированная вода. Затем содержимое прибора взбалтывается, и кран тотчас же после взбалтывания открывается. Уровень воды в трубке *B* устанавливается выше, чем в трубке *A* благодаря разнице удельных весов суспензии в трубке *A* и дестиллированной воды в трубке *B*.

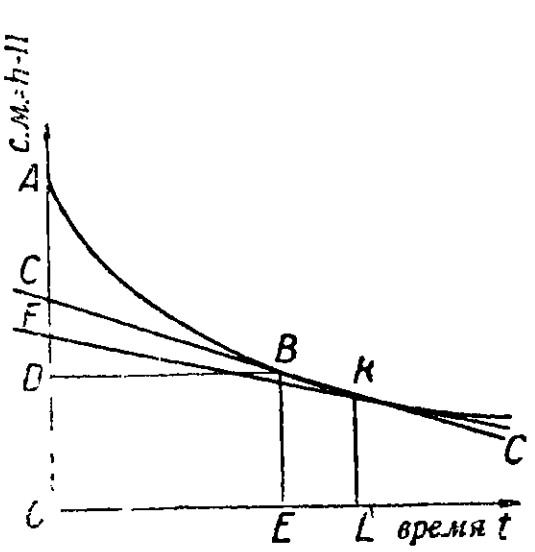


Рис. 88

---

[1] Описание способов мех нического анализа можно найти в следующих источниках:

1) Способ Сикорского — Н. Ушаков, Трепаж крепостных сооружений, СПБ. 1913.

2) Способы Вольфа, Кноппа, Шульце, Шёне — Щербаков, Физический и химический анализ почвы, стр. 300—350, СПБ 1882.

3) Способы Фаддеева — Вильямса — журн. „Почвоведение" № 1—2, 1903.

4) Способ Сабанина — Сабанин, Курс почвоведения. Москва 1909.

5) Способы Кюне, Копецкого, Аттерберга и целый ряд других—Зауербрей, Обзор современных германских работ и т. д., „Известия Мелиорационного института" № 13, 1925 г., и более поздние работы того же автора в „Известиях Института гидротехники", 1931—1932.

6) Способ Глушкова — Отчет гидрометрической части ОЗУ Туркестанского края, т. I, 1910 г.

7) Способ Свен-Одена и др. — Зильберминц и Кленов, О новых методах механического анализа. Москва 1926 г.

Затем уровень в трубке B начинает понижаться, так как при выпадении более крупных частиц ниже нулевой черты (на высоте крана) удельный вес суспензии уменьшается.

Замеряя промежутки времени от начала опыта и высоту воды в трубке B, можно построить кривую изменения разности уровней в трубках B и A (h—H) в зависимости от времени — t (рис. 88).

Определение механического состава по начерченной кривой делается при помощи вычислений и графическим путем на основании следующих положений:

1) $$h - H = B \cdot M, \qquad (I)$$

где:

$B = k$ k_1 — постоянная, вычисляемая по формуле Стокса;

M — масса неосевшей части суспензии;

h — уровень дистиллированной воды в трубке B;

H — уровень суспензии в трубке A.

Уравнение (I) выводится из закона сообщающихся сосудов:

$\frac{h}{H} = \frac{S}{s}$ и формулы для определения удельного веса суспензии:

$S - s = k M$, где k — постоянная; S — удельный вес суспензии; s — удельный вес дистиллированной воды. Тогда:

$$h - H = \frac{H}{s}(S - s).$$

При надлежащем выборе H величина $\frac{H}{s} = \text{const} = k_1$.

2) $$t = \frac{C^2 H}{r_1^2}, \qquad (II)$$

где:

r_1 — радиус поперечного сечения частицы, наименьшей в данной фракции, полностью перешедшей из трубки A в отстойник C (ниже черты O);

t — промежуток времени от начал опыта до конца осаждения данной фракции.

Уравнение (II) выведено из формулы Стокса:

$$v = \frac{2}{9} \frac{s_1 - s_2}{\eta} g r^2,$$

или сокращенно: $$v = kr^2,$$

откуда

$$r = \sqrt{\frac{v}{k}}.$$

В этих уравнениях: v — скорость падения частицы; g — ускорение силы тяжести; s_1 — удельный вес частицы; s_2 — удельный вес жидкости; η — коэфициент внутреннего трения жидкости; r — радиус падающей частицы.

Обозначив $\frac{1}{\sqrt{k}}$ через C, получим: $r = C\sqrt{v}$.

Так как $v = \frac{H}{t}$, то $r = C\sqrt{\frac{H}{t}}$, или: $t = \frac{C^2 H}{r^2}$, причем:

$$C = \frac{1}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{9\eta}{2g(s_1 - s_2)}}.$$

Для воды $\eta = 0{,}01$; $s_2 = 1$; $g = 981$.

Для разделения отрезка ординаты (рис. 88), соответствующего полной массе выпавших частиц (OA), на две части, из коих одна часть соответствует массе одной крупности и другая — другой, применяется графический прием, состоящий в следующем.

На основании всех приведенных положений по кривой $h - H$ при абсциссе t определяется процентное содержание любой фракции.

Пусть $AO = 100\%$ и требуется найти процентное содержание части с радиусами в пределах от r_1 до r_2.

По уравнению (II) вычисляются t_1 и t_2 (например $t_1 = OE$ и $t_2 = OL$).

Проводятся ординаты, которые пересекают кривую в точках R и K. Через последние проводятся касательные к кривой: BC и KF. Отрезок CF, заключенный между касательными, дает процентное содержание общей массы фракции: d_1—d_2.

Метод Вигнера требует лабораторной обстановки и затраты значительного времени.

Ареометрический способ Протолонго основан также на изменении удельного веса суспензии по мере осаждения взвешенных частиц испытываемого грунта. Он заключается в том, что в цилиндр, в котором происходит осаждение, опускается денсиметр с делениями, соответствующими удельным весам от 1,0 до 1,10 (с точностью до четвертого знака); по мере постепенного выпадения частиц определяется удельный вес суспензии и замечается время. Откладывая затем по оси абсцисс отрезки времени, а по оси ординат — соответствующие удельные веса, получают кривую, по которой, пользуясь специальными математическими формулами, можно определить механический состав анализируемого грунта.

Способ Протолонго наиболее пригоден для мельчайших грунтов и почв.

То же можно сказать относительно методов, основанных на разделении частиц центрофугированием и током воздуха.

3. Полевое сравнительное определение механического состава грунтов

Чем более точные результаты дает тот или иной метод механического анализа, тем сложнее, как правило, приборы и тем больше времени требуется на производство каждого анализа.

При бурении число проб нередко измеряется сотнями и тысячами, и все их анализировать точными способами было бы невозможно.

Кроме того надо иметь в виду, что анализы прежде всего нужны в процессе самой разведки для активного руководства бурением, невозможного без составления предварительных, постепенно уточняемых разрезов. Быстрота сравнительной оценки добываемых проб необходима. Для достижения ее приходится пользоваться полевым сравнительным определением механического состава проб. Ниже описывается один из таких полевых способов, применявшийся под руководством автора при буровых изысканиях для постройки канализации в Ленинграде.

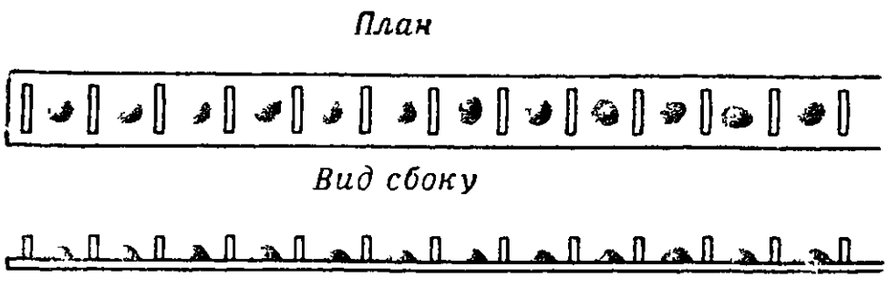


Рис. 89

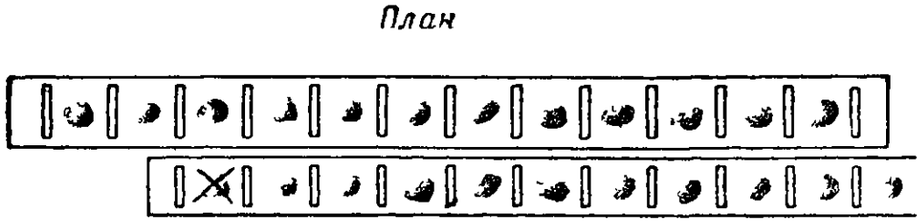


Рис. 90

Пробы первых скважин определяются грубо (по виду и на ощупь) и заносятся на черновой геологический разрез; вслед за этим явно отличающиеся друг от друга пробы отправляются в лабораторию для определения их механического состава одним из точных способов.

Проанализированные пробы располагают затем на дощечке с ячейками в определенном порядке по какому-либо признаку: по содержанию физической глины — для супесей и суглинков и по преобладающей фракции — для песков и гравия (рис. 89).

Таким образом постепенно получается местная шкала. Впрочем шкалу можно составить предварительно и не из местных грунтов, но лучше, как только накопится достаточное количество проанализированных проб, заменить ее местной шкалой. Понятно, что шкала может дополняться новыми ячейками, если только будут появляться новые типичные пробы.

Извлеченные из скважин пробы раскладываются в том порядке, в каком они встречены в скважине, на таких же дощечках (каждая для отдельной скважины).

Положив дощечку с изучаемыми пробами рядом со шкалой, производят сравнительную оценку всех проб, начиная с первой, передвигая ее вдоль шкалы до тех пор, пока по цвету, крупности (на-глаз, под лупой и на ощупь) и по другим признакам не найдут сходную с ней ячейку шкалы (рис. 90, исследуемая проба отмечена ×).

Затем исследуемая проба наносится на разрез скважины и обозначается на последнем тем номером шкалы, с которым она оказалась сходной по механическому составу.

Так же поступают со следующей пробой и т. д. Нанеся таким образом на разрез пробы одной скважины, проделывают то же с пробами другой, третьей и т. д. скважин.

Если абсолютные отметки известны, т. е. если устья скважин пронивелированы (что следует делать или до начала бурения данной скважины, или же сразу после ее окончания), то полезно наносить скважины сразу на общий лист будущего геологического разреза исследуемой местности.

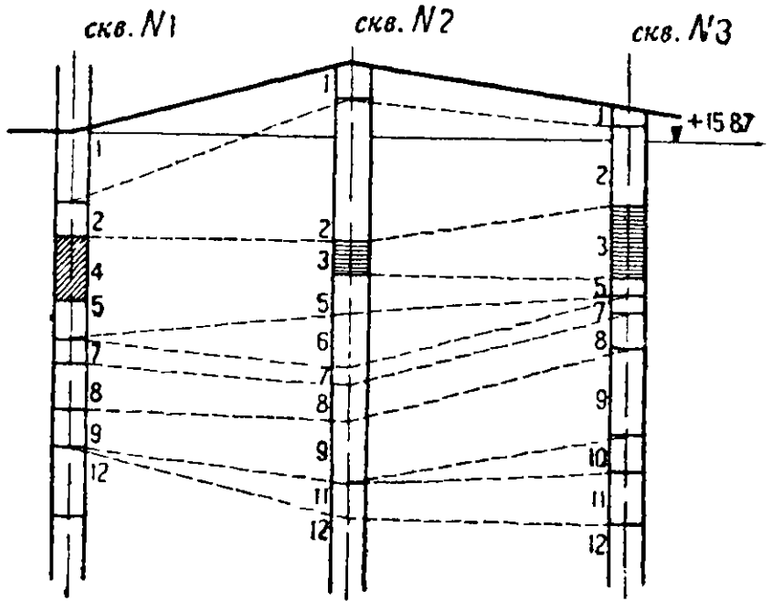


Рис. 91

Изучаемые пробы должны быть в момент определения в том же состоянии, как и пробы шкалы, т. е. в воздушно-сухом и размельченном. Если надо сравнить пробы также во влажном и неразмельченном состоянии (что иногда бывает важно), то в такое же состояние надо привести и запасную порцию соответствующей пробы шкалы.

По нанесении проб на общий разрез для нескольких скважин (рис. 91) соединяют между собой одинаковые слои. Если, как показано на рис. 91, слой *4* встречается только в скважине № 1, а в других не обнаружен, слой *3* обнаружен в скважинах № 2 и № 3, а в скважине № 1 отсутствует, то разрез не представляется возможным закончить без выяснения взаимного расположения слоев *3* и *4* в промежутке между скважинами № 1 и № 2.

Для выяснения этого вопроса придется или заложить дополнительную скважину между скважинами № 1 и № 2, или же на основании более или менее ясного представления о генезисе данных отложений решить вопрос теоретически.

При соединении разрезов отдельных скважин в один общий разрез надо все время иметь перед собою журнал бурения, так как кроме чисто механического определения проб бывают очень важны те свойства грунтов, которые были замечены при извлечении их из скважины (цвет, консистенция, включения инородных примесей, род напарья, которым взята проба, поведение при этом воды, насколько легко проникали в данный грунт бур и обсадная труба и целый ряд других обстоятельств).

Записи бурового мастера или старшего рабочего могут принести большую пользу при составлении разреза.

Дополняя постепенно геологический разрез необходимыми новыми скважинами, надо всегда стремиться к пониманию геологического строения

местности. Для этой цели попутно с составлением разрезов иногда полезно составлять гипсометрическую карту по какому-нибудь руководящему слою, например по поверхности нижнего водоупора.

Вышеописанный способ сравнительного анализа, примененный при буровых изысканиях для проектирования и постройки ленинградской канализации, дал вполне благоприятные результаты, причем выяснились следующие его преимущества:

1) большая скорость определений: один человек в рабочий день может определить более 100 проб;

2) исключительная простота оборудования;

3) достаточная точность, неоднократно проверенная точным механическим анализом;

4) простота пользования, не требующая от работника специальной подготовки;

5) нечувствительность к обстановке: требуется только защита от дождя и ветра; для ускорения подсушивания проб можно пользоваться песчаной баней или сушильным шкафом.

4. Геогидрологические разрезы и карты

Окончательными документами буровых изысканий для понижения грунтовых вод являются геогидрологические разрезы и геогидрологическая карта (для большой территории).

После уточнения и исправления первоначальных геологических разрезов остается нанести на них линии равных высот уровня встреченных водоносных горизонтов (гидроизогипсы) и иллюминировать условными знаками, особо оттенив водоносные и водоупорные слои.

С этим важным добавлением гидрологического характера геологические разрезы превращаются в сводные геогидрологические разрезы, которые и служат основным материалом как для проектирования установки понижения грунтовых вод, так и для разработки всего вообще способа строительных работ.

К геогидрологическому разрезу должна быть приложена пояснительная записка, включающая описание грунтов и встреченных в них вод.

Водоносные слои должны быть охарактеризованы в отношении обилия воды и скорости подъема уровня ее в обсадных трубах. Если имеются потоки грунтовых вод, то на карте следует показать направление этих потоков, а в пояснительной записке — скорость течения воды, уклон водоупорной постели и уровня грунтовой воды.

При изысканиях необходимо произвести несколько химических анализов воды, грунтов и газов (если таковые выделяются из воды), чтобы иметь представление о тех явлениях, которые могут вызвать затруднения и потребовать особых мер предохранения элементов установки понижения от вредных химических и физических влияний.

Результаты этих анализов также должны быть помещены в пояснительной записке.

§ 2. ОБСЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Местные особенности, которые могут оказать очень важное влияние на производство понижения уровня грунтовых вод, могут быть самые разнообразные.

К числу главнейших местных особенностей относится наличие вблизи строительного участка открытых водоемов, которые, как было указано выше, имеют иногда решающее значение в смысле расположения колодцев и числа их. Немаловажной особенностью является также соседство возвышенностей, с которых во время ливней может поступать большое количество воды.

Серьезной местной особенностью могут быть колодцы, служащие для добывания воды окрестным населением или предприятиями, так как понижение уровня грунтовых вод в районе установки может при известных условиях быть причиной исчезновения воды в колодцах. Игнорирование этого вопроса может повести к очень неприятным последствиям.

Очень серьезной особенностью являются расположенные вблизи строительного участка крупные сооружения и здания. Как бы ни был уверен строитель, что выноса грунта при избранной конструкции колодцев быть не может, он все же должен до приступа к работам обследовать возможно тщательно эти сооружения и официально, совместно с представителями заинтересованных учреждений, зафиксировать их состояние. Если сооружение имеет следы повреждений из-за подвижек грунта и неравномерной осадки, то придется принять меры для предупреждения дальнейших повре-

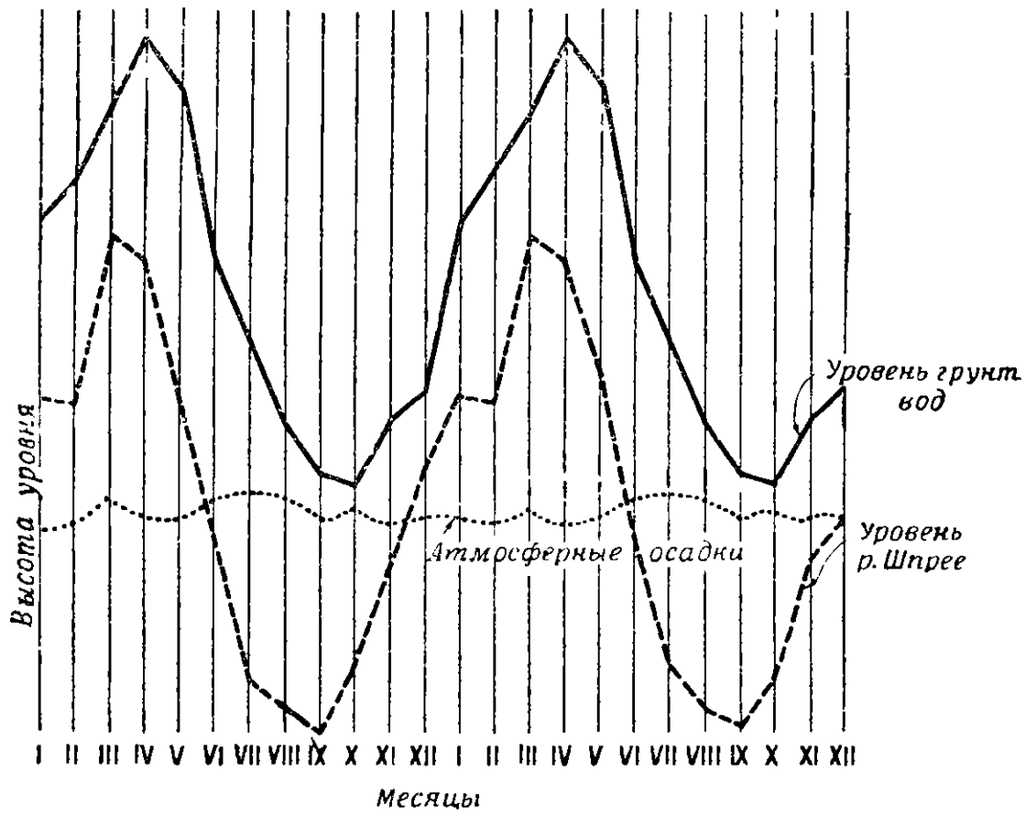


Рис. 92

ждений. Надо помнить, что всякие повреждения могут приписываться влиянию искусственного понижения грунтовых вод, как это показала практика понижения в Германии, несмотря на то, что в большинстве случаев это не соответствовало действительности.

Немалую роль играет часто вопрос о том, куда выпускать откачиваемую воду. Обследование ближайших естественных или искусственных приемников воды с целью выяснения их пропускной способности и условий, на которых возможен выпуск в них откачиваемой воды, должно быть произведено заранее, и полученные данные должны быть учтены при проектировании установки понижения и при подготовке к работам.

Перечисленными важными для понижения особенностями не исчерпываются, понятно, все возможные местные условия. Может оказаться ряд других специфических условий, а поэтому перед проектированием необходимо возможно полнее учесть все эти местные условия, чтобы тем самым устранить или ослабить неизбежные неожиданности и затруднения.

При обследовании местных открытых водоемов или протоков прежде всего надо обратить внимание на состояние дна и строение берегов, т. е. выяснить, насколько заилено ложе водоема и возможна ли фильтрация

воды из водоема в грунт при понижении уровня воды в нем, а также насколько проницаем грунт под дном реки и вблизи берегов, так как вода, просочившаяся через проницаемый покров дна, может проникать и дальше в сторону установки понижения.

Насколько серьезное значение имеет заиление ложа водоема, показывает следующий пример.

При сооружении шлюзов при Плётцензее (близ Берлина) в 1909 г. благодаря искусственному понижению уровня грунтовых вод многие колодцы в Шарлоттенбурге иссякли, в то время как из близлежащего канала вода совершенно не просачивалась к постройке.

Что касается влияния строения грунта на распространение в нем воды, проникающей через неплотную корочку дна водоема или при отсутствии этой корочки, показывают лучше всего графики колебания естественного уровня грунтовых вод в связи с колебанием уровня воды в водоеме.

На рис. 92 представлены графики колебаний уровня р. Шпре и грунтовой воды в наблюдательном колодце, измерявшихся систематически ежемесячно в течение двух лет. Графики показывают, что колебания грунтовой и речной воды очень хорошо согласуются как по ритму, так и по амплитуде, причем колебания уровня грунтовых вод опережаются на один месяц колебаниями уровня воды в реке.

Кейльгак объясняет чрезвычайную согласованность в амплитудах приведенных графиков своеобразным геологическим строением Берлина, а именно равномерностью песчаного грунта, как прекрасно отсортированных аллювиальных отложений мощного древнего потока равнинного характера.

Вполне оценить практическое влияние близости открытых водоемов на понижение уровня грунтовых вод и особенно влияние илистого покрова ложа можно только при помощи специальных опытов.

Как бы ни были хорошо исполнены расчеты и вообще проект установки понижения, недостаточный учет местных разнообразных условий может быть причиной очень неприятных неожиданностей. Поэтому на изучение местных особенностей при проектировании крупных установок понижения надо обращать очень серьезное внимание.

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА k

Методы определения величины k можно разделить на три основных группы:

а) методы вычисления по теоретическим и эмпирическим формулам;

б) методы лабораторного определения посредством фильтрования воды через испытуемый грунт и последующих вычислений;

в) методы вычисления по результатам измерений при пробных откачках воды из каптажных опытных устройств, т. е. в условиях естественного положения и состояния испытуемого грунта.

Для того чтобы оценить с точки зрения понижения грунтовых вод все три группы методов определения k, необходимо вкратце остановиться на них.

1. Определение k по формулам

Подробные сведения о всех формулах для определения k с подробным их разбором можно найти в специальных трудах по этому вопросу, а также вообще по теории движения грунтовых вод.

Большинство формул выражают k через величину диаметра зерен песка. К таковым относятся:

1) Формула Хагена (1869 г.):

$$k = 0{,}0036\ d_m^2,$$

где:

$d_m = \frac{\sum \Delta g_i d_i}{\sum \Delta g_i}$ — диаметр воображаемого зерна среднего веса;

Δg_i — доля веса фракции с диаметрами зерен в пределах $d_i' - d_i''$;

$d_i = \frac{d_i' + d_i''}{2}$ — средний диаметр зерен данной фракции.

В этой формуле и в последующих составляющие величины имеют следующие измерения:

d — в *мм*; k — в *м/сек*;

d_m в *мм* — диаметр зерна среднего веса, определяемый согласно вышеуказанному.

2) Формула Хавреца (1874 г.):

$$k = 0{,}009\ d_m^2 + 0{,}0128\ d_m^2.$$

3) Формула Зельгейма (1880 г.):

$$k = 0{,}00297\ d_m^2 \tau,$$

где

$$\tau = 1 + 0{,}0136T + 0{,}000704T^2,$$

T — температура воды в градусах Цельсия, как и в дальнейших формулах.

4) Формула Люгера (1890 г.):

$$k = 0{,}001\ d_m.$$

5) Формула Хазена (1892 г.):

$$k = Cd_e^2\tau,$$

где $C = 0{,}0115 - 0{,}008$ $(C_{ср} = 0{,}01)$ для чистых однородных песков и $C = 0{,}008 - 0{,}00575$ для загрязненных неоднородных песков;

d_e — эффективный диаметр, т. е. наибольший диаметр зерен самой мелкозернистой части, составляющей 10% от всей пробы грунта по весу;

$$\tau = 0{,}7 + 0{,}03\ T.$$

При $T = 10°$ С для чистого однородного песка формула Хазена может быть написана так:

$$k = 0{,}01\ d_e^2.$$

По указанию Хазена его формула применима для песков, имеющих $d_e = 0{,}1 - 3{,}0$ *мм*, при „коэфициенте неоднородности" — $\frac{d_0}{d_e} \leqslant 5$, причем d_0 — диаметр наибольшего зерна части, составляющей 60% всей пробы грунта по весу.

6) Формула Слихтера (1897 — 1898 гг.):

$$k = 0{,}0575\ d_m^2 \frac{1}{K_m} \cdot \tau,$$

где $\tau = 1 + 0{,}0337\ T$;

K_m — коэфициент, зависящий от пористости и определяемый по табл. 26.

Все перечисленные выше старые формулы имеют существенные недостатки, которые не позволяют ими пользоваться даже для приближенных вычислений коэфициента водопроницаемости k, так как дают слишком большие расхождения с практикой.

Таблица 26

Пористость в %	$\frac{1}{K_m}$	Пористость в %	$\frac{1}{K_m}$	Пористость в %	$\frac{1}{K_m}$	Пористость в %	$\frac{1}{K_m}$
26	0,00870	31	0,02122	37	0,03808	43	0,06267
27	0,01350	33	0,02601	39	0,04524	45	0,07295
29	0,01694	35	0,03163	41	0,05939	47	0,08456

Современные исследователи видят причину этой ненадежности старых формул в том, что в них не учтены многие существенные факторы. Поэтому в более новые формулы для k вводятся те или иные новые величины. главным образом величина суммарной поверхности частиц грунта, связанной с пористостью последнего, а также вязкость воды, связанная с ее температурой.

С целью более яркого отличия новых формул от старых в дальнейшем вводится величина M с обозначением автора (например $M_{Kr} = M$ по Крюгеру и т. д.).

7) Формула Крюгера-Цункера (1918 г.):

$$k = 0{,}00463\, M_{Kr}\, \tau d^2_{Zun},$$

где: $M_{Kr} = \frac{p^3}{(1-p)^2}$; p — пористость;

d_{Zun} — эффективный диаметр зерна по Цункеру, определяемый из уравнения:

$$\frac{1}{d_{Zun}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i},$$

причем Δg_i — доля веса фракции с диаметрами зерен $d_i' - d_i''$;

$$d_i = \frac{d_i' + d_i''}{2};$$

i — номер фракции; n — число фракций;

$\tau = \frac{\eta_{18}}{\eta_t}$ — коэфициент вязкости, причем η_{18} и η_t — вязкость воды соответственно при 18° С и t° С.

Величина τ определяется из табл. 27.

Таблица 27

$t°$	0	1	2	3	4	5
τ	0,588	0,612	0,635	0,656	0,676	0,698
$t°$	6	7	8	9	10	11
τ	0,721	0,744	0,766	0,768	0,807	0,837
$t°$	12	13	14	15	16	17
τ	0,854	0,878	0,902	0,926	0,950	0,975
$t°$	18	19	20	21	22	23
τ	1,00	1,025	1,052	1,080	1,107	1,131
$t°$	24	25	30	40	50	60
τ	1,155	1,180	1,313	1,620	1,926	2,231

8) Формулы Терцаги (1925 г.):

a) $k = 0{,}133\ M_T\, d_e^2\, \frac{\eta_0}{\eta_t}$ для морского и дюнного окатанного песка;

b) $k = 0{,}767\ M_T\, d_e^2\, \frac{\eta_0}{\eta_t}$ для угловатого песка.

В этих формулах обозначают:

$$M_T = \left(\frac{p - 0{,}13}{\sqrt[3]{1-p}}\right)^2;$$ p — пористость; d_e — эффективный диаметр по Хазену.

Значения $\frac{\eta_0}{\eta_t}$ определяются из таблицы 28.

Таблица 28.

$t°$C	0	1	2	3	4	5	6
$\frac{\eta_0}{\eta_t}$	1	1,04	1,08	1,12	1,165	1,195	1,225
$t°$	7	8	9	10	11	12	12,5
$\frac{\eta_0}{\eta_t}$	1,270	1,300	1,340	1,380	1,412	1,460	1,475
$t°$	13	14	15	16	17	18	19
$\frac{\eta_0}{\eta_t}$	1,495	1,545	1,580	1,620	1,665	1,705	1,750
$t°$	20	21	22	23	24	25	28
$\frac{\eta_0}{\eta_t}$	1,79	1,84	1,90	1,93	1,965	2,015	2,150
$t°$	30	40	50	60			
$\frac{\eta_0}{\eta_t}$	2,24	2,76	3,285	3,800			

9) Формула Козени (1927 г.):

$$k = 0{,}0794\ M_{Koz}\, \tau\, d_k^2,$$

где:

$$M_{Koz} = \frac{p^3}{(1-p)^2};$$

τ определяется по табл. 27 для формулы Крюгера-Цункера; d_k — эффективный диаметр по Козени:

$$\frac{1}{d_k} = \sum_1^{n-1} \frac{\Delta g_i}{d_i} + \frac{3}{2}\frac{\Delta g_n}{d_n},$$

где: n — число фракций; i — номер фракции, причем фракция $i = 1$ — самая крупная фракция; $i = n$ — самая мелкозернистая;

$$\frac{1}{d_i} = \left(\frac{1}{d_i'} + \frac{1}{d_i''}\right) : 2,$$

где d_i' и d_i'' — крайние пределы диаметров зерен данной фракции.

10) Формула Шенвельдера (1928 г.):

a) $k_{10} = 0{,}0105\ M_{Sch}\, d_{Zun}^2,$

если поры грунта не содержат воздуха и заполнены водою до отказа.

$$M_{Sch} = \left(\frac{p}{1-p}\right)^2;$$

d_{Zun} — по Цункеру (см. выше), k_{10} — коэфициент водопроницаемости при 10 °С.

б) $k_{10} = 0{,}0053\, M_{Sch}\, d_{Zun}^2$,

если поры грунта содержат воду и воздух.

11) Формула Зауербрея (1932 г.):

$$k = 0{,}035\, \frac{p^3}{(1-p)^2}\, \tau d_{17}^2,$$

где:

p — пористость грунта;

τ — по табл. 27, как для формулы Крюгера-Цункера;

d_{17} — эффективный диаметр зерна, т. е. наибольший диаметр самой мелкозернистой части, составляющей 17% всей пробы по весу.

Если мы возьмем механические составы двух различных песчаных грунтов № 1 и № 2 (табл. 29 и 30), вычислим значение коэфициента водопроницаемости k по всем вышеприведенным формулам при температуре $t = 10°$ С и $p = 0{,}3$ и отложим по оси абсцисс в хронологическом порядке даты опубликования формул различных авторов, а по оси абсцисс — значения k, то получим график (рис. 93).

Таблица 29

Анализ грунта № 1

Фракция $d_i' - d_i''$ в *мм*	0—0,01	0,01—0,05	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,5	0,5—1	1—2
Доля веса фракции: $100\,\Delta_{g_i}$ в %	0,2	0,1	0,2	3,2	56,8	27,5	12

$d_m = 0{,}59$ *мм*; $d_e = 0{,}23$ *мм*; $d_{Zun} = 0{,}33$ *мм*, $d_k = 0{,}33$ *мм*; $d_{17} = 0{,}28$ *мм*.

Таблица 30

Анализ грунта № 2

Фракция $d_i' - d_i''$ в *мм*	0—0,01	0,01—0,05	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,5	0,5—1,0	1—2
Доля веса фракции: $100\,\Delta_{g_i}$ в %	0,2	0,8	1,0	3,0	25	30	40

$d_m = 0{,}92$ *мм*; $d_e = 0{,}316$ *мм*; $d_{Zun} = 0{,}42$ *мм*; $d_k = 0{,}36$ *мм*; $d_{17} = 0{,}40$ *мм*.

Из этого графика можно усмотреть нижеследующее:

1. За исключением самой старой формулы Хагена (1869 г.) все более поздние формулы дают неуклонно уменьшающиеся значения k. Наименьшее значение k дает самая новая формула (1932 г.).

2. Все новые формулы, учитывающие суммарную поверхность зерен

песка и вязкость воды, резко отличаются от старых формул в меньшую сторону.

Если принять во внимание, что каждый из авторов, предлагавших свою формулу, приводил доказательства совпадения его формулы с результатами опытов, то возникает невольно вопрос, до какого же численного значения может дойти величина k, если все новые и новые формулы, начиная с 1932 г., будут подтверждать ту же тенденцию к понижению, какую обнаруживали на протяжении 60 лет уже известные формулы?

Не имея уверенности в том, что эта тенденция не приведет к исчезающе малым значениям k, трудно верить уже полученным теоретическим полуэмпирическим и эмпирическим формулам.

Мы видим, что доверие к вышеприведенным формулам не может быть большим даже по отношению к чистым пескам с резким преобладанием сравнительно крупных фракций. Тем менее можно полагаться на эти формулы в отношении песков, содержащих более значительную долю мелкопесчаных и пылевых фракций. Еще менее остается уверенности в надежности вышеуказанных формул, в том числе и самых новых, если представить себе всю совокупность различных влияний на степень водопроницаемости: условий залегания, строения, состава и формы частичек естественного грунта, образовавшегося под влиянием всей совокупности внешних агентов.

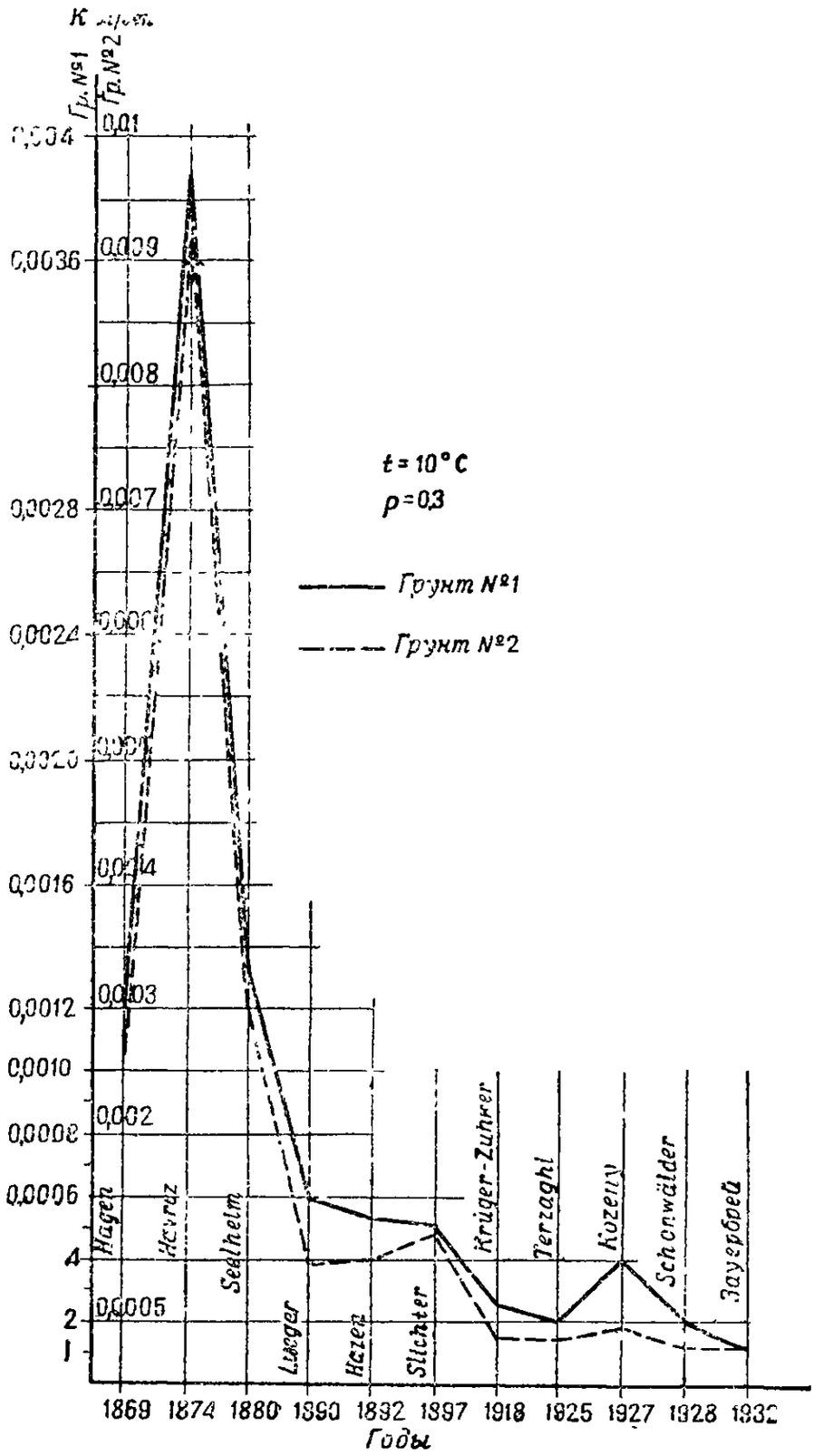


Рис. 93

Действительно, получающиеся значения k по откачкам воды из колодца почти всегда значительно отличаются от значений k, вычисленных по формулам как в большую, так и в меньшую сторону.

Поэтому как ни ценны стремления дать возможно более точные и исчерпывающие формулы для теоретического определения величины k, они

даже для чистых песков могут дать лишь весьма приближенное представление о порядке численного значения k и поэтому могут применяться только для весьма грубых приближенных подсчетов ориентировочного характера.

2. Лабораторное определение коэфициента водопроницаемости k

Большинство методов лабораторного определения k основано на законе Дарси и отличаются только устройством приборов. Самый простой прибор для лабораторного определения k состоит из стеклянной трубки диаметром 25—50 *мм* с делениями. Нижний конец трубки обвязывается мелкой сеткой, верхний остается открытым. В трубку насыпается до определенной высоты грунт и затем наливается вода до определенной черты (по мере просачивания вода подливается). Проникающая через песок вода поступает в сосуд, которым измеряется ее количество Q (рис. 94), профильтровавшееся в течение t секунд. Следовательно секундный расход равен $\frac{Q}{t}$. Разделив последнюю величину на величину площади поперечного сечения трубки ω, получают скорость фильтрации:

$$v = \frac{Q}{t\omega}.$$

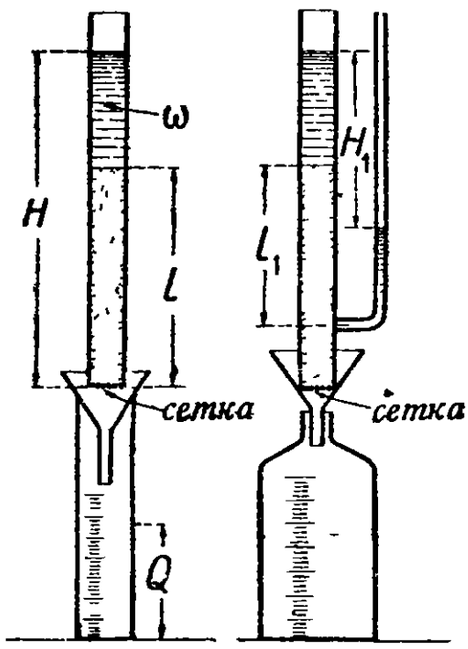


Рис. 94—95.

По закону Дарси $v = k\frac{H}{l}$ H и l известны. Величина k вычисляется по формуле:

$$k = \frac{v\,l}{H} = \frac{Ql}{t\omega H}.$$

Проделав определение k при различных значениях H, устанавливают среднее значение коэфициента водопроницаемости.

Недостатки этого прибора:

1. Непостоянство напора H, происходящее из-за неизбежного колебания уровня воды в трубке. Устранить этот недостаток можно было бы при помощи сливной трубки или водослива.

2. Сопротивление сетки не одинаково с сопротивлением испытываемого песка, из-за чего результат, отнесенный к последнему, не вполне верен. Этот недостаток может быть устранен установлением боковой трубки выше дна фильтра. Тогда вместо l надо взять l_1 (рис. 95) и вместо H — величину H_1.

Чтобы иметь возможность измерять k при различных высотах напора, необходимо снабдить прибор приемником воды с постоянным уровнем. Тогда высоту напора можно изменять путем подъема и опускания фильтрационной трубки.

Так как над поверхностью испытуемого материала неизбежно происходят волнения воды, то верхний слой промывается и постепенно изменяет свои фильтрационные свойства. Для устранения этого недостатка следует считать за высоту потери напора разность уровней в трубках H_2, а за толщину слоя грунта — величину l_2 (рис. 96).

В таком виде с бо́льшим или меньшим числом боковых трубок (пьезометров) прибор Дарси нашел широкое применение для лабораторного определения коэфициента проницаемости грунта.

Но и этот прибор обладает серьезным недостатком, заключающимся в том, что устья боковых трубок могут заполниться грунтом, который затем

проникает и в самые пьезометры. Так как этот грунт не одинаково забивает все трубки, то разность уровней в них часто оказывается неправильной. Чем мельче грунт и чем больше в нем илистых частиц, тем больше могут получиться ошибки.

Для ослабления этого недостатка иногда при входе в боковые трубки вставляют мелкие сетки.

Но сетки также могут служить причиной неправильных показаний пьезометров, так как сопротивление сетки увеличивается благодаря загрязнению ее илистыми частицами, причем сопротивления могут быть неодинаковы для разных пьезометров, а следовательно разность уровней в последних также будет неправильна.

Важное значение имеет предварительное удаление воздуха из испытуемого грунта. С этой целью полезно сначала наполнять сосуд водою снизу.

Самым серьезным недостатком определения k лабораторным путем является несоответствие грунта в приборе естественному его состоянию. Если для чистых и крупных песков это несоответствие еще не так значительно, то для мелких и загрязненных песков определенный таким образом коэфициент проницаемости не будет вполне соответствовать фильтрационной способности природного грунта.

Отчасти этот недостаток устраняется в методе проф. Н. Г. Каменского, который предлагает помещать в реконструированный им прибор Тима-Дарси массив грунта, взятый из шурфа или другой выемки особым стаканом. Хотя этот метод и приближает несколько явление фильтрации через грунт в лаборатории к фильтрации через грунт в естественных условиях, все же условия движения воды остаются различными. Прежде всего при понижении уровня грунтовых вод направление движения воды ближе к горизонтальному, тогда как в приборе Тима-Каменского это движение вертикальное, т. е. не вдоль слоев грунта, а приблизительно в перпендикулярном направлении. Но если даже взять массив из стенки шурфа в горизонтальном направлении, то и тогда условия движения естественных грунтовых вод будут иными, чем в лабораторном опыте с массивом. Разница будет заключаться в том, что в лабораторном опыте приходится иметь дело с цилиндриком грунта весьма ограниченной площади сечения, тогда как в естественных условиях имеет место толща грунта значительно большей глубины и ширины, а следовательно и отклонения действительных скоростей отдельных струй воды от средней скорости могут быть значительно больше, чем в лабораторных условиях. Поэтому скорость, отнесенная к единице гидравлического градиента, т. е. коэфициент водопроницаемости, в грунте будет, вообще говоря, отличаться от соответствующей величины в лаборатории.

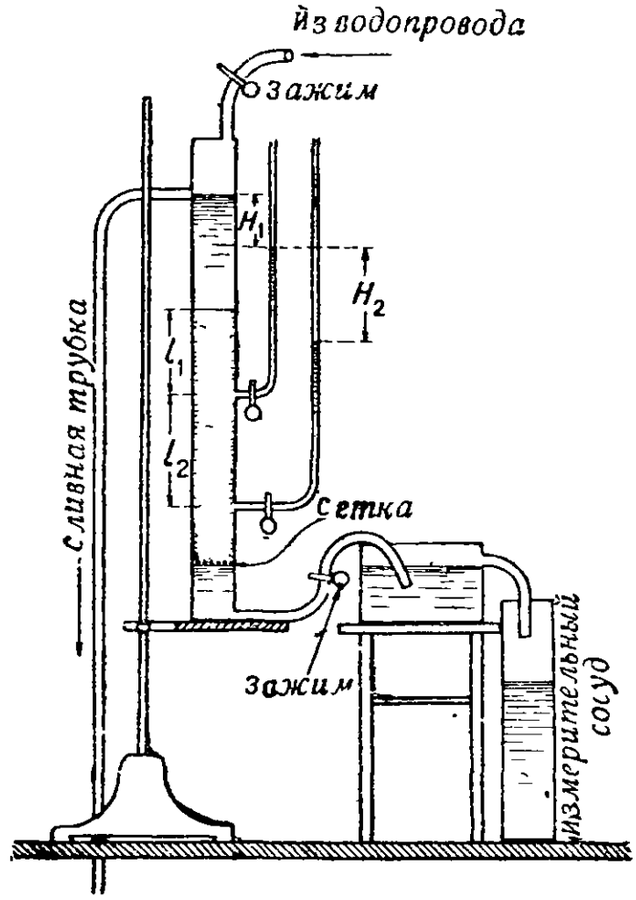


Рис. 96

Эти отклонения действительных скоростей от средней будут тем больше, чем большую роль играют относительно менее водопроницаемые прослойки и включения пылевых и глинистых частиц, разделяющие поток

на струи и создающие в одних точках поперечного сечения увеличенные скорости, в других — уменьшенные.

Поэтому лабораторным определением можно довольствоваться только для первых предварительных подсчетов, и при этом надо соблюдать тем большую осторожность, чем мельче природный грунт и чем более в нем содержится пылевых и глинистых частиц.

Когда речь идет о проектировании крупных установок понижения уровня грунтовых вод, более надежно определение k полевым способом.

3. Полевые способы определения k

К способам полевого определения коэфициента водопроницаемости грунта относятся:

a) способ «удельного дебита»;

b) способ Люммерта (Lummert);

c) «ε-способ» Тима.

a. Способ «удельного дебита» состоит в том, что в природном грунте устанавливается колодец, из которого откачивается в единицу времени определенное количество воды и в котором по достижении установившегося состояния измеряется понижение уровня воды, соответствующее измеренному дебиту. Частное от деления дебита на глубину понижения уровня воды в колодце называется «удельным дебитом». Величина удельного дебита дает сравнительную характеристику грунта в отношении водопроницаемости: чем больше удельный дебит, тем больше при всех прочих равных условиях водопроницаемость грунта, причем можно считать, что удельный дебит прямо пропорционален первой степени коэфициента водопроницаемости.

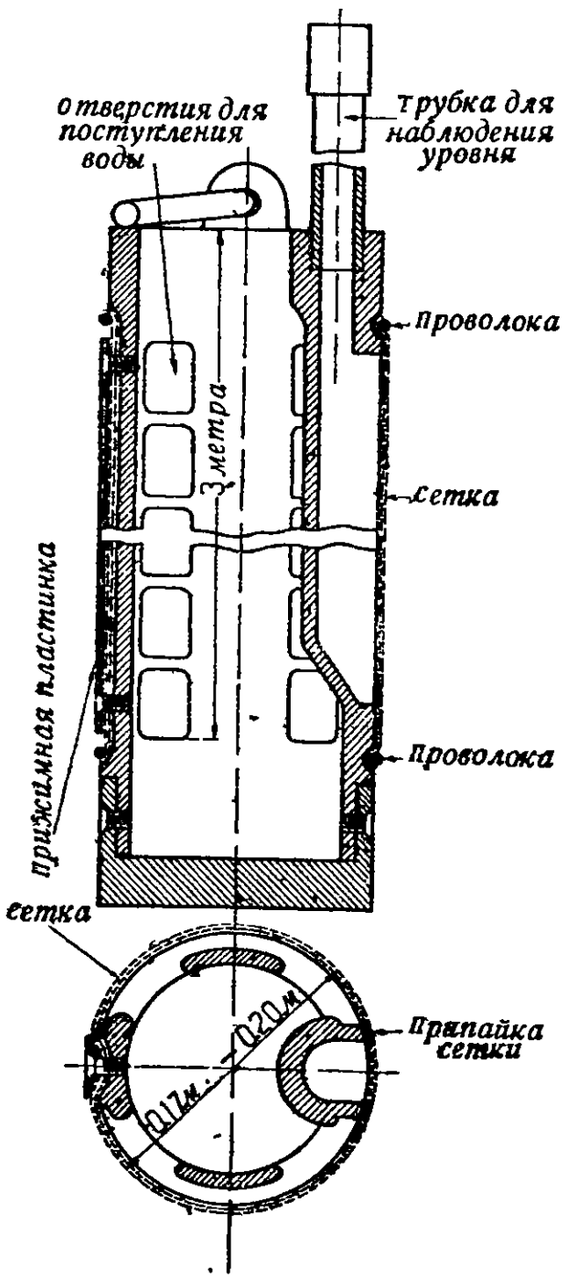


Рис. 97

Но для расчета установок понижения необходимо знать абсолютное значение величины k. Для того чтобы, зная заранее коэфициент водопроницаемости какого-либо грунта, удельный дебит которого равен определенной величине, можно было найти водопроницаемость k другого грунта по измеренному непосредственно удельному дебиту, следовало бы в обоих случаях иметь одинаковые конструкции, диаметр и высоту фильтрующей поверхности колодца.

Но и при этом условии определение величины k было бы не вполне правильным, так как на самом деле при ненапорных водах дебит не пропорционален глубине понижения уровня воды в колодце, если уровень понижается достаточно глубоко.

Даже и при напорных водах пропорциональность между дебитом и глубиною понижения воды в колодце существует только до известного пре-

дела. пока сопротивление колодца не сделается достаточно большим. Поэтому кроме вышеуказанных условий сравнимости требуется одинаковая глубина колодцев и одинаковое понижение уровня в обоих случаях, чтобы можно было определить коэфициент водопроницаемости.

Ясно без дальнейших объяснений, что выполнение этих требований в большинстве случаев на практике невозможно Кроме того нельзя добиться, чтобы в обоих случаях колодцы при равной их глубине были полные, т е. доходили до водонепроницаемой подошвы водоносного слоя.

Все эти соображения приводят к выводу, что способ удельного дебита нельзя признать удовлетворительным для определения коэфициента проницаемости грунта.

b. Способ Люммерта отличается от способа удельного дебита тем, что глубина понижения измеряется не внутри колодца, а непосредственно у наружной его поверхности, что возможно благодаря особому устройству фильтрационной коробки (рис. 97).

Так как длина фильтрующей поверхности коробки равна 3 *м*, то при производстве водоотлива из нее в большинстве случаев имеется случай неполного колодца Поэтому Люммерт вводит поправку на неполноту, пользуясь формулой Форхгеймера (А) [1].

В результате преобразований исходной формулы Дюпюи с указанной выше поправкой Люммерт пришел к следующей формуле для вычисления k:

$$\frac{k}{e_1} = \ln\left(\frac{R_1}{r_0}\right)\frac{1}{(2H-1)\pi \cdot 1000} \cdot \sqrt[4]{\frac{(H-1)^3}{8(H-2)}}, \qquad (68$$

где:

k — коэфициент водопроницаемости;

e_1 — дебит колодца Люммерта *л/сек* при понижении в нем уровня воды на 1 *м*, считая от поверхности непониженного уровня грунтовой воды,

r_0 — наружный радиус коробки, равный 0,085 *м*,

H — полная мощность водоносного слоя;

R_1 — радиус действия колодца при понижении естественного уровня грунтовой воды у наружной поверхности его на 1 *м*

Задаваясь различными значениями R_1 от 12,5 до 3200 *м* и H — от 3 до 40 *м*, Люммерт вычислил значения $\frac{k}{e_1}$ и составил табл 31, по которой при любом действительном H и при приближенно заданном или косвенно наблюденном R_1 определяется численное значение $\frac{k}{e}$.

Найдя из табл 31 величину $\frac{k}{e_1}$ и зная из непосредственного измерения величину e_1, вычисляют значение k

Но вычисление k по количеству откачиваемой воды при понижении уровня у наружной поверхности $s = 1$ *м* ненадежно. Нельзя считать природный грунт вполне однородным как в верхних, так и в нижних слоях. Следовательно величина k, определенная при понижении $s = 1$ *м*, может и не выражать водопроницаемости всей толщи грунта до интересующей нас глубины

Поэтому Люммерт разработал способ вычисления k по удельному дебиту при любой практически необходимой глубине понижения s, причем предложил два приема

---

[1] Гл III, § 2 п. 6.

Таблица 31

Значения $\frac{k}{e_1}$ для различных значений R_1 и H для ненапорной грунтовой воды

H \ R_1	12,5	25	50	100	200	400	800	1600
3	0,0003177	0,0003618	0,0004060	0,0004501	0,0004942	0,0005384	0,0005825	0,0006266
5	0,0002256	0,0002570	0,0002883	0,0003196	0,0003510	0,0003823	0,0004137	0,0004450
10	0,0001536	0,0001750	0,0001963	0,0002176	0,0002389	0,0002603	0,0002816	0,0003029
15	0,0001242	0,0001414	0,0001587	0,0001759	0,0001931	0,0002104	0,0002277	0,0002449
20	0,0001070	0,0001219	0,0001367	0,0001516	0,0001665	0,0001813	0,0001962	0,0002111
25	0,0000955	0,0001087	0,0001220	0,0001352	0,0001485	0,0001618	0,0001750	0,0001883
30	0,0000870	0,0000991	0,0001112	0,0001232	0,0001353	0,0001474	0,0001595	0,0001715
35	0,0000804	0,0000916	0,0001027	0,0001139	0,0001251	0,0001362	0,0001474	0,0001586
40	0,0000752	0,0000856	0,0000960	0,0001065	0,0001169	0,0001274	0,0001378	0,0001482

По первому приему сначала определяется $\frac{e_1}{e_s}$ по приближенной формуле:

$$\frac{e_1}{e_s} = A \frac{\ln \frac{R_s}{r_0}}{\ln \frac{R_1}{r_0} - \ln \frac{s}{A}}, \qquad (69)$$

где:

e_1 — имеет вышеуказанное значение;

e_s — удельный дебит при понижении уровня у колодца — s *м*.

R_s — радиус действия колодца при понижении уровня воды у наружной его поверхности — s *м*;

R_1 — радиус действия при понижении $s = 1$ *м*;

$$A = \frac{2H-1}{2H-s} \sqrt[4]{\frac{(H-2)(H-s)^3}{(H-s-1)(H-1)^3}}.$$

Для $\frac{e_1}{e_s}$, равно как и для A и $\lg \frac{s}{A}$, составлена табл. 32 при различных H, s и R_s.

Зная из табл. 32 отношение $\frac{e_1}{e_s}$ и определив $e_s = \frac{Q_s}{s}$, где Q_s и s — непосредственно измеренные дебит и соответствующее понижение, находят e_1. Принимая затем, что $R_1 : R_s = Q_1 : Q_s$ и $Q_1 = e_1$, определяют R_1 из уравнения:

$$R_1 = R_s \frac{Q_1}{Q_s}.$$

При найденном значении R_1 по табл. 31 находят $\frac{k}{e_1}$, а затем, зная величину e_1, определяют k.

Второй прием состоит в непосредственном определении k по формуле:

$$\frac{k}{e_s} = \ln \frac{R_s}{r_0} \cdot \frac{1}{(2H-s)\pi \cdot 1000} \sqrt[4]{\frac{(H-s)^3}{8(H-s-1)}}, \qquad (70)$$

где все обозначения имеют указанные прежде значения.

Таблица 32

Численные значения $\frac{e_1}{e_s}$, а также величины A и $\ln \frac{s}{A}$ для различных значений s, H и R_s

H	s		0,1	1	2	3	4	5
3	A		0,9538	1,0000				
	$\ln s/A$		−2,2553	0,0000				
	$R_s =$ 25	$\frac{e_1}{e_s} =$	0,6829	1,0000				
	50		0,7046	1,0000				
	100		0,7231	1,0000				
	200		0,7391	1,0000				
	400		0,7530	1,0000				
	800		0,7652	1,0000				
	1600		0,7760	1,0000				
4	A		0,9831	1,0000	1,0236			
	$\ln s/A$		−2,2855	0,0000	0,6698			
	$R_s =$ 25	$\frac{e_1}{e_s} =$	0,7012	1,0000	1,1603			
	50		0,7237	1,0000	1,1437			
	100		0,7429	1,0000	1,1307			
	200		0,7595	1,0000	1,1203			
	400		0,7739	1,0000	1,1117			
	800		0,7866	1,0000	1,1045			
	1600		0,7978	1,0000	1,0983			
7	A		0,9965	1,0000	0,9991	0,9942	0,9720	0,9475
	$\ln s/A$		−2,2991	0,0000	0,6941	1,1045	1,4147	1,6633
	$R_s =$ 25	$\frac{e_1}{e_s} =$	0,7095	1,0000	1,1380	1,2340	1,2941	1,3395
	50		0,7324	1,0000	1,1211	1,2025	1,2491	1,2818
	100		0,7520	1,0000	1,1079	1,1783	1,2151	1,2390
	200		0,7688	1,0000	1,0972	1,1591	1,1886	1,2059
	400		0,7835	1,0000	1,0884	1,1436	1,1673	1,1795
	800		0,7964	1,0000	1,0811	1,1307	1,1498	1,1580
	1600		0,8078	1,0000	1,0749	1,1199	1,1352	1,1402
10	A		0,9986	1,0000	0,9991	0,9947	0,9854	0,9693
	$\ln s/A$		−2,3012	0,0000	0,6941	1,1040	1,4011	1,6406
	$R_s =$ 25	$\frac{e_1}{e_s} =$	0,7108	1,0000	1,1380	1,2345	1,3078	1,3678
	50		0,7338	1,0000	1,1211	1,2030	1,2629	1,3050
	100		0,7534	1,0000	1,1079	1,1788	1,2289	1,2622
	200		0,7703	1,0000	1,0972	1,1596	1,2024	1,2290
	400		0,7850	1,0000	1,0884	1,1441	1,1811	1,2026
	800		0,7979	1,0000	1,0811	1,1312	1,1636	1,1811
	1600		0,8094	1,0000	1,0749	1,1204	1,1489	1,1632

Таблица 33

Значения $\frac{k}{e_s}$ для различных значений s, H и R_s (перед цифрами надо подставлять 0,000 например 0,00030305)

H	s	0,1	1	2	3	4	5	6
3	$R_s =$ 12,5	30 305	31 772					
	25	34 512	36 185					
	50	38 722	40 598					
	100	42 932	45 011					
	200 $\frac{k}{e_s} =$	47 140	49 423					
	400	51 349	53 836					
	800	55 558	58 248					
	1600	59 767	62 662					
	3200	63 976	67 074					
4	$R_s =$ 12,5	25 429	25 866	26 477				
	25	28 960	29 459	30 154				
	50	32 492	33 051	33 831				
	100	36 024	36 644	37 509				
	200 $\frac{k}{e_s} =$	39 555	40 236	41 186				
	400	43 087	43 829	44 863				
	800	46 619	47 421	48 540				
	1600	50 151	51 014	52 218				
	3200	53 682	54 606	55 895				
7	$R_s =$ 12,5	18 563	18 629	18 612	18 455	18 106	17 651	
	25	21 141	21 216	21 196	21 018	20 621	20 103	
	50	23 720	23 803	23 781	23 582	23 135	22 555	
	100	26 298	26 391	26 367	26 145	25 650	25 006	
	200 $\frac{k}{e_s} =$	28 876	28 978	28 951	28 708	28 165	27 458	
	400	31 454	31 565	31 536	31 272	30 680	29 909	
	800	34 032	34 152	34 121	33 835	33 194	32 361	
	1600	36 611	36 740	36 706	36 398	35 709	34 812	
	3200	39 189	39 327	39 291	38 961	38 224	37 264	
10	$R_s =$ 12,5	15 339	15 361	15 347	15 279	15 136	14 890	14 501
	25	17 469	15 361	15 347	15 279	15 238	14 890	14 501
	50	19 599	19 627	19 610	19 523	19 340	19 025	18 529
	100	21 730	21 751	21 741	21 645	21 442	21 094	20 543
	200 $\frac{k}{e_s} =$	23 860	23 894	23 872	23 767	23 544	23 161	22 557
	400	25 991	26 028	26 004	25 889	25 646	25 229	24 571
	800	28 121	28 161	28 135	28 011	27 748	27 297	26 584
	1600	30 251	30 294	30 267	30 133	29 851	29 365	28 599
	3200	32 381	32 428	32 398	32 255	31 953	31 433	30 612

Эта приближенная формула составлена на основании предположения, что зависимость между дебитом колодца и глубиной понижения при достаточно больших мощностях водоносного слоя и малых по сравнению с ними понижениях выражается линейным законом.

Люммерт и по этой формуле составил для разных значений s, R_s и H табл. 33. На частном примере Люммерт показал, что расхождение численного значения k, находимого по второму приему, с определенным по первому приему настолько мало, что допущение линейной зависимости между дебитом и понижением уровня воды у колодца практически приемлемо.

Величину s можно измерить более или менее точно, так как прибор Люммерта дает возможность измерять величину понижения непосредственно у наружной стенки колодца. Если допустить, что при небольших понижениях s линейная зависимость между Q и s существует, то наиболее трудным остается отыскание радиуса действия при том или ином понижении. Люммерт рекомендует определять R путем постепенного приближения к тем пунктам, где понижение уровня становится меньше измеримой величины. Если например в некотором расстоянии $R = 200$ *м* понижение уровня составляет 1—2 *мм*, а в расстоянии $R = 300$ *м* уже не замечается никакого понижения, то можно принять $R = 250$ *м*.

Этот способ определения R является весьма приближенным, а потому приближенно и вычисление величины k по вышеприведенным формулам.

Для устранения этого источника ошибок Люммерт предложил для вычисления k другие формулы, в которые R не входит, а именно:

1. Для полного колодца:

$$k = \frac{\ln \frac{Q_a}{Q_b}}{\pi \left[\frac{a(2H-a)}{Q_a} - \frac{b(2H-b)}{Q_b} \right]}, \qquad (71)$$

где Q_a и Q_b — дебиты колодца при соответствующих понижениях a и b у наружной поверхности колодца.

2. Для неполного колодца (в частности — коробки Люммерта):

$$k = \frac{\ln \frac{Q_a}{Q_b}}{\pi \left[\frac{a(2H-a)}{Q_a} \cdot \sqrt[4]{\frac{8(H-a-1)}{(H-a)^3}} - \frac{b(2H-b)}{Q_b} \sqrt[4]{\frac{8(H-a-1)}{(H-b)^3}} \right]}. \qquad (72)$$

Люммерт считает, что для неполного колодца можно пользоваться также уравнением (71), если только понижения a и b наблюдать в отдельной, удаленной от колодца, скважине, где влияние неполноты колодца сказывается менее, чем в непосредственной близости. Считая следовательно за H глубину дна колодца от поверхности непониженного уровня и измеряя понижения в наблюдательной скважине при различных дебитах, можно определить величину k.

Для получения различных Q_a и Q_b при различных глубинах понижения a и b требуется сначала достигнуть установившегося состояния при понижении a, а затем установившегося состояния при понижении b, т. е. требуются два установившихся состояния.

Для того чтобы можно было считать состояние движения грунтовой воды установившимся, нужно в течение довольно значительного периода времени производить откачку при неизменном уровне воды в колодцах прежде, чем наступит это равновесие.

с. «ε-способ» Тима основан на решении уравнения линии депрессии при измеренных высотах пониженного уровня в двух наблюдательных

скважинах, удаленных на различные расстояния от водозаборного колодца (рис. 98).

Пусть при некотором установившемся состоянии дебит колодца равен q *м*³/*сек*.

Подставив в уравнение (4) вместо y и y_1 измеренные высоты уровня y_2 и y_1, вместо x и x_1 — соответственно измеренные x_2 и x_1 (рис. 98), получим:

$$y_2^2 - y_1^2 = \frac{q}{\pi k}(\ln x_2 - \ln x_1),$$

откуда:

$$k = \frac{q(\ln x_2 - \ln x_1)}{\pi(y_2^2 - y_1^2)}. \qquad (73)$$

Принц, рассматривая достоинства и недостатки ε-способа и сравнивая его с способом Люммерта, указывает, что самый серьезный теоретический недостаток ε-способа заключается в том, что он основан на формуле, составленной в том предположении, что все струйки притекающей к колодцу грунтовой воды параллельны поверхности подстилающего водоупорного слоя, чего в действительности нет.

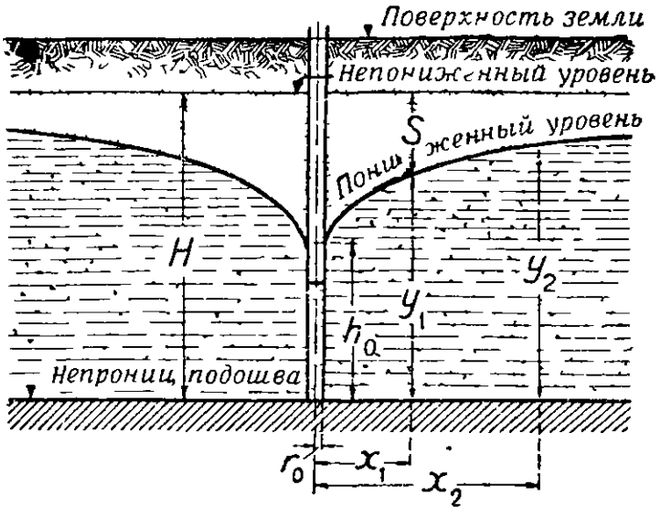


Рис. 98

С практической стороны против ε-способа Принц возражает потому, что при ограниченности времени для опыта трудно достигнуть достаточного приближения к установившемуся состоянию, от которого существенно зависит практическая точность результата.

Наконец Принц считает, что ε-способ может быть применен только в исключительных случаях равномерно зернистого неслоистого грунта.

Не возражая против справедливого указания Прица на теоретический недостаток ε-способа, следует однако заметить, что способ Люммерта страдает тем же недостатком, так как он основан также на законе Дюпюи, справедливом только при предположении, что все струйки параллельны поверхности водонепроницаемой подошвы водоносного слоя.

Возражение Принца против ε-способа с практической стороны, т. е. относительно трудности достижения установившегося состояния, в равной степени должно относиться к способу Люммерта, так как при последнем приходится также достигать установившегося состояния.

Впрочем Принц указывает, что ε-способ в руках опытного и осторожного гидролога является самым простым и надежным способом для получения удовлетворительного измерителя водопроницаемости грунта.

С замечанием Принца о применимости ε-способа в исключительных случаях равномерно зернистого неслоистого грунта нельзя не согласиться теоретически, но практически следует учесть нижеследующее.

Если грунт настолько неоднородный и слоистый, что для определения его водопроницаемости нельзя применить ε-способ, то нельзя применить для этой же цели и способ Люммерта и всякий другой. В природе в большинстве случаев встречается неравномерное строение и слоистое расположение частиц грунта, причем для каждого слоя существует своя особая степень водопроницаемости. Если водоносные слои не сильно отличаются друг от друга

по строению и составу и не разделены совершенно непроницаемыми прослойками, то тем или иным способом можно определить общий для всей толщи коэфициент водопроницаемости. Если же грунт состоит из отдельных водоносных этажей или горизонтов, то никакой способ не даст возможности определить общий коэфициент водопроницаемости, да в этом и нет ни надобности, ни смысла, так как такой коэфициент ничего не характеризует.

Переходя к сравнительной оценке способа Люммерта и ε-способа, следует заметить следующее:

а) формулы Люммерта, выведенные из уравнения Дюпюи, относятся к движению грунтовых вод непосредственно у наружной поверхности колодца, где закон Дарси-Дюпюи теряет силу, так как скорость движения грунтовой воды в этом месте значительно превышает критическую скорость и струйки воды не параллельны поверхности водоупорного слоя.

Формула (73) для ε-способа относится к движению грунтовой воды вдали от наружной поверхности колодца, где скорости не превышают критических для справедливости закона Дарси-Дюпюи значений и струйки воды значительно ближе к параллельности их водоупорной постели, чем у самого колодца.

б) Для вычисления k по формулам Люммерта необходимо знать более или менее точно значение радиуса влияния колодца R или же допускать совершенно произвольное и неправильное положение, что дебиты при различных понижениях относятся друг к другу, как радиусы влияния при тех же понижениях:

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{R_a}{R_b}.$$

ε-способ не требует ни нахождения R, ни введения вышеуказанного неправильного допущения.

в) Вычисление k по способу Люммерта при $s_1 = 1$ ненадежно для достаточно большого значения H — мощности водоносного слоя или глубины колодца. Вычисление же k при достаточно большой глубине понижения s требует достижения установившегося понижения по крайней мере два раза: при $s_1 = 1$ и при s более значительном; ε-способ требует только одного установившегося состояния при достаточно большом значении s в какой-либо точке. Это не только дает возможность в более короткий срок получить результат, но и обеспечивает более правильное определение k для всей исследуемой толщи грунтов.

г) Для вычисления k по формулам Люммерта необходимо знать более или менее точно мощность водоносного слоя H и вводить особую поправку на неполноту колодца. Для ε-способа достаточно знать глубину погружения центрального колодца ниже непониженного уровня, так как влияние неполноты колодцев по мере удаления от колодца уменьшается. Поэтому ε-способ Тима пригоден и тогда, когда мощность водоносного слоя точно неизвестна (например поверхность водоупора неровная, волнистая, размытая и при этом она находится настолько глубоко, что для определения ее нужно было бы произвести излишне глубокое бурение.

Таким образом определение коэфициента водопроницаемости более или менее однородного грунта по ε-способу и теоретически более обосновано и практически более надежно и просто, чем по способу Люммерта.

Положение становится гораздо более сложным, если грунт нельзя принять практически однородным, — например в тех случаях, когда он будет состоять из близких к горизонтальным слоев различной водопроницаемости. В таких случаях или придется определять k отдельно для каждого слоя и затем находить эквивалентный коэфициент водопроницаемости (гл. III,

§ 9), если слои не резко различаются по водопроницаемости, или же все расчеты понижения уровня грунтовых вод вести отдельно для каждого слоя, что сопряжено со значительными осложнениями и неточностями.

Если грунт состоит не из горизонтальных слоев, а наклонных и неодинаковой для каждого слоя мощности в различных пунктах поля понижения, то дело еще более осложняется. В этих случаях двух наблюдательных скважин для ε-способа окажется совершенно недостаточно, а придется установить их несколько по различным радиальным лучам и вычислять k для каждой пары наблюдательных скважин, причем таких пар будет столько, сколько комбинаций можно составить по две скважины из всех за исключением тех, на месте которых геологические условия резко отличаются от остальных.

Такое комбинирование нельзя производить механически без отчетливого представления о сущности явления, а потому от исследователя требуется большая опытность и внимательность. Нередко придется скважины разделять по геологическим и гидрогеологическим признакам на группы (например по двум или большему числу лучей или по иному признаку) и для этих групп комбинировать скважины по две для определения k.

Когда будут получены различные значения k для различных пар, определяют k общее или для всего поля наблюдения, если разница между отдельными k незначительна, или же отдельно для различных участков. Это требует также особой тщательности и опытности исследователя.

В некоторых случаях вообще оказывается невозможным определение какого-либо общего коэфициента водопроницаемости для всего поля понижения.

При пользовании методом Люммерта вместо установления большого числа наблюдательных скважин потребовалось бы установить большое количество самих колодцев Люммерта в характерных точках или же один и тот же колодец устанавливать поочередно в таких точках. Это чрезвычайно удлинило бы время исследования и не дало бы более точного и надежного значения k.

Большие затруднения приходится испытывать при определении k по ε-способу Тима в тех случаях, когда водонепроницаемая постель водоносной толщи не только весьма неровная, но еще и залегает не столь глубоко, чтобы можно было пренебречь неодинаковой глубиной водоносного слоя в различных пунктах расположения наблюдательных скважин и считать за H высоту непониженного уровня над подошвой центрального (рабочего) колодца. В таких случаях (особенно, если в отдельных наблюдательных скважинах водонепроницаемая постель расположена выше подошвы центрального колодца или водонепроницаемой постели на месте последнего) необходимо для каждой пары наблюдательных колодцев, по которым вычисляется k, определять отдельно отметку постели водоносного слоя. Здесь, смотря по местным условиям, можно или: 1) определять k, принимая в расчет сначала самое низкое положение водонепроницаемой постели, а потом самое высокое, и из обоих полученных значений k (при нерезкой разнице между ними) взять среднее, или: 2) брать среднюю отметку из двух и по ней определять k. В тех случаях, когда разница значений k при различных способах получается значительная, данная пара не может составлять комбинацию для определения k.

Наконец следует особо отметить определение k по ε-способу Тима в потоке грунтовых вод с более или менее значительным уклоном естественного уровня грунтовых вод.

В этих случаях при однородном грунте и ровной неглубоко залегающей водонепроницаемой постели придется отсчет y вести от наклонной постели водоносного слоя, принятой за параллельную поверхность непониже-

ного уровня и проходящей через подошву центрального неполного колодца, или через точку пересечения оси этого колодца с водонепроницаемой постелью.

Понятно, что точность определения k в этом случае может значительно уменьшиться и даже может оказаться совершенно неудовлетворительной. Положение еще более усугубляется при значительной неровности постели потока грунтовых вод.

Перечисленные осложнения не исчерпывают всех возможных случаев, но показывают, что по мере отступления от теоретического случая совершенно равномерного грунта с горизонтальной водонепроницаемой подошвой и непонижеенным уровнем определение k полевым способом с одним фильтрационным колодцем становится все более затруднительным, ненадежным и даже иногда совершенно непригодным. Это одинаково относится как к ε-способу Тима, так и к способу Люммерта.

§ 4. ПРОБНЫЕ ПОНИЖЕНИЯ

Как бы ни было тщательно выполнено определение основных величин на основании геологических исследований, предварительных расчетов и лабораторного испытания коэфициента водопроницаемости и даже полевого его определения (по способам Тима или Люммерта), как бы тщательно ни были обследованы местные особенности, так или иначе могущие влиять на производство понижения и следовательно учитываемые при проектировании, все же на основании этих данных можно рассчитывать или лишь небольшие установки понижения грунтовых вод, или же составлять только предварительный проект, который нуждается в проверке и исправлении.

Поэтому для сколько-нибудь ответственной и большой установки понижения рекомендуется до составления окончательного проекта произвести опытное понижение. Чем проще геологическая обстановка, чем меньше различных существенных местных особенностей и чем меньше объем всех работ по возведению данного сооружения, тем в меньшем объеме можно устраивать опытную установку. Однако чем менее развита пробная установка, тем меньше данных от нее можно получить, тем менее точны будут результаты и тем больше ошибок может быть при проектировании окончательной установки.

Между тем если уже принципиально выяснен вопрос (на основании хотя бы геогидрологических разрезов) о возможности и выгодности применения понижения в данном месте, то пробную установку надо стараться так устраивать, чтобы впоследствии она вошла в состав окончательной установки и даже произвела бы сама некоторое понижение, которое позволило бы закладывать колодцы окончательной установки с более низкого уровня, чем это необходимо было бы без предварительного понижения.

1. Задача пробных понижений

Главнейшей задачей пробных понижений является проверка предварительного проекта установки, а именно: правильно ли выбраны диаметр, глубина посадки фильтров, частота их сетки и расстояние между колодцами. Пробным понижением должны быть проверены и окончательно установлены значения величин, входящих в расчетные формулы, а именно: H — глубина колодцев, R — предел действия установки, k — коэфициент водопроницаемости, E — производительность колодца, т. е. количество воды, которое может и должно быть получено из каждого колодца в единицу времени, а также то общее количество воды — Q, которое придется откачивать из всей системы колодцев в единицу времени.

Пробное понижение должно выявить влияние открытого соседнего водоема на установку понижения, скорость подъема уровня при остановке водоотлива и вообще проверить все те обстоятельства, которые приходится иметь в виду при эксплоатации будущей окончательной установки.

2. Размеры пробных установок

Простейшая пробная установка представляет собою единственный фильтрационный колодец. Но из того, что выше было сказано, можно видеть, что одного колодца недостаточно для установления даже одной какой-либо величины, хотя бы проницаемости — k. Для определения k, как указано выше, необходимо кроме одного фильтрационного колодца иметь еще по крайней мере две наблюдательных скважины (ε-способ).

Кроме коэфициента водопроницаемости пробная установка должна позволить установить сопротивление колодца и изменение этого сопротивления в зависимости от дебита и глубины понижения уровня, а также от продолжительности работы колодца.

Для этой цели необходима еще одна наблюдательная скважина (третья) у самой наружной поверхности фильтра колодца.

Если производить систематические замеры уровня воды в фильтрационном колодце и в двух наблюдательных скважинах, то можно определить сопротивление колодца при разных дебитах только весьма приближенно.

Уровень воды у наружной поверхности фильтрационного колодца y_0 может быть приближенно вычислен тогда из уравнения:

$$y_0^2 = y_1^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{x_1}{r_0} = y_2^2 - \frac{q}{\pi k} \ln \frac{x_2}{r_0},$$

где y_1 — высота уровня в одном наблюдательном колодце, y_2 — в другом.

Разность между вычисленным y_0 и действительно замеренным в фильтрационном колодце уровнем y_k даст величину сопротивления колодца.

Проделав такие сравнения для разных дебитов при разных продолжительностях службы колодца, можно найти ту предельную величину производительности колодца, которой соответствует приемлемая величина сопротивления.

Такая установка (с одним колодцем) может дать довольно скудные данные для выяснения взаимодействия нескольких колодцев и следовательно не устраняет ненадежности, связанной с расчетом по тем или иным теоретическим формулам (в частности по принятой выше формуле Форхгеймера для многоколодезной установки).

Поэтому для больших проектируемых установок пробная установка должна состоять из нескольких фильтрационных колодцев и наблюдательных скважин.

Нередко такие пробные установки имеют 10—15 и более фильтрационных колодцев и столько же (или более) наблюдательных скважин.

В таком случае можно разрешить с достаточной полнотой все важные для окончательной установки понижения вопросы, найти надежные основные данные, установить предельные величины производительности колодцев и учесть более или менее точно влияние местных особенностей.

3. Производство измерений

При производстве пробных понижений должны быть произведены тщательные, систематические и достаточно продолжительные измерения: дебита, понижения уровня воды в колодцах и отдельных точках поля понижения, высоты всасывания насосов, сопротивления фильтров, количества выделяемых водой воздуха и газов, количества выносимых мельчайших ча-

стиц грунта, количества выпадающих осадков и влияния их на понижение, колебания уровня воды в соседних водоемах, влияния последних на пониженный уровень грунтовых вод и т. п.

Измерение дебита. В зависимости от количества откачиваемой воды дебит установки может быть измерен: 1) объемным способом — при

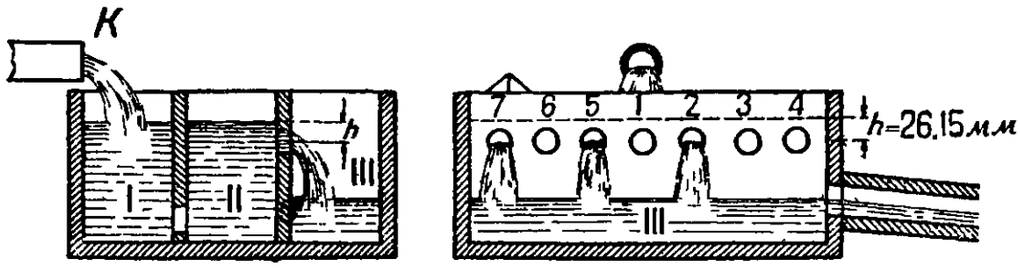


Рис. 99

помощи попеременного наполнения и опорожнения двух и более сосудов или бассейнов; 2) при помощи водослива; 3) водяных весов; 4) водяного дюйма и наконец 5) при помощи водомера.

Объемное измерение. Что касается объемного измерения, то ввиду простоты нет надобности его описывать. Следует только указать, что

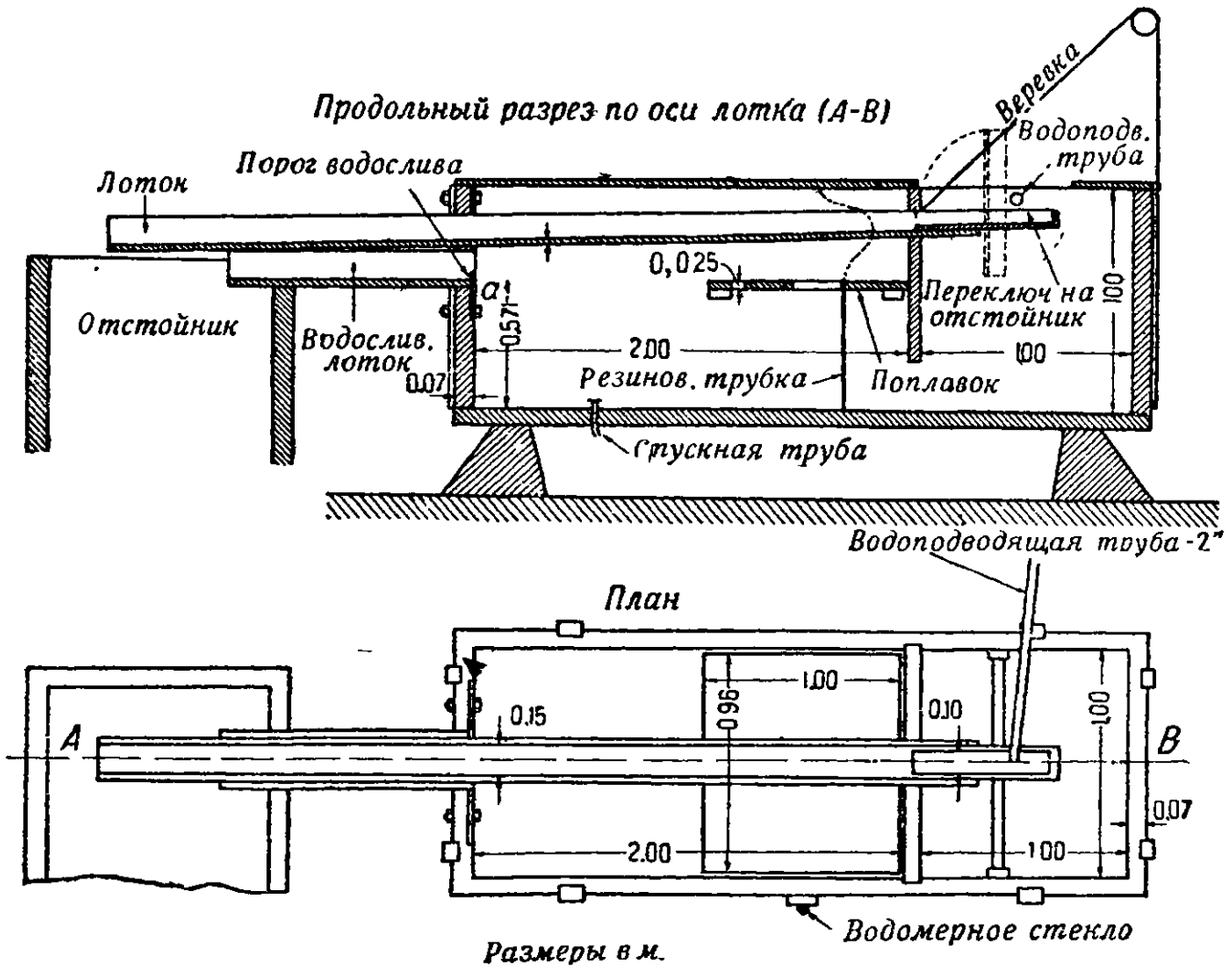


Рис. 100

для очень малых количеств воды точные результаты дают взвешенные сосуды, как например сосуд Хубера (Huber), представляющий жестяной цилиндр вместимостью 15 *л* с горлышком, в котором есть черта, обозначающая полноту наполнения.

Водяной дюйм. Простейший водяной дюйм (рис. 99) Борнемана, дающий лишь приближенные результаты, состоит из деревянного большого ящика, разделенного двумя перегородками на три отделения (*I*, *II*, *III*), при-

чем *I* и *II* служат для успокоения уровня и осаждения возможных взвешенных частиц. В стенке между *II* и *III* отделениями имеется семь круглых отверстий, из коих среднее наибольшего диаметра, а остальные попарно одинаковы и симметрично расположены, уменьшаясь от середины к боковым стенкам ящика. Количество воды определяется по высоте напора h согласно таблице для каждого диаметра отверстий. Высота напора устанавливается путем закрывания отверстий пробками.

Более точно можно измерять дебит при помощи отверстия в тонкой стенке на основании формулы $Q = \mu F \sqrt{2gh}$, где μ — коэфициент расхода, зависящий от высоты напора, от формы и величины отверстия (площадь отверстия равна F) и обыкновенно берется из таблиц, имеющихся в гидравлических справочниках.

Водослив. Измерение дебита при помощи водослива с прямоугольной или треугольной стенкой является одним из наиболее точных способов.

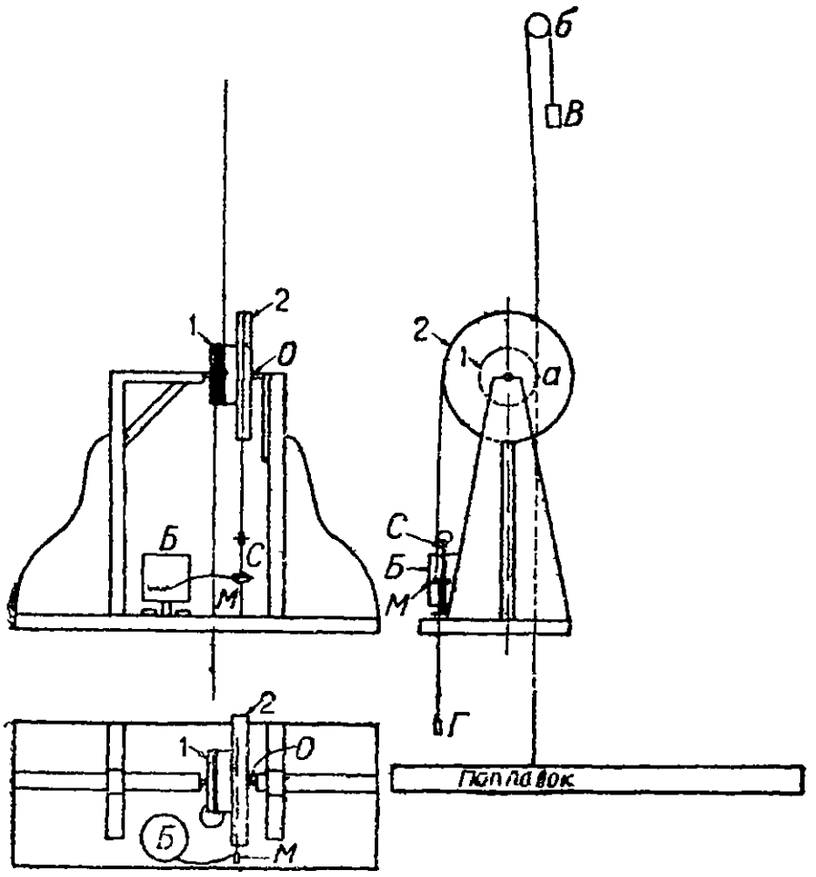


Рис. 101

Для примера здесь приводится водослив, примененный при опытном понижении грунтовых вод в Ленинграде (рис. 100), представляющий собой осмоленный деревянный ящик, разделенный перегородкой на две части. В передней стенке имеется вырез, в который устанавливается и прикрепляется болтами железная пластина с прямоугольным или треугольным вырезом с острыми краями.

Ввиду того что дебит в данном случае оказался весьма небольшим, измерение велось треугольным водосливом.

Дебит (Q) вычислялся по формуле:

$$Q = 0{,}14h^{2{,}5} \text{ л/сек},$$

где h в *см* — высота уровня воды над порогом водослива.

Для возможности непрерывного замера количества воды и для контроля работы насоса высота h непрерывно отмечалась при помощи поплавка с самопишущим прибором (рис. 101).

Хотя описанный водослив и относится к категории переносных, но он очень тяжел.

Если необходимо измерять дебит во многих местах, то для этой цели могут употребляться переносные складные брезентовые резервуары, а для точного измерения уровня служат различные усовершенствованные рейки, иглы и прочие указатели уровня.

Измерение дебита водомеров. Водомеры пригодны и дают точные результаты для больших количеств воды.

Наиболее удобным является водомер Вольтмана с самопишущим прибором, но он требует чистой воды, как впрочем и всякий другой водомер кроме Вентури, который можно снабдить саморегистрирующим прибором.

Для работы водомера требуется некоторый напор, поэтому его располагают обыкновенно на напорном трубопроводе насоса. На опытной уста-

новке рекомендуется устанавливать осадочник для задерживания грунта, выносимого из фильтрационного колодца. Осадочник устраивается с тем расчетом, чтобы скорость движения воды в нем была не более той, которая нужна для осаждения мельчайших частиц, имеющих значение в смысле опасности вымывания их из грунта через стенки фильтрационного колодца.

При опытах Ленинградского управления канализации был применен отстойник (рис. 102), который может служить также и как один из сосудов для объемного измерения дебита. Для удлинения пути воды сделаны перегородки, попеременно не доходящие до верха и до низа, и придан дну обратный уклон для большей кучности самых крупных оседающих частиц.

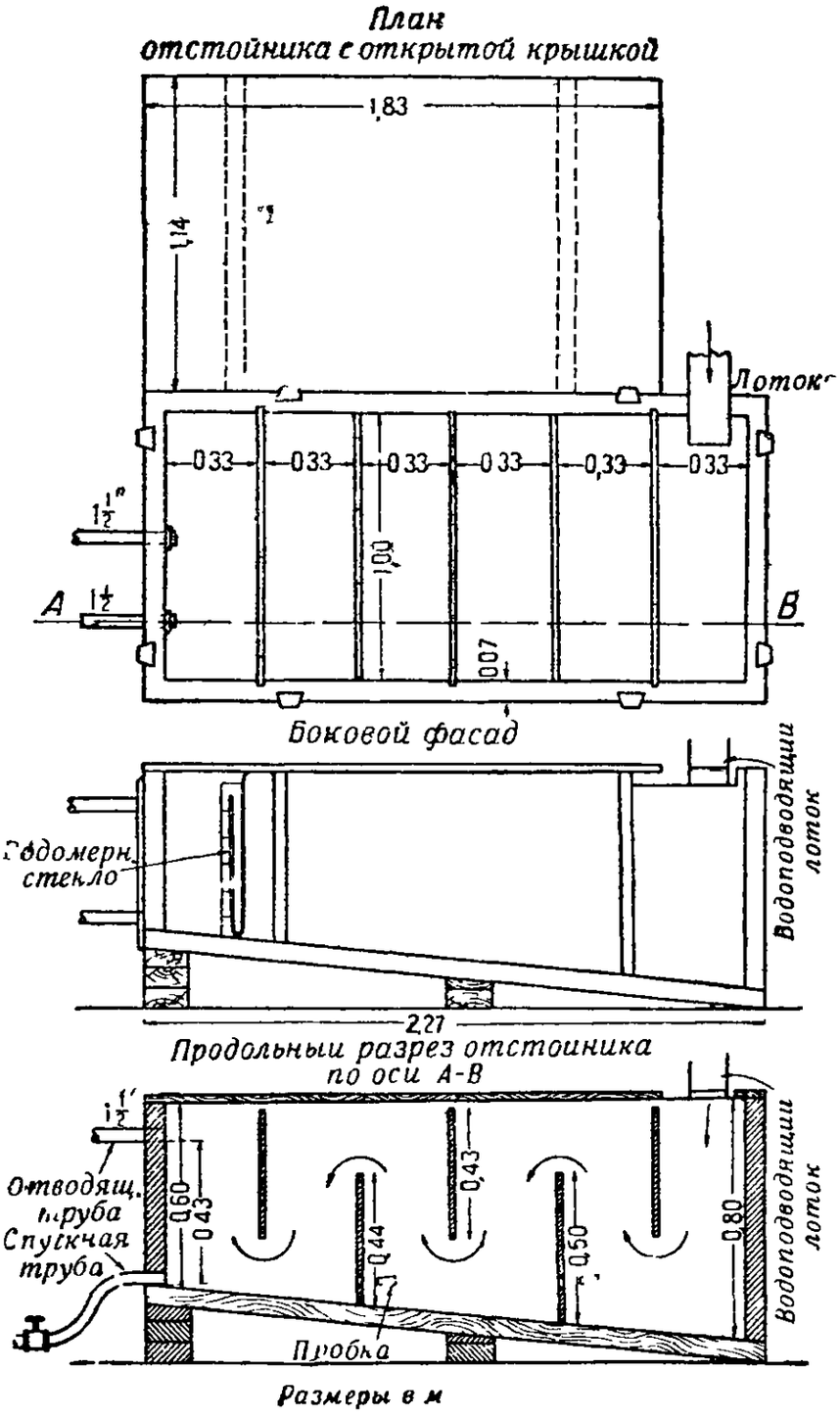


Рис. 102

Измерение уровня воды в колодцах и наблюдательных скважинах. Самый простой способ — непосредственное измерение мерной лентой с грузиком, но имеется большое число других разнообразных способов, дающих более точные показания, как например прибор Тима (рис. 103), состоящий из мерной ленты и подвешенного к ней грузика с ввинченной снизу стальною иглой толщиною 1,5 *мм*.

Игла для точного измерения глубины расположения поверхности воды покрывается раствором плавленого мела в серном эфире, благодаря чему становится ясным отличие части иглы, находившейся ниже уровня, от непогруженной. Благодаря тому, что игла очень тонка, опускание ее в воду не сопровождается практически измеримыми колебаниями уровня воды в колодце.

Этот прибор может служить только для уточнения положения уровня, измеренного предварительно более грубым прибором, позволяющим узнать, как глубоко надо опустить грузик, чтобы игла только частично погрузилась в воду.

Хорошим прибором для измерения уровня воды в колодце является водяной свисток Ранга (рис. 104), издающий звук при погружении его в воду. Этот свисток снабжен чашечкообразными желобками, отстоящими друг от друга на 1 *см*. При погружении свистка в воду эти чашечки напол-

няются водою. Расстояние самой верхней из заполненных водой чашечек от замеченного деления на мерной ленте в момент слышимости свистка составляет глубину уровня воды в колодце.

Целый ряд измерителей основан на электрической сигнализации или на сжатии воздуха и показаниях манометра.

Один из простейших электрических измерителей представляет собою (рис. 105) легкий металлический полый совершенно водонепроницаемый цилиндрический поплавок, который может свободно опускаться вниз и подниматься вверх в дырчатой коробке. Прибор подвешивается на шнуре со вплетенными в последний проводами, соединенными с двумя контактами, проходящими через верхнюю крышку коробки. Поплавок при достижении уровня воды задерживается, в то время как коробка продолжает опускаться до тех пор, пока поплавок верхним концом не соприкоснется с обоими

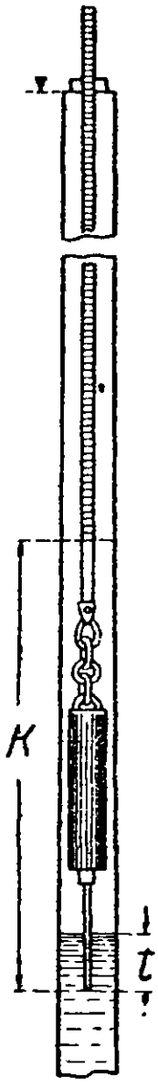


Рис. 103



Рис. 104

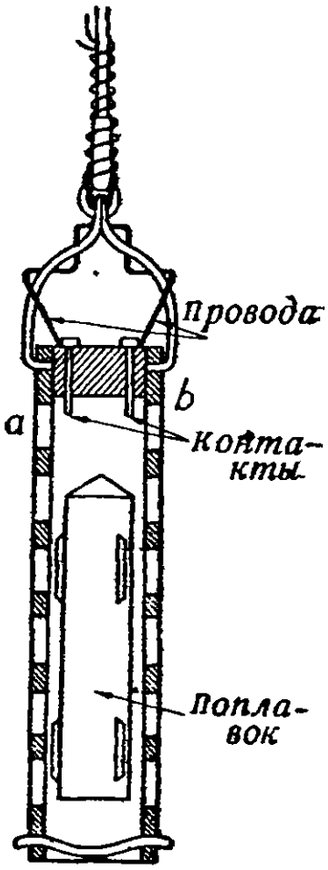


Рис. 105

контактами и не замкнет цепь. Момент этого соприкасания сигнализируется наверху электрическим звонком. На шнуре имеются деления, по которым легко определить глубину уровня воды.

Примером манометрического способа измерения уровня является прибор Куната (Kunath) (рис. 106). Это — трубка 5—6 *мм* со скошенным внизу концом и оканчивающаяся наверху водяным манометром и запорным краном *h*. Манометр снабжен делениями и наполнен окрашенной водой. Если открыть кран *h* и погружать трубку нижним концом в воду, то получится разность уровней в обоих коленах манометра, которая равна глубине погружения нижнего конца трубки ниже поверхности воды в колодце. Зная по отсчету длину трубки от нижнего конца ее до устья колодца и вычитая разность уровней манометра, можно точно определить глубину расположения уровня воды в колодце относительно устья колодца. Для производства точного отсчета длины трубки, опущенной ниже устья колодца, на трубке

имеется движок, снабженный пружиной и опирающийся выступом на обрез устья колодца.

Однако для опытных понижений все указанные выше и подобные им приборы неудобны тем, что они:

1) требуют более или менее продолжительного времени для измерения уровня в нескольких скважинах, а поэтому не дают возможности одновременного замера в них уровней, тогда как это очень важно для съемки воронки депрессии, особенно, если мы имеем дело с напорной водой;

2) не дают возможности непрерывно наблюдать уровни в течение всего периода откачки.

На опытной установке Ленинградского управления канализации для одновременного наблюдения уровней 30 наблюдательных скважин были

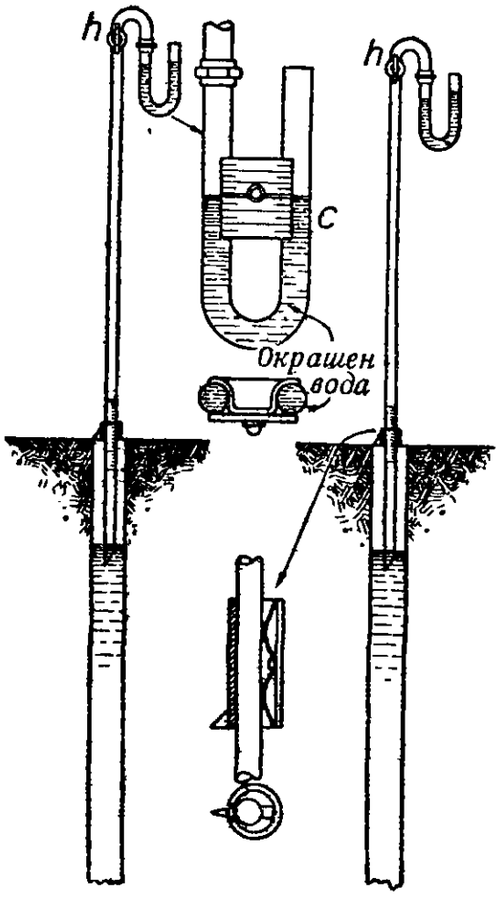


Рис. 106.

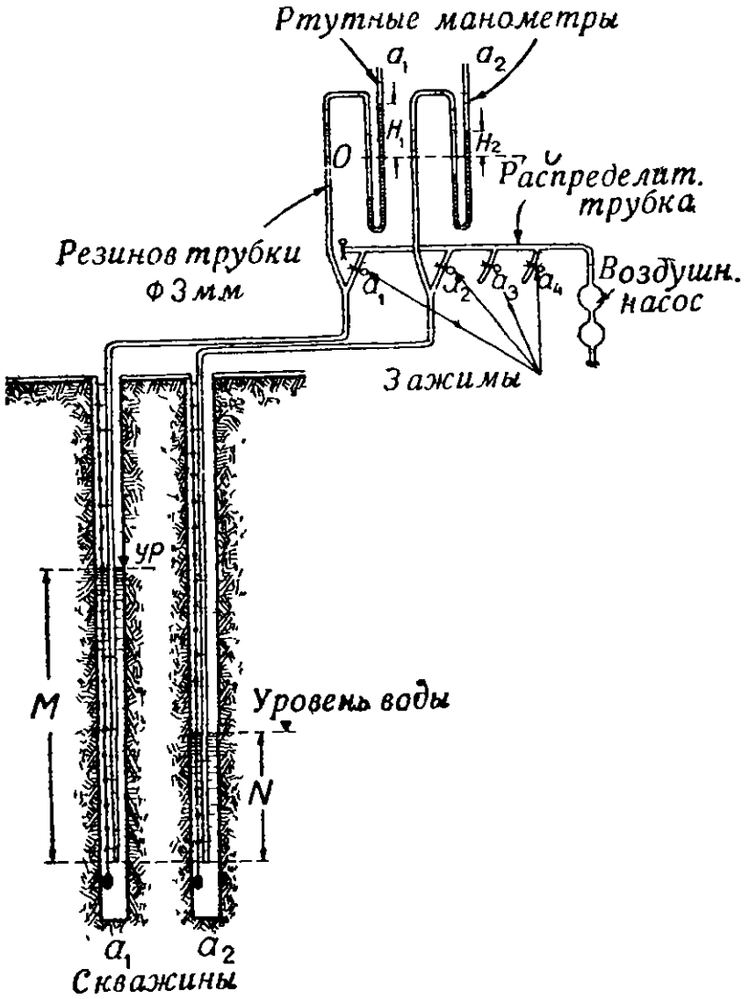


Рис. 107.

опущены в каждую из них по резиновой трубке диаметром в 3 *мм* с стеклянным наконечником, причем эти трубки были прикреплены во многих местах к цепочке с грузиком. Это позволяло располагать резиновую трубку совершенно отвесно. Верхний конец цепочки закреплялся на поверхности земли. Глубина погружения конца трубки была такова, что при самом низком положении уровня воды в колодце этот конец не выходил из воды. Резиновая трубка от каждой скважины продолжалась до общего центрального пункта и присоединялась там при помощи тройника с зажимом к ртутному манометру. Все манометры, соответствующие каждый своей скважине, были смонтированы на общей раме, причем в таких расстояниях друг от друга, которые были пропорциональны расстояниям между скважинами. Расстояния между трубками составляли $\frac{1}{27{,}2}$ действительных расстояний между соответствующими наблюдательными скважинами.

Для описания способа измерения на рис. 107 приведены две скважины с соответствующими им трубками и манометрами.

Трубка, ведущая от каждой скважины, подходит к стеклянному тройнику; от последнего одна трубка отходит к манометру, другая — к общей для всех скважин распределительной горизонтальной трубке, один конец которой закрыт зажимом, другой — соединен с воздушным нагнетательным насосом.

Пусть уровень воды в скважине a_1 стоит выше нижнего конца трубки на величину M, а в скважине a_2 — на N. Открывают все зажимы (в том числе a_1 и a_2) поочередно и накачивают насосом воздух в скважины до тех пор, пока во всех манометрах уровень не поднимется на такую высоту, что далее подниматься не будет. После этого зажимы a_1 и a_2 и пр. закрывают и читают по правому колену манометров высоту уровня.

Эта высота, умноженная на 2γ (γ — удельный вес ртути, равный приблизительно 13,60), дает высоту стояния воды в скважине выше нижнего конца трубки. Так как «нули» манометров всех скважин расположены на одной горизонтальной прямой, концы трубок в скважинах расположены также в одной горизонтальной плоскости и в то же время горизонтальные расстояния между манометрами соответствуют (в масштабе $1 : 27{,}2\ n$) расстояниям между скважинами, то на раме-щите получаются как бы модели вертикальных разрезов воронки депрессии. Если расстояния между скважинами очень велики, то горизонтальный масштаб может быть как угодно уменьшен. Точность этого прибора зависит только от точности отсчетов. Удобство наблюдения уровня из одного центрального места дает возможность следить непрерывно за режимом грунтовой воды и насосной установки.

Сосредоточивая в одном помещении все приборы измерения, можно очень легко, не теряя напрасно времени, управлять пробным понижением и быстро производить все необходимые замеры (дебиты, уровни и пр.).

Прочие измерения и наблюдения. Параллельно с измерением уровня грунтовых вод в районе понижения иногда бывает полезно установить в расстоянии, где влияние понижения практически не сказывается, несколько контрольных скважин, через которые можно было бы вести наблюдение за естественными колебаниями зеркала грунтовых вод или поверхности напора, причем одновременно при помощи дождемера производить измерение количества выпадающих дождевых осадков.

Так как температура воздуха и грунтовой воды, а также атмосферное давление оказывают влияние на понижение, то желательно на установке иметь термометры и барометр, показания которых должны систематически регистрироваться в журнале опытной станции.

Детали устройства опытных установок. Что касается деталей устройства опытной станции, — фильтрационных колодцев, всасывающего трубопровода, насосов и двигателей, то они могут отличаться от таковых настоящей установки только размерами, причем фильтрационные колодцы целесообразно делать тех же размеров, которые предполагается устанавливать и на окончательной установке.

Организация измерений и наблюдений. Какой порядок измерений принять и что именно измерять и наблюдать, — это вытекает непосредственно из указанных выше задач опытной установки. Насколько часто измерения производить — зависит от местных условий. Можно только сказать, что замеры желательно производить возможно чаще, а еще лучше непрерывно, применяя для этой цели автоматические регистрирующие приборы.

Продолжительность пробных понижений. Продолжительность действия пробной установки понижения зависит от местных усло-

вий, но во всяком случае можно сказать, что опыт надо продолжать до тех пор, пока не будет получено наибольшее понижение и наибольшее постоянство режима грунтовых вод при понижении.

При ненапорных водах требуется продолжительный непрерывный водоотлив для желательного или наибольшего достигаемого понижения; для напорных вод понижение обнаруживается быстро, иногда через несколько минут, так что в длительности понижения особой надобности нет.

Кроме измерения дебита и уровня грунтовой воды надо произвести наблюдения за подъемом уровня при остановке водоотлива, что имеет важное практическое значение. Наблюдения предельного понижения уровня воды в колодцах и допускаемого уклона уровня грунтовой воды в непосредственной близости от колодцев имеют большое значение, как определяющие производительность или захватную способность (по Зихардту). Определение предельного уровня у наружной поверхности колодца можно произвести посредством заложенной рядом с ним наблюдательной скважины; производительность колодца определяется практически тем наибольшим дебитом, при котором не происходит выноса грунта внутрь колодца и не создается сопротивления колодца, не позволяющего получить желательного понижения уровня грунтовых вод в определенных точках поля понижения.

Наблюдение за выделением водой газа и воздуха, определение состава газа и количества его, а также измерение вакуума представляют большой интерес для будущей проектируемой установки понижения. Поэтому при производстве пробного понижения предельная высота всасывания и количество отделяемых газов должны быть по возможности установлены. Состав газов, если он не был установлен при геологических изысканиях, должен быть установлен анализом при пробном понижении уровня грунтовых вод.

Пробный котлован при пробном понижении. Наиболее ценные результаты может дать пробная установка, если в связи с ней отрывается пробный котлован, подобный в плане настоящему котловану. Тогда большая часть возможных затруднений и местных особенностей может быть установлена уже на опытной установке и учтена для будущей эксплоатационной.

Документация наблюдений. Все наблюдения и измерения заносятся в журнал опытной станции: замеры дебита, уровней воды в наблюдательных скважинах и фильтрационных колодцах (с указанием времени замеров), а также всех прочих наблюдений, как например понижение уровня воды в контрольных скважинах, количество выпадающих осадков, температура, барометрическое давление и т. д.

В журнал опытной станции заносятся все остальные наблюдения, замечания, сведения о затруднениях, остановках (с объяснением причин), общее состояние погоды и вообще все, что может иметь значение для будущего понижения уровня грунтовых вод в данном месте.

Производимые вычисления для определения величин: k, R, производительности колодца — E, высоты всасывания, а также показания измерительных приборов при двигателях заносятся в журнал, равно как и результаты поверки произведенных испытаний. В журнал заносятся отметки о времени включения и выключения отдельных колодцев, о сделанных изменениях в установке, о мероприятиях по устранению затруднений и т. п.

Во всех деталях трудно указать все, что следует заносить в журнал, так как в каждом отдельном случае могут быть свои особенности, которые и определят окончательно форму журнала и содержание его.

ГЛАВА VI

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК ПОНИЖЕНИЯ

§ 1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

По получении всех необходимых данных — проекта сооружения, для которого производится понижение грунтовых вод, и плана производства работ по постройке этого сооружения, а также результатов геогидрологических и прочих предварительных изысканий и исследований, можно приступить к проектированию установки понижения.

Сначала в зависимости от предъявляемых требований и характера местных условий выбирается система установки: одноярусная, многоярусная, безъярусная с применением глубинных насосов или наконец смешанная или видоизмененная ярусная установка. Затем намечаются линии расположения колодцев в соответствии с формой сооружения в плане и предварительно намечается расстояние между колодцами, а также диаметр и глубина их и конструкция фильтров.

Выработав предварительный календарный план производства понижения, можно приступить к расчету установки. Расчетом должно быть установлены количество откачиваемой воды, размеры всасывающих и напорных трубопроводов, число и мощность насосов и двигателей, а также окончательно установлено число колодцев и их взаимное расположение.

Исходя из времени, в течение которого должна работать установка, необходимо расчетом установить расход энергии и материалов, расходы на обслуживающий персонал (в зависимости от числа насосных агрегатов) и вообще определить все те данные, которые необходимы для составления технической сметы.

По получении всех необходимых результатов расчета можно перейти к составлению детального проекта установки. Детальный проект должен предусматривать не только все основные элементы установки, но и дополнительные устройства: всякого рода измерительные приборы, запасные тройники на всасывающем трубопроводе, запасные задвижки, колодцы и т. д.

В тех случаях, когда местные условия того требуют, следует предусмотреть устройство стоков для воды, откачиваемой из колодцев, а также лотки и канавы для быстрого отвода ливневых вод.

При проектировании установки понижения надо помнить о возможности всяких неудач, отказов в действии насосов, влияния каких-либо непредвиденных местных особенностей. Поэтому надо предусмотреть запасные колодцы и водоотливные средства. Запас в процентном выражении мо-

жет быть различный для различных элементов установки, но самым большим он должен быть для насосов и двигателей.

Если вся установка при нормальной установившейся работе может обслуживаться одним насосом, то на случай отказа последнего надо иметь такой же в запасе, т. е. запас будет равен 100%.

Если количество насосов велико, то процент запаса насосных агрегатов может быть снижен до 50 и даже до 25 при условии взаимозаменяемости их.

Отсюда видно, что процент запаса зависит от размеров установки и расположения насосов. Что же касается запаса 25%, то эта величина является необходимым минимумом, вызываемым следующими соображениями:

1. В определении основных данных и главным образом величины k, а также в самих расчетных формулах есть большая доля приближенности и следовательно ненадежности.

2. Геологическое строение редко бывает идеально равномерным и точно отвечающим геологическому разрезу, составленному на основании ограниченного числа разведочных скважин.

3. В первые периоды действия установки обыкновенно приходится с целью сокращения времени форсировать водоотлив, и следовательно весь запас водоотливных средств может быть использован.

Что касается особенностей расстановки колодцев в зависимости от начертания котлованов, то это зависит от местных условий. Здесь только следует сказать, что при котлованах удлиненной и приблизительно прямоугольной формы на торцевых сторонах колодцы надо располагать вообще теснее, чем в середине длинных сторон.

Общее правило при выборе диаметра фильтров: чем более мелкозернистый грунт, т. е. чем меньше k, тем диаметр этих фильтров должен быть больше; обыкновенно применяются фильтры диаметром 15—25 *см* и редко больше (при применении глубинных погруженных насосов). Длина фильтрующей части при понижении одним ярусом была бы достаточна 5 *м*, между тем на практике часто фильтр делается более длинным и совершенно не снабжается наставной трубой.

Это объясняется в большинстве случаев желанием увеличить производительность каждого колодца в первый период действия установки, пока еще не установилась требуемая воронка понижения. Благодаря этому можно несколько ускорить понижение уровня грунтовых вод. Так как однако увеличение длины фильтра сопряжено с увеличением стоимости колодцев, то к этому мероприятию можно прибегать только тогда, когда имеется в наличии достаточное количество фильтров и не приходится приобретать их вновь для данной установки.

Избранные размеры колодца лучше проверить расчетом и выяснить, не надо ли увеличить диаметр и глубину колодца. Обыкновенно глубина колодца бывает от 10 до 15 *м* (за исключением глубоких безъярусных понижений).

При малой водоотдаче грунта надо для возможности понижения уровня грунтовой воды к определенному сроку предусмотреть в плане работ заблаговременное начало откачки.

Иногда приток воды настолько мал, что приходится применять всасывающие трубы очень малого диаметра, которые непроизводительно увеличивают сопротивление всасыванию, а также не оправдывают расходов на присоединение их к общему трубопроводу. Тогда можно рекомендовать соединение колодцев сифонным проводом со сборным глубоким трубчатым или шахтным колодцем, откуда вода уже будет откачиваться постоянно или периодически, смотря по размерам колодца и притоку воды.

Всасывающие трубы и трубопроводы рассчитываются по формулам для водопроводных труб, причем желательно, чтобы скорость течения воды в них не превышала 1,5 *м/сек*, а потеря напора не была слишком велика, чтобы при наибольшем напряжении установки насосы в состоянии были засасывать воду из колодцев. При конструировании колодцев надо иметь в виду, чтобы площадь кольцевого зазора между фильтром и всасывающей трубой была не менее площади сечения последней, чтобы не стеснять передвижения воды к приемному концу всасывающей трубы.

В том случае, когда предварительными изысканиями обнаружено присутствие в грунтовой воде газов и определены их состав и количество, тогда при составлении проекта надо решить, не нужны ли газоотделительная установка и особая защита труб и насосов.

При установках большого протяжения воздухоотделительное устройство желательно и в том случае, когда не ожидается выделения из воды газов.

По Люгеру 1 $м^3$ обыкновенной грунтовой воды содержит 1 *л* воздуха, объем которого в разреженном состоянии во всасывающем трубопроводе увеличивается почти вдвое. Так как по Люгеру даже при хорошем уплотнении стыков трубопровода на 1 *пог. м* последнего через стыки проникает 0,0015 *л* воздуха в секунду, то это количество может привести к образованию в трубопроводе воздушных мешков, способных не только понизить производительность насосов, но и остановить их совсем.

Воздухоотделительная установка может служить наилучшим образом для присасывания воды, почему не потребуется установки приемных клапанов в отдельных колодцах, установка будет всегда готова к пуску в ход и в случае обрыва струи можно быстро восстановить работу.

План производства понижения должен быть согласован с планом всего строительства. Действие установки в большинстве случаев начинается ранее земляных работ, но бывает и наоборот, т. е. сначала производятся земляные работы с помощью открытого водоотлива, и только на известной глубине устраивается установка понижения, после чего земляные работы отстают от понижения уровня грунтовых вод. В последнем случае важно, чтобы понижение уровня грунтовых вод не вызвало задержек в работе, а потому оборудование установки насосами должно быть запроектировано так, чтобы в первый период времени после пуска установки в ход и до получения требуемого понижения уровня грунтовых вод было возможно откачивать в единицу времени воды больше, чем это требуется в последующий период после достижения более или менее установившегося положения пониженного уровня.

При проектировании установки должны быть предусмотрены не только запасные колодцы, трубопроводы, насосы, двигатели, запасный источник энергии, но и необходимые инструменты для мелкого ремонта и монтажа.

По исполнении проекта составляется план производства понизительных работ, начиная от бурения скважин для колодцев и кончая разборкой понизительной установки, при тщательном согласовании с планом всей постройки.

Параллельно с этим составляется предварительная смета по нормам, установленным для отдельных элементов работ.

§ 2. РАСЧЕТ УСТАНОВОК ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Прежде чем перейти к самому расчету установок понижения, следует предварительно условиться относительно выбора основных расчетных данных.

Выше было указано, что наиболее надежное установление численных

значений величин k, R и E возможно на основании измерений и наблюдений при пробных понижениях.

Опытная установка может дать тем более надежные результаты, чем ближе условия ее действия будут подходить к условиям, в которых должна находиться эксплоатационная установка.

Для этого диаметр и глубина колодцев, фигура расположения их в плане и глубина понижения в центре площади пробной установки должны быть такими же, как в будущей настоящей установке.

Иначе говоря, пробная установка тогда может дать надежные результаты, когда она будет отличаться от будущей эксплоатационной только числом колодцев и занимаемой площадью.

Но такая установка потребует и больших расходов и значительного времени для достижения требуемой глубины понижения.

Если даже оставить в стороне вопрос стоимости, то вопрос времени может оказаться значительно труднее.

Из практики понижения известно, что иногда требуется несколько недель и даже месяцев, чтобы достигнуть желаемого понижения уровня. В распоряжении строительства такого запаса времени может не оказаться. Тогда придется производить расчет на основании данных, хотя и менее надежных, но добываемых в более короткий срок.

Такой расчет предварительно придется произвести и в том случае, если окажется возможным надлежащее пробное понижение; тогда пробную установку можно спроектировать так, чтобы она была по начертанию в плане подобна будущей эксплоатационной.

1. Установление величины водопроницаемости k

Значение величины k может быть установлено пробной откачкой из одиночного колодца или лабораторными опытами, как об этом подробнее изложено выше.

В крайнем случае можно значение k вычислить для чистых и крупных песков по одной из формул, приведенных выше, в главе V, § 3.

Наконец можно при известном гранулометрическом составе грунта приблизительно установить k путем сравнения данного грунта с близким по механическому составу другим грунтом, коэфициент k которого известен.

Таблица 34

Наименование грунта	Степень проницаемости	Характер грунта по способу образования	Численное значение k м/сек
Глинистый мелкий и очень мелкий песок	Ничтожная	Дельтовые отложения	0,00002—0,00005
Слабоглинистый мелкий и очень мелкий песок	Малая	Устья рек	0,00005 —0,0001
Слабоглинистый среднезернистый и чистый мелкий песок	Средняя	Речные отложения среднего течения	0,0001 —0,001
Крупный песок с мелким гравием	Большая	Среднее и верхнее течения рек	0,001 —0,005
Средний и крупный гравий	Очень большая	—	0,005 —0,01

Для иллюстрации приблизительного порядка значений величины k приводится таблица 34, составленная на основании результатов, полученных при понижениях уровня грунтовых вод в различных условиях.

На эту таблицу отнюдь нельзя смотреть как на справочную даже для самых грубых подсчетов, так как наименования грунта даны не на основании механического состава, а на основании той качественной характеристики данного грунта, которая приведена в опубликованных описаниях произведенных понижений.

Итак, установить величину водопроницаемости грунта можно в зависимости от наличия времени и средств одним из следующих способов:

1. Опытная многоколодезная установка.
2. Пробная откачка из одиночного колодца (способ Тима или Люммерта).
3. Лабораторное определение.
4. Вычисление по формулам.
5. Приближенное определение по гранулометрическому составу и по сравнению с известной проницаемостью сходного с данным грунта.

2. Установление радиуса действия R установки понижения

Как было указано в гл. III, § 4, определение предела действия многоколодезной установки можно произвести только условно, понимая под этой величиной то расстояние от центра установки, на котором оканчивается измеримое, практически заметное, понижение уровня грунтовых вод в момент достижения требуемого понижения (s) в центре установки

Впредь до уточнения формулы для этой величины на основании новых опытных данных и возможных теоретических исследований условимся выражать радиус действия многоколодезной установки той формулой, которую удалось пока вывести на основании результатов некоторых выполненных понижений практического характера:

$$R = 575\, s \sqrt{Hk}. \qquad (39$$

Следует особо подчеркнуть, что эта формула выведена на основании результатов понижений уровня ненапорных грунтовых вод.

В отношении напорных вод можно только сказать, что R увеличивается с увеличением s, H и k, но как именно аналитически выражается эта зависимость, пока еще не известно. Этот вопрос необходимо особо исследовать, но пока будем принимать и для напорных вод формулу (39), что будет правильнее, чем определение R как функции времени

Второе замечание относительно определения величины R относится к случаям расположения установки понижения уровня грунтовых вод вблизи открытых водоемов. В этих случаях более или менее достоверные данные могут дать только опытные установки, для ориентировочных же предварительных расчетов придется пользоваться формулой Форхгеймера, в которой $R = 2a$, где a — расстояние центра установки понижения до уреза воды в водоеме Однако это будет правильно только в том случае, если определенное по формуле (39) значение R окажется больше $2a$ и если зеркало ложа водоема незначительно В противном случае в расчет следует принимать R, вычисленное по формуле (39).

Если установка расположена на острове, очертания берегов которого по урезу воды приближаются к форме полигона расположения колодцев, причем расстояния всех сторон этого полигона от берегов приблизительно одинаковы, то за величину R принимается приближенно радиус равновеликого фигуре острова круга, если этот радиус меньше величины R, определенной по формуле (39).

Если расстояние отдельных сторон полигона от берегов острова значительно различаются друг от друга, то вопрос определения R осложняется. В таких случаях более правильное решение будет заключаться в расчете установки по частям, отдельно для каждой группы колодцев. Но так как этот прием вносит новые осложнения, то расчет становится менее надежным.

Такой же прием следует применять при расчете установки большой площади на берегу водоема, если отдельные стороны полигона резко различно удалены от берега (см. пример двухрядного расположения колодцев гл. III, § 7). Вообще надо сказать, что при осложненных местных условиях установление радиуса действия установки, а следовательно и вообще расчет ее становится особо затруднительным, так как известные расчетные формулы, составленные для абстрактной, максимально упрощенной, обстановки, становятся менее применимыми и надежными.

В случаях особо сложной обстановки расчеты имеют смысл только для выяснения возможности производства в данном случае искусственного понижения уровня грунтовых вод и для ориентировочной наметки основных размеров и расположения отдельных частей установки. Уточнение же всех данных будущей рабочей установки понижения может достигаться только постепенно по мере осуществления понижения на месте.

В подобных случаях опытной установкой понижения будет оказываться в различных стадиях развития постепенно строящаяся в процессе эксплоатации установка.

3. Установление производительности E колодца

Выше (в гл. III, § 6) было указано, что определение производительности колодца можно произвести более или менее удовлетворительно только на основании опытных откачек на месте, а для ориентировочных подсчетов остается пока только приближенная эмпирическая формула Зихардта для предельной скорости:

$$v_0 = \frac{\sqrt{k}}{15} \tag{50}$$

и соответственно для производительности:

$$E = \pi d_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15}. \tag{51}$$

Значение величины y_0 может быть определено из уравнения:

$$y_0^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k}\left(\ln R - \ln \sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_{n-1} r_0}\right), \tag{23'}$$

где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — расстояния колодца, для которого определяется y_0, соответственно от каждого из остальных $n-1$ колодцев, r_0 — радиус колодца.

Необходимо заметить, что пользование уравнением (23') не всегда является вполне надежным, так как закон движения грунтовых вод в непосредственной близости от колодца отклоняется от закона Дарси, на основании которого составлено уравнение (23').

Поэтому для контроля вычислений y_0 по уравнению (23') полезно иметь в виду, что глубина понижения уровня воды у наружной поверхности каждого колодца не должна (на основании опыта целого ряда установок) превышать глубину понижения в центре тяжести площади установки более, чем на 0,5—1 *м*, за исключением случаев очень тонкозернистых глинистых песков, а также расположения колодцев по периметру котлована большой площади (более 1 *га*).

4. Общий ход расчета установки понижения уровня грунтовых вод

1) Определяется величина H. Если мощность водоносного слоя не превышает глубины колодцев, то H берется непосредственно из геогидрологического разреза. Если мощность водоносного слоя значительно больше глубины колодца или точно не установлена, то за H принимается глубина погружения подошвы колодца ниже непониженного уровня.

Глубина колодца для одноярусных установок (не считая глубоких безъярусных) устанавливается на основании следующих соображений.

Пусть требуемая глубина понижения уровня в центре тяжести площади установки равна s *м*. Тогда понижение у колодца должно составить от $s + 0{,}5$ до $s + 1$ *м*.

Считая длину фильтрующей части колодца y_0 не менее s, получим глубину колодца $H = y_0 + s + (0{,}5 - 1\ м)$ или $H = 2s + (0{,}5 - 1\ м)$.

Для второго, третьего и т. д. ярусов глубина колодцев, считая от устья до подошвы, обыкновенно принимается такая же, как и для колодцев первого яруса.

Для глубоких безъярусных понижений глубина колодцев определяется, как сумма требуемой глубины понижения уровня у колодцев — s и длины фильтра y_0, причем последняя определяется на основании экономических расчетов: чем меньше y_0, тем больше должно быть число колодцев и тем больше первоначальные затраты; чем больше y_0, тем больше придется откачивать воды для получения требуемого понижения и тем больше эксплоатационные расходы.

2) Определяется R — предел действия установки по формуле:

$$R = 575 \cdot s \cdot \sqrt{H \cdot k}\ ,$$

где:

k известно из предварительных исследований;

s — требуемое понижение в центре тяжести площади установки;

H — определено вышеуказанным способом.

3) Определяется $X_0 = \sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n}$, где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — расстояния всех колодцев от центра тяжести площади установки.

Колодцы предварительно размечаются на плане один от другого на расстояниях, зависящих от глубины, диаметра и высоты фильтра, мощности водоносного слоя и с учетом всех характерных местных особенностей.

Для установок, имеющих в плане не очень вытянутую фигуру, можно X_0 определить по формуле:

$$X_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}\ ,$$

где F — площадь окруженного колодцами участка.

4) Определяется общий дебит установки Q:

а) для ненапорной грунтовой воды по формуле:

$$Q = \frac{1{,}36\,(2H - s)\,s \cdot k}{\lg R - \lg X_0}\ ,$$

б) для напорной — по формуле:

$$Q = \frac{2{,}72\,khs}{\lg R - \lg X_0}\ ,$$

где: h — мощность напорного водоносного слоя;

s — глубина понижения напора в центре тяжести площади установки.

Примечание. При неполных колодцах вычисленную величину Q рекомендуется увеличивать на 10—20% (Зихардт).

Средний дебит

$$q=\frac{Q}{n},$$

где n — число колодцев.

6) Определяется высота пониженного уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодцев y_0 по формуле (23′).

Если разница между полученными значениями y_0 незначительная и при этом соблюдено условие:

$1>(H-y_0-s)>0{,}5$, то выбирается наименьшее значение y_0. В противном случае принимается: $y_0=H-s-0{,}5$ (для малых установок) и $y_0=H-s-1$ (для больших установок).

Определения надо произвести для нескольких колодцев — наиболее близких и наиболее удаленных от центра тяжести площади установки.

7) Определяется допускаемая производительность E тех колодцев, для которых определены значения y_0, по формуле:

$$E=\pi d_0 y_0\frac{\sqrt{k}}{15}.$$

Необходимо еще раз заметить, что наиболее надежное определение допускаемой производительности колодца можно сделать только при помощи достаточно продолжительной пробной откачки.

8) Определяется высота пониженного уровня y_i в нескольких характерных точках поля понижения, наиболее удаленных от центра установки, по формуле:

$$y_i=\sqrt{H^2-\frac{Q\left[\lg R-\frac{1}{n}\lg(x_1'x_2'\ldots x_n')\right]}{1{,}36\cdot k}},$$

где x_1', x_2',...,x_n' — расстояния данной точки от каждого колодца.

Если какое-либо из полученных значений y_i окажется значительно больше значения y в центре установки, то следует определить Q', которое необходимо для требуемого в этой невыгодно расположенной точке понижения уровня грунтовых вод.

9) Определяется средний дебит колодца при Q':

$$q'=\frac{Q'}{n}.$$

10) Производится сравнение средних дебитов. q и q' с E.

Если $q>E$ и $q'>E$ или $q<E$ и $q'<E$, то снова определяется количество колодцев $n'=\frac{Q'}{E}$.

Если разница между Q и Q' незначительна, то полученное количество колодцев n' принимается, и колодцы размещаются на равных расстояниях друг от друга.

Если $q<E$ и $q'>E$, то следует попытаться так разместить колодцы, чтобы на наиболее удаленных от центра установки участках расстояния между ними были меньше, а на более близких — больше среднего расстояния.

Произведя такое размещение, снова определяют общий дебит всей установки: Q — для достижения требуемого понижения уровня в центре

установки и Q' — для достижения того же или иного требуемого заданием понижения в самой невыгодной точке установки.

Если удастся добиться (возможно — после ряда попыток) такого размещения, при котором $q \leqslant E$ и $q' \leqslant E$, то на таком размещении и останавливаются.

Если же такое размещение не удается или если получаются слишком малые расстояния между колодцами на одних участках и слишком большие — на других, то приходится увеличивать общее число колодцев и размещать их все же на различных взаимных расстояниях. Иногда при большой площади установки или при удлиненной фигуре котлована не удается ограничиться расположением всех колодцев только по периметру котлована, а приходится расположить часть колодцев внутри площади котлована. Разместив колодцы так, чтобы значения q, q' и E были наиболее близки между собою, необходимо по формуле (23′) определить снова y_0 для наиболее близкого и наиболее удаленного от центра установки колодцев и снова найти E'. Иногда большое расхождение между найденным прежде E и новым — E' заставит произвести снова некоторую перестановку колодцев, пока не будет достигнуто более близкое совпадение значений q, q' и E.

Но и на этом не всегда возможно закончить определение числа колодцев и размещение последних.

Может оказаться, что придется принять средний дебит колодца значительно меньше, чем вычисленная по формуле Зихардта производительность колодца. Это может получиться в том случае, если расстояние между колодцами получается слишком большое, так что понижение уровня воды у наружной поверхности отдельных колодцев по расчету превышает более чем на 1 *м* величину понижения в центре установки и если сама эта величина сравнительно велика, а насосы применены не глубинные. Такое положение может оказаться особо затруднительным, если возможно ожидать большого сопротивления колодцев, так что уровень воды в колодцах понизится настолько, что высота всасывания насосов плучится слишком велика, и не будет обеспечиваться бесперебойная работа насосов.

Наоборот, может оказаться, что придется допустить $q > E$, чтобы не получилось слишком малое расстояние между колодцами. Расстояние между колодцами для одно- и многоярусных установок бывает на практике от 5 до 10 *м*; иногда это расстояние увеличивают до 15 *м* и в очень редких случаях делают менее 5 *м*. Для установления наивыгоднейшего расстояния между колодцами полезно сделать экономическое сравнение нескольких вариантов.

Вообще окончательный расчет числа колодцев и взаимного их расположения не всегда может свестись к простым арифметическим действиям, а иногда требует довольно сложных решений, требующих известных навыков и опытности проектировщика.

11) Подбирается диаметр всасывающего и нагнетательного трубопроводов.

Расчет производится по формулам или таблицам для расчета водопроводных труб, причем стремятся к тому, чтобы потеря на трение и на удары в закруглениях и задвижках не была слишком велика.

Если глубина воды в колодце, считая от оси насосов, равна s', то требуется, чтобы $s' + \xi$ (где ξ — сумма всех потерь во всасывающем трубопроводе) не превышала 6—7 *м*, так как иначе при почти неизбежном проникании воздуха во всасывающий трубопровод насосы могут оказаться не в состоянии работать. Кроме того следует стремиться к тому, чтобы скорость течения воды в трубопроводах находилась в пределах 0,5—1,5 *м/сек*.

12) Определяется манометрическая высота подъема воды насосами, представляющая сумму геометрических высот всасыва-

ния и нагнетания и всех потерь во всасывающем и нагнетательном трубопроводах по методу расчета водопроводных труб.

13) Определяется мощность насосов и двигателей. Если H — общая манометрическая высота подъема в метрах, а Q *л/сек* — количество воды, подлежащей откачке данным насосом, то мощность насоса $N_p = \frac{QH}{75\eta_p}$, где η_p — коэфициент полезного действия насоса.

Мощность двигателя $N_m = \frac{N_p}{\eta_m} = \frac{QH}{75\,\eta_p\eta_m}$, где η_m — коэфициент полезного действия двигателя.

14) Время, необходимое для достижения желаемого понижения, можно определить только весьма приближенно. Зная площадь установки и предел ее действия — R, можно приближенно вычислить объем грунта V_g, который должен быть освобожден от воды прежде, чем будет достигнуто требуемое понижение в центре установки.

Зная коэфициент пористости грунта p, можно определить объем воды, подлежащий удалению из грунта при непрерывной откачке до момента достижения требуемой глубины понижения $V_w = V_g p$. Зная средний секундный дебит установки Q, определяют время:

$$T = \frac{V_w}{3600 \cdot Q} \text{ час. (при абсолютно сухой погоде).}$$

Если во время действия установки было значительное количество атмосферных осадков, то приведенный подсчет должен быть исправлен, т. е. должно быть

$$T = \frac{V_w}{(Q - Q_s) \cdot 3600},$$

где Q_s — количество инфильтрующихся в секунду осадков на всю площадь поля понижения радиуса R.

15) Если вблизи установки имеются открытые водоемы, то их влияние лучше всего определять опытным путем. Для предварительного расчета можно воспользоваться уравнениями (55) и (56).

16) Влияние ливней, естественного уклона грунтовых вод и других местных условий особенно трудно поддаются учету; приближенный учет этих влияний приходится вести на основании соображений, приведенных в гл. III.

17) Для расчета удлиненных установок следует руководствоваться соображениями, приведенными в гл. III, § 3, п. 3.

Найденные расчетом величины служат для дальнейших проектных соображений, а именно для окончательного установления диаметра, глубины, конструкции, числа колодцев и их расположения, для распределения насосов и двигателей, а равно для определения расходов на оборудование, эксплоатацию и разборку установки понижения.

Изложенный общий ход расчета не является с начала до конца пригодным для всех случаев. Он целиком может быть пригоден только для случаев, когда глубина и диаметр колодцев не могут изменяться, когда дебиты всех колодцев одинаковы, производительность колодца не ограничена производительностью насосов и когда допускаются различные расстояния между колодцами. Этот ход расчета может частично изменяться в зависимости от того, допускается или не допускается изменение глубины и диаметра колодцев, допускаются различные расстояния между колодцами или эти расстояния должны быть одинаковыми, допускается откачивание из

колодцев различных количеств воды или из всех колодцев должно откачиваться поровну.

Все эти условия определяются местными особенностями установки; например глубина колодца не может быть увеличена в том случае, если водонепроницаемая подошва водоносного слоя находится на такой глубине, что больше этой глубины колодцы делать нет смысла. Иногда даже при большой глубине до водонепроницаемой подошвы глубину колодца приходится ограничивать; например в случаях, когда с увеличением глубины может быть захвачен очень водоносный слой, в связи с чем значительно увеличится приток воды и удорожится понижение грунтовых вод, хотя можно было бы обойтись без захвата этого слоя, не ухудшая успеха понижения. Глубина колодцев может ограничиваться также в связи с трудностью проходки слоя очень крупнозернистого галечника и валунов, в связи с присутствием которых значительно осложняются, замедляются и удорожаются буровые работы или делается затруднительной установка колодцев без предварительного бурения гидравлическим способом.

Диаметр колодца также часто нельзя изменить: например в том случае, когда у производящей понижение организации имеются колодцы только определенных диаметров, а изготовление новых сопряжено с потерей времени и с не достаточно оправдываемыми обстановкой затратами.

Приведенными примерами, понятно, не исчерпываются все случаи невозможности или нецелесообразности изменения глубины и диаметра колодцев, но из этих примеров видно, что бывают обстоятельства, когда при расчете нельзя изменять глубину колодцев или их диаметр или даже и то и другое.

Хотя и редко, но могут быть такие случаи, когда колодцы приходится устанавливать на одинаковых расстояниях из-за нежелания разрезать и переделывать звенья всасывающего трубопровода с отводами и тройниками. Например если имеются звенья трубопровода длиною 5 *м* с надвижными фланцами и с тройниками у концов звеньев, то колодцы удобнее располагать или на 5 *м* друг от друга, или на 10, или на 15, но установка отдельных колодцев на 7 или 8 *м* друг от друга сопряжена уже с изготовлением специальных звеньев трубопровода или особых отводов и т. п.

Конечно, нельзя рекомендовать иметь только звенья одинаковой длины, а, наоборот, следует иметь более гибкий сортамент; однако не исключены случаи наличия однообразного сортамента, когда следовательно придется встретиться с фактом затруднений, задержек и удорожаний при монтаже установки. Если эти задержки и удорожания окажутся более существенными, чем недостатки расположения колодцев на одинаковых расстояниях, то придется принимать при расчете расстояния между колодцами одинаковыми, хотя бы это нормально и было менее выгодно, чем различные расстояния.

Наоборот, очень часто обстоятельства не позволяют располагать колодцы на одинаковых расстояниях (в случаях стесненной площади или других различных помех).

При равных расстояниях между колодцами и одинаковых их глубине и диаметре для равномерного понижения на больших площадях или вблизи открытого водоема, а также в случаях значительного уклона уровня естественного потока грунтовых вод и в других особых условиях необходимо откачивать из одних колодцев в единицу времени больше воды, чем из других. Если мы имеем дело с грунтами мелкозернистыми и загрязненными илистыми, глинистыми, органическими частицами или растворенными примесями в воде, вызывающими загрязнение фильтров, то увеличивать дебит отдельных колодцев сравнительно с другими можно только за счет увеличения диаметров и глубины этих особых колодцев. Однако не всегда воз-

можно увеличивать производительность отдельных колодцев до любой величины. Этого нельзя бывает допустить при применении глубинных насосов определенного типа, например однопоршневых штанговых определенного диаметра, хода поршня и числа ходов последнего, производительность которых вообще невелика.

Уже одно это в случаях невозможности получить своевременно насосы других типов и размеров заставит отказаться от равномерного расположения колодцев или же заставит при равномерном расположении колодцев снизить дебит этих колодцев за счет увеличения их числа.

Все разобранные случаи, а также многие другие, перечислить которые представляется затруднительным, приводят к различным приемам гидравлического расчета установки понижения грунтовых вод.

В дополнение к рассмотренному общему ходу расчета установок следует коснуться особенностей расчета установок, не допускающих различных расстояний между колодцами, но зато допускающих различную глубину колодцев и длину фильтра, а следовательно и различную производительность их.

Для этого случая пп. 1—5 общего хода расчета остаются без изменения.

6′) Определяется высота пониженного уровня грунтовой воды у наружной поверхности ближайшего к центру установки колодца по формуле (23′) для ненапорных вод:

$$y_0 = \sqrt{H^2 - \frac{Q\left(\lg R - \lg \sqrt[n]{x_1' x_2' \dots x'_{n-1} r_0}\right)}{1{,}36 \cdot k}}$$

или для напорных вод по формуле:

$$y_0 = H - \frac{Q\left(\lg R - \lg \sqrt[n]{x_1', x_2' \dots x'_{n-1} r_0}\right)}{2{,}72\, kh}.$$

6″) Определяется глубина понижения уровня грунтовой воды у этого колодца:

$$s_0 = H - y_0.$$

7′) Определяется длина фильтрующей части колодца h_ϕ этого колодца по формуле Зихардта (51) для производительности колодца E, считая, что должно быть $q = E$:

$$h_\phi = \frac{\cdot q \cdot 15}{\pi d_0 \sqrt{k}}.$$

7″) Определяется полная глубина H колодца относительно непонижен-ного уровня:

$$H' = h_\phi + s_0.$$

8′) При новом значении H' определяется общий дебит установки, необходимой для достижения требуемой глубины понижения уровня грунтовых вод, в нескольких характерных точках (в частности в наиболее удаленных от центра установки пунктах) по формулам для ненапорных вод:

$$Q' = \frac{1{,}36\, k(2H' - s)\, s}{\lg R - \frac{1}{n} \lg(x_1 x_2 \dots x_n)},$$

а для напорных вод по формуле:

$$Q' = \frac{2{,}72\, khs}{\lg R - \frac{1}{n} \lg(x_1 x_2 \dots x_n)}.$$

Если разница между Q и Q' незначительна (10—15%), то расчет ведут следующим образом:

9′) Определяется средний дебит каждого колодца при новом Q:

$$q' = \frac{Q'}{n}.$$

9″) Определяется снова длина фильтра h'_ϕ по формуле Зихардта (51):

$$h'_\phi = \frac{q' 15}{\pi d_0 \sqrt{k}}.$$

9‴) Определяется новое значение глубины колодцев H'':

$$H'' = h'_\phi + s_0.$$

Это значение H'' принимается за высоту непониженного уровня для всех дальнейших необходимых подсчетов.

Если полученный дебит q' слишком велик для применяемых насосов, то приходится увеличить число колодцев настолько, чтобы q — максимальный дебит колодца — не превышал производительности насоса.

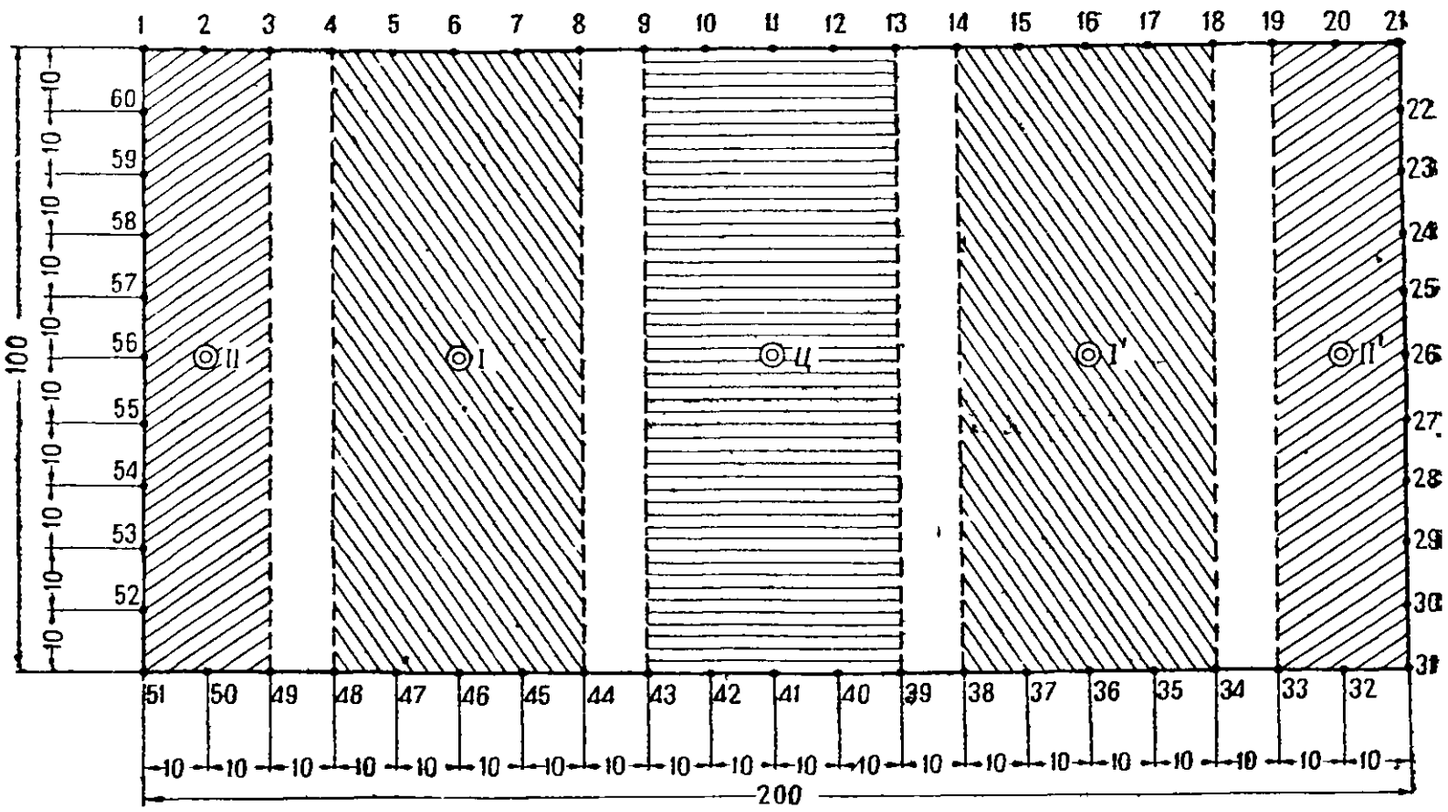


Рис. 108

Если разница между Q и Q' значительна (более 20%), то расчет придется вести следующим образом: все колодцы делятся на ряд групп (отсеков), и для центра тяжести каждого отсека определяется Q_i, затем q_i — дебит каждого колодца—следующим приближенным приемом. Пусть (рис. 108) мы имеем установку с числом колодцев $n = 60$ при требуемой глубине понижения s, причем первоначально установленная глубина колодца равна H, диаметр равен d, расстояние между колодцами — 10 *м*. Допустим для упрощения, что R таково, что расстояние между наиболее удаленными друг от друга точками меньше R.

После определения общего дебита Q для понижения s в центре установки все колодцы разбиваются на пять групп с центрами тяжести в точках $Ц, I, I'II, II'$, и определяется сначала общий дебит установки, не-

обходимый для достижения требуемого понижения s в точках I и I'. Для этого сначала определяется

$$\lg X_0^I = \frac{1}{n}\left(\lg x_1^I + \lg x_2^I + \ldots + \lg x_n^I\right),$$

где

$x^I; x_2^I, \ldots, x_n^I$ — расстояния точек I и I' от каждого колодца установки.

Далее для ненапорных вод определяется Q_I по формуле:

$$Q_I = \frac{1{,}36\,k(2H - s)s}{\lg R - \lg X_0^I}.$$

Затем определяется дебит каждого колодца групп I и I', если число колодцев каждой из этих групп равно n_I (в частности по рис. 108 колодцы группы I следующие: № 4, 5, 6, 7, 8, 44, 45, 46, 47, 48, т. е. $n_I = n_{I'} = 10$):

$$q_I = \frac{Q_I - q(n - 2n_I)}{2n_I},$$

где q — дебит каждого колодца, необходимый для достижения понижения s в $Ц$; n — общее число колодцев всей установки.

По найденному q_I определяется длина фильтра (h_ϕ^I) только для колодцев групп I и I':

$$h_\phi^I = \frac{q_I\,15}{\pi d\sqrt{k}}.$$

Далее находится общая глубина каждого колодца I и I': $H_I = s_0 + h_\phi^I$, где s_0 — глубина понижения уровня у ближайшего к центру установки колодца, определенная ранее (п. 6[I]).

После этого определяется общий дебит всей установки при понижении s в точках II и II', принимая за мощность водоносного ненапорного слоя H_I:

$$Q_{II} = \frac{1{,}36\,k(2H_I - s)s}{\lg R_I - \lg X_0^{II}},$$

где

$$\lg X_0^{II} = \frac{1}{n}(\lg x_1^{II} + \lg x_2^{II} + \ldots + \lg x_n^{II}) \quad \text{и} \quad R_I = 575\,s\sqrt{H_I k}.$$

Найдя Q_{II} определяют q_{II} — дебит каждого колодца групп II и II'

$$q_{II} = \frac{Q_{II} - qnЦ - 2q_I n_I}{2n_{II}},$$

где $nЦ$ — число колодцев группы с центром, совпадающим с центром всей установки.

По найденному q_{II} находится длина фильтра h_ϕ^{II} колодцев групп II и II':

$$h_\phi^{II} = \frac{q_{II}\,15}{\pi d\sqrt{k}}.$$

Наконец определяется глубина колодцев групп II и II': $H_{II} = h_\phi^{II} + s_0$, причем s_0 — понижение уровня у ближайшего к центру всей установки колодца, определенное ранее (п. 6″).

В результате такого приема расчета получится:

1. Для колодцев группы $Ц$:

Производительность каждого—q; глубина от непониженного уровня—H; длина фильтра минимум—h_ϕ.

2. Для колодцев групп I и I': производительность каждого—q_I; глубина от непониженного уровня—H_I; длина фильтра минимум—h_ϕ^I.

3. Для колодцев групп II и II': производительность каждого—q_{II}; глубина от непониженного уровня—H_{II}; длина фильтра минимум—h_ϕ^{II}.

В последнем приеме расчета имеется важная неточность, а именно: расчет общего дебита производится по формуле Форхгеймера, применимой при условии одинаковой для всех колодцев глубины относительно непониженного уровня H и одинаковых дебитов q, тогда как на самом деле эти величины для разных групп различны.

Если разница между h для различных групп получается очень большая, то произведенный расчет приведет к преувеличенным значениям производительности, глубины и длины фильтров колодцев, особенно для наиболее удаленных от центра установки. Единственное преимущество этого приема расчета заключается в том, что в нем предусматривается одинаковое расстояние между всеми колодцами, что иногда бывает обязательным.

Дальнейшие расчеты не будут отличаться от изложенных для случая одинаковых расстояний между колодцами.

Общего хода расчета для различных других случаев, для примера вкратце упомянутых выше, мы здесь касаться не будем, так как, во-первых, в изложении общего хода расчета невозможно предусмотреть все случаи, а во-вторых потому, что, овладев описанным приемом расчета, каждый проектировщик сумеет самостоятельно видоизменить его соответственно конкретным условиям.

§ 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для иллюстрации изложенного в § 2 произведем примерный расчет одноярусной установки с расположением колодцев по периметру котлована $200 \times 100 = 20\,000\ м^2 = 2\ га$ (рис. 109).

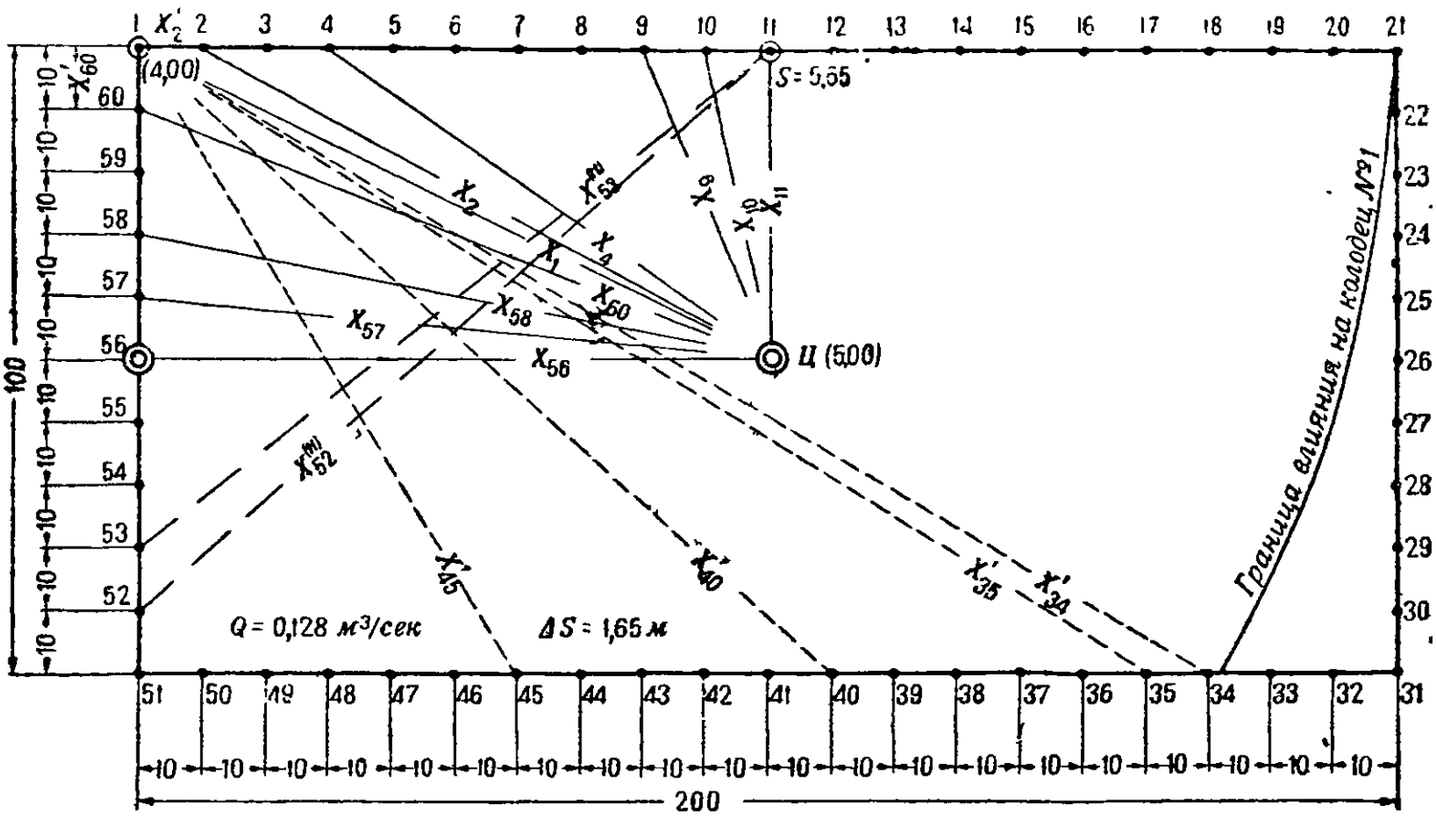


Рис. 109

По требованию строительства уровень грунтовых вод на всей площади котлована должен быть понижен минимум на 5 *м*. Допустим, что горизонтальный естественный уровень грунтовых вод на 1 *м* ниже горизонтальной поверхности. В общих чертах геологическое строение следующее: на глубину от поверхности 0,5 *м* — растительный слой; под ним до глубины 11 *м* (от поверхности) залегают приблизительно равномерно зернистые мелкие чистые пески с средним коэфициентом водопроницаемости $k = 0{,}0005$ *м/сек*; ниже залегает слой мощностью в среднем 4 *м* мелкозернистого слабоглинистого песка ($k = 0{,}00007$ *м/сек*), а еще ниже — глина с неровной поверхностью.

Произведем расчет

1. Установим значение величины H. Ввиду очень малой водопроницаемости слоя мелкозернистого слабоглинистого песка колодцы углублять ниже поверхности этого слоя нет смысла. Следовательно глубина колодцев от уровня грунтовых вод должна составить $H = 11 - 1 = 10$ *м*.

2. Определим радиус действия установки R по формуле:

$$R = 575 \cdot s\sqrt{Hk}.$$

Требуемое понижение в центре установки примем согласно заданию $s = 5$ *м*.

Понижение будет производиться в чистых песках, следовательно $k = 0{,}0005$ *м/сек*.

Тогда $R = 575 \cdot 5\sqrt{10 \cdot 0{,}0005} = 200$ *м*.

3. Расположим колодцы диаметром 150 *мм* по периметру котлована на равных расстояниях 10 *м* общим числом 60 (рис. 109). Определим приближенно $X_0 = \sqrt[60]{x_1 x_2 \ldots x_{60}}$, где $x_1, x_2, \ldots, x_{60}$ — расстояния каждого колодца от центра установки; X_0 — приближенно радиус круга, равновеликого площади установки — F.

$$X_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 100}{3{,}14}} = 80\ м.$$

4. Определим общий дебит установки, если $s = 5$ *м* в центре установки. Так как мы имеем дело с ненапорной грунтовой водой, применим формулу:

$$Q = \frac{1{,}36\,(2H - s)\,s \cdot k}{\lg R - \lg X_0}.$$

Подставим значения всех величин, причем $\lg R = \lg 200 = 2{,}30103$; $\lg X_0 = \lg 80 = 1{,}90309$:

$$Q = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}0005\,(20-5)\,5}{2{,}30103 - 1{,}90309} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}0005 \cdot 15 \cdot 5}{0{,}39794} = 0{,}128\ м^3/сек.$$

5. Определим средний дебит каждого колодца

$$q = \frac{Q}{n} = \frac{0{,}128}{60} = 0{,}0021\ м^3/сек.$$

6. Определим высоту уровня грунтовой воды у наружной поверхности колодцев № 1 и 11 — наиболее удаленного и наиболее близкого к центру.

а) Колодец № 1. На этот колодец оказывают влияние все колодцы установки за исключением № 22—33, т. е. всего 48 колодцев.

Измерим по чертежу (рис. 109) расстояния:

$$x'_2,\ x'_3,\ \ldots,x'_{21},\ x'_{34},\ x'_{35},\ \ldots,x_{60}.$$

Диаметр колодца $d_0 = 0{,}15$ *м*, следовательно $r_0 = 0{,}075$ *м*. Определяем $\lg X'_0 = \frac{1}{48}(\lg r_0 + \lg x'_2 + \lg x'_3 + \ldots + \lg x'_{21} + \lg x'_{34} + \ldots + \lg x'_{60})$. Вычисления приводят к $\lg X'_0 = 1{,}87$, $\lg R - \lg \lg X'_0 = 0{,}43$. Общий дебит колодцев, влияющих на колодец № 1, включая и его самого, составит:

$$Q_1 = q \cdot 48 = 0{,}0021 \cdot 48 = 0{,}108\ м^3/сек.$$

$$y'_0 = \sqrt{H^2 - \frac{Q_1(\lg R - \lg X'_0)}{1{,}36\,k}} = \sqrt{100 - \frac{0{,}108 \cdot 0{,}43}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 6\ м,$$

т. е. уровень грунтовой воды у колодца № 1 располагается на 1 *м* выше, чем в центре установки.

б) Колодец № 11. На этот колодец влияют все колодцы установки без исключения.

Измерим по чертежу расстояния колодца № 11 до № 10, 9, ..., 42, т. е соответственно: X''_{10}, X''_9, ..., X''_{42}, а также $X''_{41} = 100$ *м*. Тогда

$$\lg X''_0 = \frac{1}{60}[\lg r_0 + 2(\lg X''_{10} + \lg X''_9 + \ldots + \lg X''_{42}) + \lg X''_{41}] = 1{,}87;$$

$$\lg R - \lg X''_0 = 0{,}43;$$

$$y''_0 = \sqrt{100 - \frac{0{,}128 \cdot 0{,}43}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 4{,}35\ м;$$

$$H - s - y''_0 = 10 - 5 - 4{,}35 = 0{,}65, \text{ т. е.}$$

$$1 > H - s - y''_0 > 0{,}5.$$

Поэтому для дальнейшего расчета примем: $y_0 = 4{,}35$ *м*.

7. Определим допустимую производительность колодца по формуле Зихардта:

$$E = \pi d_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15}.$$

Подставим полученное значение y_0:

$$E = 3{,}14 \cdot 0{,}15 \cdot 4{,}35 \frac{\sqrt{0{,}0005}}{15} = 0{,}00306\ м^3/сек.$$

8. Примем за одну из характерных точек установки местоположение колодца № 1.

$$y_1 = y'_0 = 6\ м.$$

Определим тот дебит установки, который был бы необходим для достижения в точке № 1 того же понижения, что и в центре установки, т. е. $s_1 = 5$ *м*.

Определим сначала количество воды, которое в секунду должно откачиваться из всех колодцев, влияющих на точку № 1, т. е. из 48 колодцев.

$\lg R - \lg X'_0 = 0{,}43$ (см. выше, п. 6а):

$$Q'_{48} = \frac{1{,}36\,k(2H - s)s}{\lg R - \lg X'_0} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}0005 \cdot 15 \cdot 5}{0{,}43} = 0{,}119\ м^3/сек.$$

$$Q' = 0{,}119 \cdot \frac{60}{48} = 0{,}149\ м^3/сек.$$

Находим дебит каждого колодца:

$$q' = \frac{0{,}149}{60} = 0{,}0025 \ м^3/сек.$$

9. Произведем сравнение q, q' и E:

$$q = 0{,}00121 \ м^3/сек$$
$$q' = 0{,}0025 \quad ,,$$
$$E = 0{,}00306 \quad ,,$$
$$q < E; \quad q' < E.$$

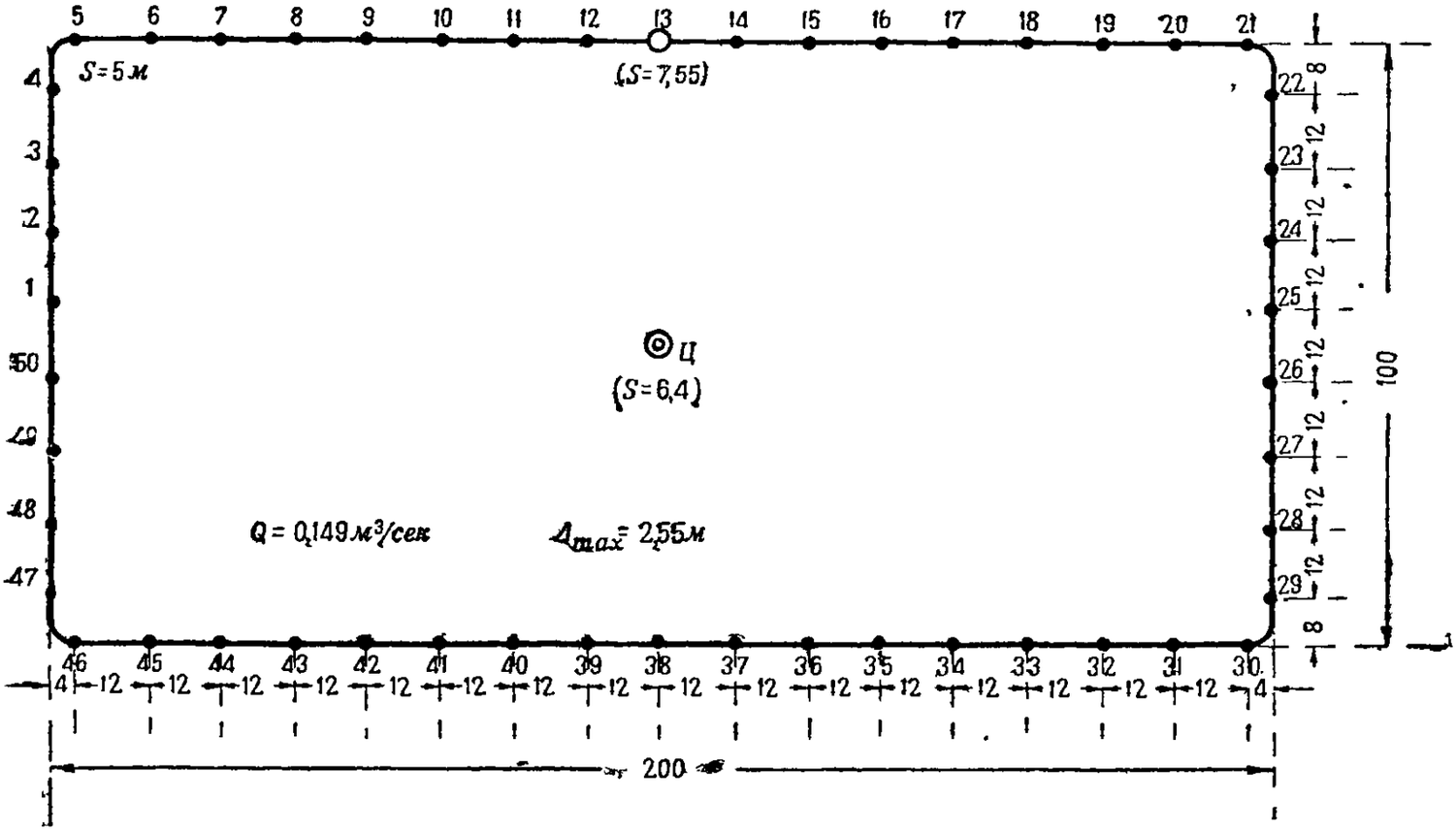


Рис. 110

Находим количество колодцев, необходимое для достижения требуемого понижения:

$n' = \frac{Q'}{E} = \frac{0{,}149}{0{,}00306} = 49$, или кругло 50 при среднем расстоянии между ними $\frac{(200+100)2}{50} = 12 \ м$. Расположим эти 50 колодцев равномерно по периметру (рис. 110).

Сравним Q и Q':

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{0{,}149}{0{,}128} = 1{,}16,$$

т. е. Q' на 16% больше Q.

Разница, как видно, незначительная, и можно было бы принять число колодцев $n' = 50$, т. е. вариант 2-й (рис. 110) за окончательный.

Однако этого сделать нельзя, пока не проверены при новых расстояниях глубины понижения в некоторых характерных точках. При равных расстояниях между колодцами значения $\frac{1}{n} \lg (x_1 x_2 \ldots x_n)$ почти не отличаются друг от друга при различных расстояниях между колодцами.

Поэтому при прежних значениях X_0 найдем высоту пониженного уровня колодца № 13 (рис. 110):

$$y_0^{(13)} = \sqrt{100 - \frac{0{,}149 \cdot 0{,}43}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 2{,}45 \text{ м}.$$

Понижение уровня грунтовой воды снаружи колодца будет:

$$s_0^{(13)} = 10 - 2{,}45 = 7{,}55 \text{ м}.$$

Уровень воды в самом колодце № 13 должен быть еще более понижен, что невыгодно для всасывания насосов.

Определим высоту уровня воды в другой характерной точке, а именно в центре установки (*Ц*).

Для этого прежде всего подсчитаем более точно $\lg X_0$ для точки *Ц*.

Измерим по чертежу (рис. 110) расстояния колодцев № 1—13 от центра установки и найдем:

$$\lg X_0 = \frac{1}{50}[4(\lg x_1 + \lg x_2 + \ldots + \lg x_{12}) + 2 \lg x_{13}] = 1{,}903$$ — полное совпадение с вычисленным приближенно (п. 3).

Тогда

$$y_0 = \sqrt{100 - \frac{0{,}149 \cdot 0{,}397}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 3{,}6 \text{ м}.$$

Следовательно при расположении колодцев на 12 *м* друг от друга в центре установки получается понижение уровня $s = 10 - 3{,}6 = 6{,}4$ *м*, т. е. на 1,4 *м* больше необходимого.

Расположение по второму варианту, т. е. при 50 колодцах, обладает следующими недостатками:

1. Весьма неравномерное понижение уровня грунтовых вод в различных пунктах площади котлована.

2. Слишком большое понижение уровня у ближайших к центру установки колодцев, что приводит к неблагоприятной для насосов высоте всасывания.

3. Дебиты колодцев, расположенных наиболее далеко от центра установки, для обеспечения требуемого понижения должны быть увеличены за счет неизбежного снижения дебитов колодцев, наиболее близких к центру, что может повести к их перенапряжению, а впоследствии к снижению производительности и к подъему пониженного уровня грунтовых вод в углах котлована.

Эти недостатки вызывают необходимость нового перераспределения колодцев. Расположим колодцы по третьему варианту (рис. 111). Число колодцев 56. Для облегчения вычислений объединим колодцы по группам, считая расстояние центра тяжести каждой из таких групп от той или иной точки равным средней геометрической из расстояний всех колодцев данной группы от той же точки. Таким образом точки *A*, *II*, *III* и *IV* — центры тяжести одинаковых угловых групп колодцев по семи колодцев в каждой группе, колодцы № 5, 6, 7 объединены в группу с центром тяжести в точке *6* и т. д.

Вычисления показывают, что при более или менее значительных расстояниях колодцев группы от той или иной точки вышеуказанная замена вполне возможна.

Определим

$$ХЦ = \sqrt[56]{x_1 x_2 \ldots x_{56}}.$$

Расстояния от центра установки до центров тяжести групп показаны на чертеже (рис. 111) в виде отрезков прямой, причем цифра на каждом отрезке обозначает число объединяемых колодцев из числа всех колодцев установки.

Подсчет показывает, что $\lg X_{Ц} = 1{,}927$; $\lg R - \lg X_{Ц} = 0{,}374$; $s_{Ц} = 5$ *м*.

Найдем Q:

$$Q = \frac{1{,}36 \cdot k(2H - s)s}{\lg R - \lg X_{Ц}} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}0005 \cdot 15 \cdot 5}{0{,}374} = 0{,}1365 \ м^3/сек;$$

$$q = \frac{0{,}1365}{56} = 0{,}00244 \ м^3/сек.$$

Найдем y_A в точке A:

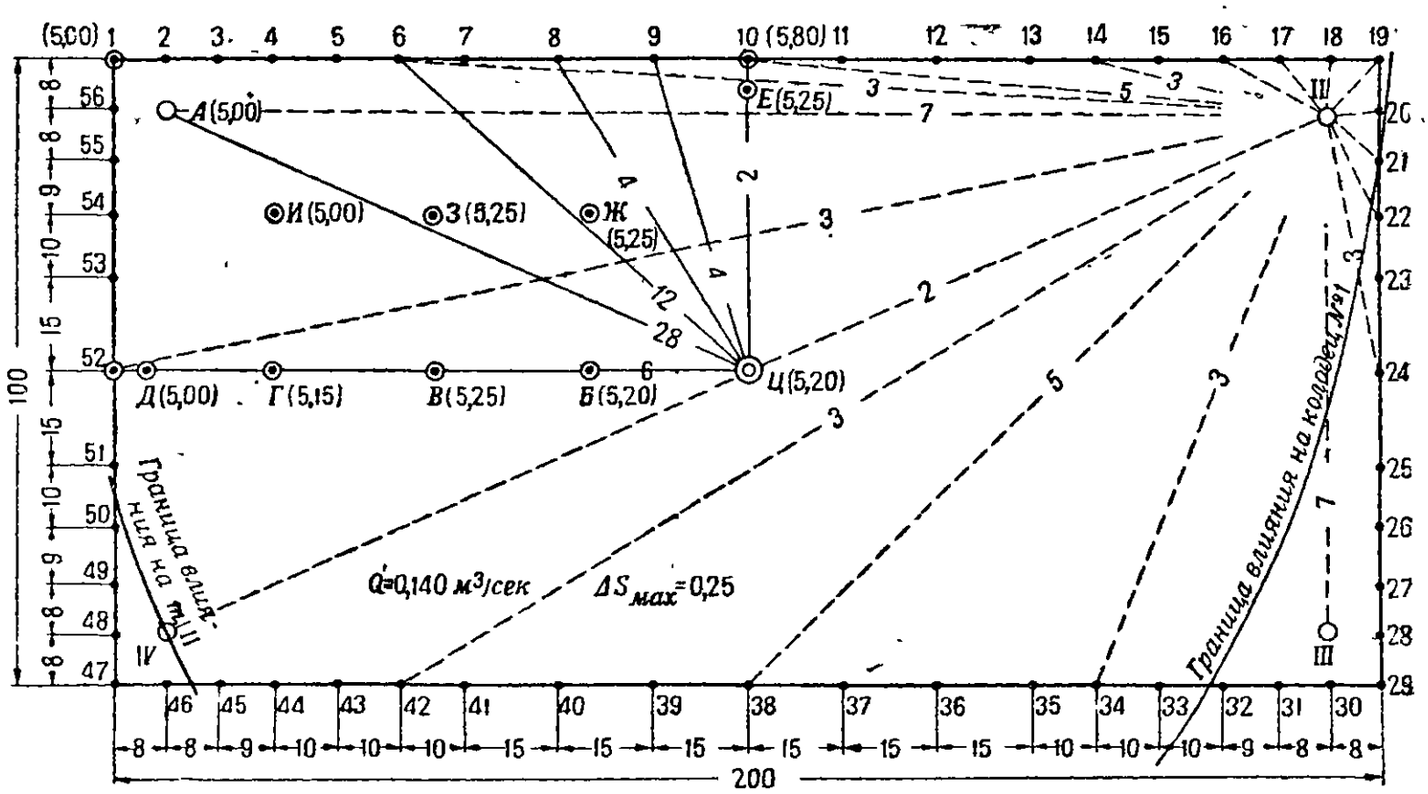


Рис. 111

На точку A (или на симметричную ей точку II) влияют все колодцы кроме пяти, т. е. 51.

$$\lg X_A = 1{,}901; \ \lg R - \lg X_A = 0{,}4.$$

Общий дебит всех влияющих колодцев:

$$Q_A = 0{,}00244 \cdot 51 = 0{,}125 \ м^3/сек;$$

$$y_A = \sqrt{100 - \frac{0{,}125 \cdot 0{,}4}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 5{,}15 \ м;$$

необходимо $y_A = 5$ *м*.

Тогда

$$Q'_A = \frac{1{,}36 \cdot 15 \cdot 5 \cdot 0{,}0005}{0{,}4} = 0{,}1275 \ м^3/сек;$$

$$q' = \frac{0{,}1275}{51} = 0{,}0025 \ м^3/сек.$$

Общий дебит установки:

$$Q' = 0{,}0025 \cdot 56 = 0{,}140 \ м^3/сек.$$

Определим уровень воды во всех характерных точках при $Q' = 0{,}140 \ м^3/сек$:

1. Точка *Ц*. $y_Ц = \sqrt{100 - \frac{0{,}140 \cdot 0{,}374}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 4{,}8 \ м;$

$$s_Ц = 5{,}2 \ м.$$

2. Точка *Б*. $\lg X_B = 1{,}927; \ y_B = 4{,}8 \ м; \ s_B = 5{,}2 \ м.$

3. Точка *В*. $\lg X_B = 1{,}926; \quad \lg R - \lg X_B = 0{,}375;$

$$y_B = \sqrt{100 - \frac{0{,}140 \cdot 0{,}375}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 4{,}75 \ м;$$

$$s_B = 5{,}25 \ м.$$

4. Точка *Г*. $\lg X_Г = 1{,}93; \quad \lg R - \lg X_Г = 0{,}371;$

$$y_Г = \sqrt{100 - \frac{1{,}140 \cdot 0{,}371}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 4{,}85 \ м;$$

$$s_Г = 5{,}15 \ м.$$

5. Точка *Д*. $\lg X_Д = 1{,}937; \quad \lg R - \lg X_Д = 0{,}364;$

$$y_Д = 5{,}00 \ м; \quad s_Д = 5{,}00 \ м.$$

6. Точка *Е*. $\lg X_E = 1{,}925; \quad \lg R - \lg X_E = 0{,}376;$

$$y_E = 4{,}75 \ м; \quad s_E = 5{,}25 \ м.$$

7. Точка *Ж*. $\lg X_Ж = 1{,}926;$

$$y_Ж = 4{,}75 \ м; \ s_Ж = 5{,}25 \ м.$$

8. Точка *З*. $\lg X_З = 1{,}926; \quad y_З = 4{,}75 \ м;$

$$s_З = 5{,}25 \ м.$$

9. Точка *И*. $\lg X_И = 1{,}927; \quad y_И = 5 \ м; \ s_И = 5 \ м.$

Из приведенных результатов вычислений видно весьма равномерное понижение уровня грунтовых вод на всей площади котлована.

Определим высоту пониженного уровня у колодцев:

1) Колодец № 1. На него влияют 47 колодцев вместе с ним самим.

$$\lg X_0' = \frac{1}{47}(\lg r_0 + \lg x_2' + \ldots + \lg x_{47}') = 1{,}87;$$

$$\lg R - \lg X_0' = 0{,}431;$$

$$Q_1' = 0{,}0025 \cdot 47 = 0{,}118 \ м^3/сек;$$

$$y_0' = \sqrt{100 - \frac{0{,}118 \cdot 0{,}431}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 5 \ м;$$

$$s_0' = 5 \ м.$$

2) Колодец № 10. $\lg X_0^{(10)} = 1{,}901; \quad \lg R - \lg X_0^{(10)} = 0{,}400;$

$$y_0^{(10)} = \sqrt{100 - \frac{0{,}140 \cdot 0{,}40}{1{,}36 \cdot 0{,}0005}} = 4{,}20 \ м.$$

$$s_0^{(10)} = 5{,}80 \ м.$$

Определим производительность колодца по формуле Зихардта при наименьшем y_0, т. е. при $y_0 = 4{,}2$ *м*:

$$E = 3{,}14 \cdot 0{,}15 \cdot 4{,}2 \frac{\sqrt{0{,}0005}}{15} = 0{,}00295,$$

или с округлением 0,003 *м³/сек*.
Сравним q с E:

$$q = 0{,}0025 \ м^3/сек; \quad E = 0{,}003 \ м^3/сек.$$

Разница

$$E - q = \frac{0{,}003 - 0{,}0025}{0{,}003} \cdot 100 = 17\% -$$ запас для надежности установки.

Таковой запас совершенно необходим по следующим соображениям:
1. Грунт достаточно мелкозернистый, благодаря чему сопротивление фильтра может быть значительным.

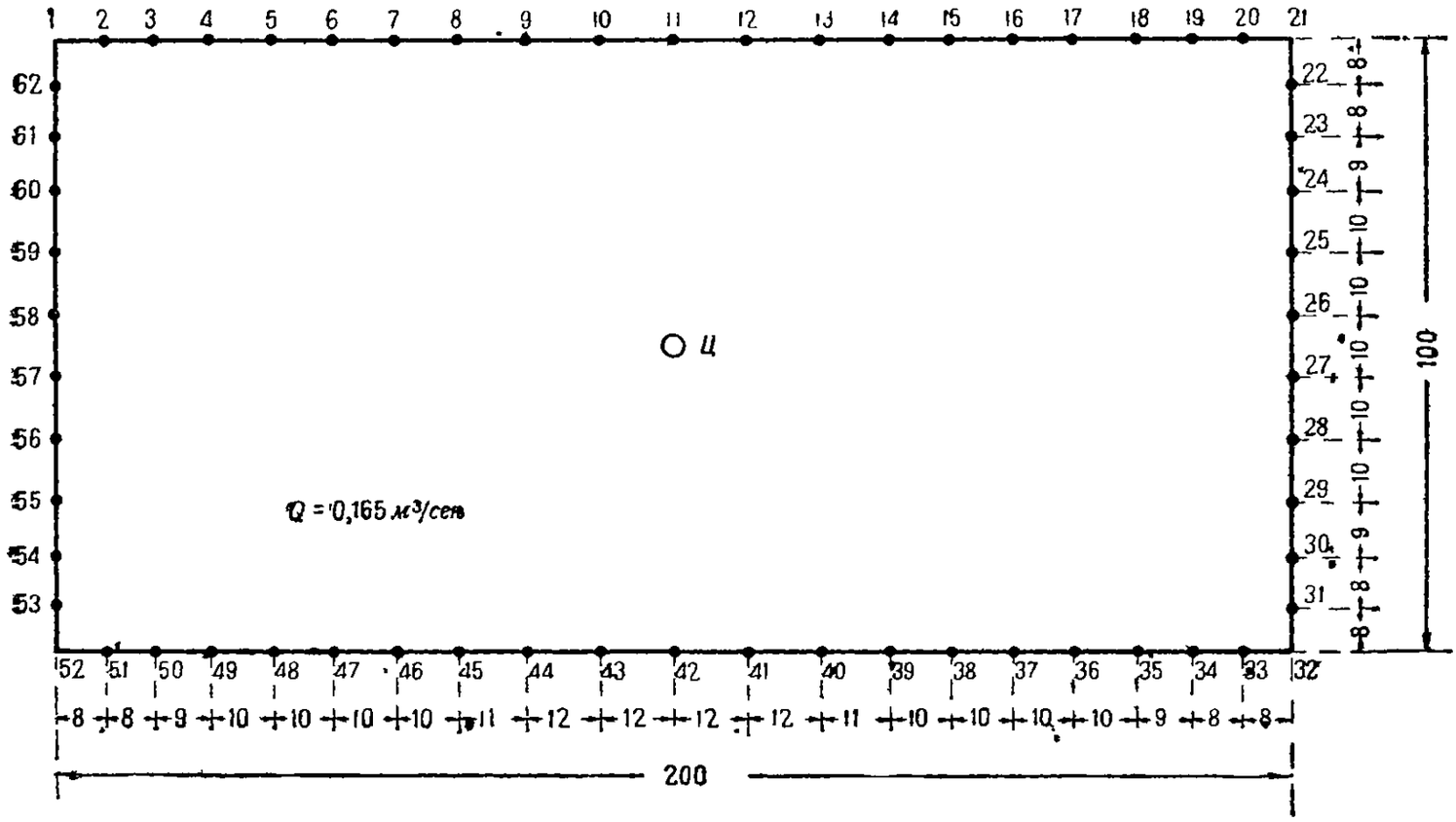


Рис. 112

2. Приняты все колодцы полными, на самом деле они не полны, так как средняя отметка водонепроницаемой глины лежит ниже отметки дна колодцев. При больших котлованах, с каковым мы имеем дело в нашем примере (2 *га*), необходимо к исчисленному общему дебиту прибавить 15—20% (по Зихардту) — в среднем 17%, т. е. в данном случае вместо $Q = 0{,}140 \ м^3/сек$ считать $Q = 0{,}165 \ м^3/сек$.

Третий вариант расположения колодцев показал большую равномерность понижения уровня грунтовых вод на всей площади установки; а, поэтому его следует считать теоретически наилучшим.

Однако расчет производился в предположении идеально равномерного грунта и ровных горизонтальных поверхностей водонепроницаемой постели водоносного слоя и непонижженного уровня грунтовой воды. В действительности такие идеальные условия редко могут иметь место при указанном расположении колодцев. Поэтому возможно неодинаковое понижение уровня

грунтовой воды в различных точках котлована. Особенно можно ожидать подъема уровня воды близ середины сторон периметра установки.

Поэтому практически при одноярусных установках с глубиной колодцев 10 *м* и при требуемой глубине понижения уровня воды 5 *м* обыкновенно не решаются увеличивать расстояние между колодцами до 15 *м*, а допускают не более 10—12 *м*.

Если мы примем расстояние 12 *м*, то должны в середине сторон полигона добавить еще четыре колодца, т. е. установить всего 60 колодцев, которые расположатся почти так же, как на рис. 111, с той только разницей, что на длинных сторонах они будут на расстояниях максимум 12 *м*. Еще надежнее было бы добавить по одному колодцу и на торцевых сторонах, т. е. сделать там расстояния между колодцами не более 10 *м*. Тогда практически потребовалось бы всего 62 колодца, т. е. почти столько же, сколько было принято в первом варианте, но иначе расположенных.

На этом четвертом варианте (практическом) и заканчиваем распределение колодцев (рис. 112).

Если бы уклон естественной поверхности грунтовых вод оказался значительным или если бы грунт был столь неравномерен, что в отдельных участках котлована можно было бы ожидать более усиленного притока воды, чем в других, тогда колодцы пришлось бы располагать особо, применительно к особым случаям, разобранным в § 7—10 главы III.

ГЛАВА VII

ПРОИЗВОДСТВО ИСКУССТВЕННОГО ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

§ 1. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАНЦИИ

Производство понижения требует очень тщательного надзора и самого активного управления. Приходится отдельные колодцы выключать или регулировать задвижками их подачу, чтобы получить равномерное понижение — с одной стороны, а с другой, — не допускать срыва струи воды во всасывающих трубах.

В установке с несколькими насосными агрегатами приходится регулировать и работу последних. При ярусном понижении приходится соблюдать наиболее целесообразное взаимодействие ступеней или отдельных частей их.

Ясно, что это управление может выполняться тем успешнее, чем лучше организовано наблюдение. Наблюдение уровня воды при помощи нескольких наблюдательных скважин, а равно и нескольких фильтрационных колодцев, должно быть сосредоточено в одном месте, чтобы руководящее лицо могло видеть перед собою картину понижения и своевременно отдавать все необходимые распоряжения в порядке управления установкой. Каждый насос должен быть снабжен вакуумметром и манометром, чтобы машинист мог регулировать водоотлив. Обыкновенно на современных установках все указанные приспособления имеются, но к сожалению не производится целого ряда наблюдений, которые имеют важное значение для накопления опыта. Так. например, часто не производится измерение дебита установки и отдельных ее частей, расхода энергии (кроме электрической, когда за нее приходится платить по счетам).

Такие наблюдения, особенно производящиеся непрерывно (при помощи самопишущих приборов), в связи с систематическими записями положения уровня воды в колодцах и наблюдательных скважинах, дают важный материал как для практики, так и для теории способа понижения.

Наряду с чисто теоретической разработкой вопроса движения грунтовых вод накопление опыта и обработка получаемых наблюдений при произведенных понижениях с освещением имеющихся там геологических, гидрологических и прочих местных условий должны сыграть большую роль для выработки более надежных методов проектирования установок понижения.

В настоящее же время к сожалению теория понижения грунтовых вод не находится на высоте положения, почему и имеют такое огромное

значение пробные понижения, которые однако являются иногда с экономической стороны обременительными.

Все те наблюдения, которые следует производить на пробных установках, можно и должно производить и на эксплоатационных установках. Тогда эти установки будут служить лучшим видом опытных установок по отношению к дальнейшим установкам в аналогичных условиях, а научная разработка способа понижения сможет опираться на данные, полученные непосредственно из практики.

§ 2. ЗАТРУДНЕНИЯ ПРИ ПОНИЖЕНИИ И МЕРЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Затруднения при производстве понижения грунтовых вод могут происходить как от природных, так и от искусственно созданных причин. Часть из этих причин уже упоминалась выше, как например слоистое сложение грунтов, когда тонкие водонепроницаемые прослойки перемежаются с тонкими водоносными слоями. Если водоносные слои очень тонки, то это делает почти или совершенно невозможным осушение грунта. Так как при бурении эти прослойки могут быть иногда не замечены, то это может явиться причиной возникновения различных неожиданностей и затруднений. Отчасти эти затруднения могут быть устранены установкой добавочных водозаборных или вертикальных дренажных колодцев, соединяющих различные водоносные слои.

Но так как эта мера связана с удорожанием установки, а в то же время при очень тонких водоносных слоях все равно не удается извлечь из этих слоев всю воду и следовательно достигнуть полного осушения грунта, то приходится довольствоваться только понижением напора воды в этих слоях.

Большие затруднения может вызвать прорыв в котлован воды из соседнего водоема через насыпной или естественный сильно проницаемый материал (гравий, щебень, шлак и т. д.). В таком случае создаются большие затруднения, устранение которых почти всегда связано с большими потерями времени и удорожанием работ. К мерам устранения подобных затруднений относятся забивка металлических свай для образования непроницаемой перемычки, закладка колодцев большого диаметра и откачка из них воды, а также цементация или силикатизация грунта через спешно пробуренные скважины.

Так как эти меры очень сложны, требуют времени и дополнительных средств, а вместе с тем иногда внезапное образование прорыва может причинить большие убытки, то в подобных случаях предварительные изыскания должны производиться особо тщательно, чтобы иметь возможность предусмотреть и обеспечить борьбу с прорывом воды.

Что касается затруднений, связанных с самой эксплоатацией установки, то из таких прежде всего должны быть названы обрывы струи, особенно вероятные при содержании в грунтовой воде растворенных газов. Если почему-либо возможность таких обрывов не была учтена заранее, то это затруднение придется устранять введением в сеть всасывающих трубопроводов газоотделительной установки.

Второе часто случающееся затруднение — закупоривание фильтров глиной, окислами железа или извести, вызывающее увеличение сопротивления выше допускаемого предела и даже полный отказ действия колодцев.

Если засорение фильтров не очень велико и своевременно замечено, то иногда помогает введение в колодец поршня и резкое порывистое движение последнего вверх и вниз. При движении поршня вверх в колодце образуется вакуум, и грунтовая вода с большой скоростью устремляется через

отверстия фильтра в колодец. При движении поршня вниз он оказывает давление на поверхность воды в колодце, и вода с большой скоростью проникает из колодца в грунт. В результате многократного движения поршня удается иногда частично промыть фильтр.

Известно также много других способов по промывке и прочистке колодцев. Например Принц указывает приспособление для образования толчков в окружающем колодец грунте при помощи пара, вводимого в колодец и действующего толчками. Такое же толчкообразное действие можно производить подачей сжатого воздуха внутрь колодца. Принц указывает также приспособление для толчкообразной промывки колодца водой.

Это приспособление (рис. 113) состоит из ящика k, насаженного на всасывающую трубу колодца s (без всасывающего клапана на конце) и снабженного клапаном v, стеклянной водомерной трубкой w и отводной трубкой A, присоединенной к всасывающему трубопроводу. Открывается кран трубки A, и ящик k наполняется водой. Как только ящик наполнится водой, кран у трубки A закрывается, а запорный клапан v сразу открывается. Тогда вся содержащаяся в ящике вода прорывается внутрь колодца, производя желаемый толчок на окружающий колодец грунт.

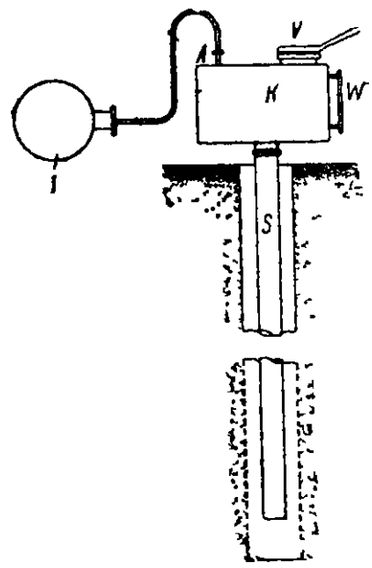


Рис. 113.

Иногда промывку фильтра производят путем подачи воды под напором через особые трубки с отверстиями, установленные снаружи колодца, а также путем продувки сжатым воздухом через дырчатые трубки, установленные снаружи фильтра.

Очистка фильтра от железистых и известковых выделений на сетке фильтра (инкрустации) иногда удается при помощи промывки колодца слабым раствором соляной кислоты, вводимой как внутрь колодца, так и через наружные трубки. Удаление осадка, образующегося на стенках колодца, иногда можно произвести при помощи шланга с особым наконечником, снабженным отверстиями, через которые под большим давлением вода промывает стенки колодца.

Действие такого шланга усиливается специальными стальными щетками, которые прикрепляются к наконечнику шланга.

Все перечисленные и многие другие применяемые для прочистки колодцев средства не всегда достигают цели, или достигают ее на короткое время действия фильтра.

Более радикальной мерой является вытаскивание фильтра и замена его новым, что однако затруднительно и равносильно установке колодца заново. Отсюда еще раз выясняется, насколько важно внимательное проведение предварительных изысканий, которые должны обнаружить присутствие в грунте веществ, могущих вызвать закупоривание фильтров, а следовательно и подсказать необходимость соответствующего конструирования колодцев (например применение обсыпки гравием, устранение сетки, замена металлического фильтра деревянным и т. п.). Одним из серьезнейших затруднений может оказаться также вынос частиц грунта внутрь колодца через недостаточно частую сетку фильтра. Прежде всего это является причиной накопления грунта внутри колодца и стеснения рабочего пространства, а затем и причиной засорения трубопроводов, увеличения сопротивления в них и в насосах и порчи последних благодаря истиранию внутренних поверхностей. Наконец это может вызвать оседания почвы под существующими строениями и принести большие убытки.

В большинстве случаев при песчаном грунте и надлежащем выборе конструкции колодцев понижение не является причиной повреждения зданий и сооружений, что доказано рядом примеров. Например в Шарлоттенбурге при постройке подземной железной дороги в непосредственной близости от собора опасались, что собор будет поврежден во время откачки воды из колодцев. Потребовалось много времени, чтобы на производство понижения дано было разрешение. Понижение было произведено, и никаких следов повреждения ни на соборе, ни на других больших соседних постройках не было обнаружено. Теперь все работы ниже уровня грунтовых вод в Берлине производятся с понижением и не только в непосредственной близости от сооружений, но даже под ними, и не вызывают ни у кого никаких опасений.

Правда, благоприятным условием для производства понижения в Берлине является то обстоятельство, что грунт в большей части города чисто песчаный и довольно крупнозернистый. Кроме того в течение нескольких десятилетий применения понижения там выработался определенный тип колодца и частота сетки, а строители приобрели такой опыт, который почти исключает случайности подобного рода.

В других случаях, когда состав грунта не является однородным и содержит большое количество мелких частиц, может оказаться реальной опасность выноса грунта, что при отсутствии предохранительных мер может вызвать необходимость переделки колодцев. Принимая во внимание, что переделка колодцев вызывает большие расходы и требует большого количества времени, особенно в крупных установках, необходимо перед устройством понижения производить тщательное изучение грунта. Наблюдение за выносом грунта при производстве пробного понижения и выбор конструкции фильтра на основании этих наблюдений должны способствовать предупреждению выноса грунта в окончательной эксплоатационной установке.

С другой стороны, часто понижению приписывают повреждения сооружений, вызванные другими причинами: сотрясениями почвы при забивке свай тяжелыми копрами, слабостью крепления котлована, деформирующегося от бокового давления грунта, выпиранием грунта под давлением залегающей ниже напорной воды и т. п.

Но понижение действительно может служить причиной убытков и даже катастроф, если оно ведется неправильно или небрежно, или когда оно не обеспечено запасным оборудованием.

Так как при применении понижения допускается увеличение крутизны откосов или облегчение крепления котлована, то в случае отказа в действии установки понижения уровень грунтовых вод будет подниматься и может привести к оползанию откосов котлована или обрушению крепления. Если крепление и выдержит, то имеется другая опасность — вынос грунта внутрь котлована через щели в одежде отвесных стен. В результате такого выноса грунта снаружи котлована может происходить опускание почвы и повреждение существующих по соседству зданий и сооружений (вплоть до разрушения их). Поэтому надзор за исправным действием установки, особенно при напорных водах, должен быть очень тщательный, а сама установка должна обладать достаточным запасом водоотливных средств, чтобы справиться с задачей в случае порчи некоторых насосов или в случае ливня.

Особо неприятные последствия могут вызывать внезапные прекращения подачи тока, связанные с авариями на электростанции или в сети. Во избежание таких явлений необходимо иметь на установках понижения по крайней мере два независимых друг от друга и всегда готовых к действию источника энергии.

Для предупреждения возможных затруднений, неожиданностей и неудач при выполнении работ по производству понижения грунтовых вод необходимо принять во внимание следующие условия, которые могут способствовать бесперебойному производству работ:

1. Обслуживание установок понижения должно производиться опытным персоналом.

2. Установка должна обладать известной гибкостью как в смысле хорошего оборудования приборами наблюдения, так и в смысле возможности более или менее широкого и быстрого регулирования действия всех имеющихся водоотливных средств.

3. Предупреждение случайностей и затруднений должно быть предусмотрено на основе надлежащего изучения геологических и гидрологических условий, а также всех прочих природных и искусственных особенностей обстановки.

4. Установка понижения грунтовых вод должна иметь определенный, устанавливаемый опытом резерв водоотливных агрегатов и колодцев, готовых всегда к немедленному пуску в ход.

5. Питание установки энергией должно быть обеспечено не менее чем из двух независимых друг от друга источников.

6. При производстве работ с понижением грунтовых вод необходимо иметь достаточное количество монтажных рабочих с необходимыми инструментами для возможности быстрого ремонта поврежденных элементов установки: насосов, двигателей, стыков трубопроводов, клапанов, электросети и т. п.

§ 3. ОСОБЕННОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ И ПРОЧИХ РАБОТ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ПОНИЖЕНИИ

Задача понижения грунтовых вод состоит главным образом в том, чтобы облегчить отрывку котлована в водоносных грунтах и возведение основания сооружения в сухом котловане, т. е. создать условия, сходные с условиями работы при сухих грунтах.

Там, где при обычном способе работ с открытым водоотливом откосы делались бы весьма отлогими, при понижении они делаются круче — соответственно углу естественного откоса осушенных грунтов.

Там, где для котлованов с вертикальными стенками обычно потребовалось бы шпунтовое непроницаемое для воды и мелких частиц грунта ограждение и загромождающее котлован крепление, при понижении достаточно сделать дощатое ограждение для предупреждения осыпания и обрушения вертикальных стенок, с креплением значительно более легким, рассчитанным на восприятие бокового давления осушенного грунта.

Там, где при открытом водоотливе пришлось бы отрывать грунт в разжиженном состоянии и на дне выемки невозможно было бы установить машины для отрывки и подъема грунта, при понижении возможна работа экскаватором, передвигающимся по дну постепенно углубляемой выемки, а отвозка грунта может производиться вдоль котлована по рельсовым путям. Но и при ручной отрывке производительность земляных работ с понижением грунтовых вод больше, чем при открытом водоотливе, благодаря чему получается значительная экономия.

Остальные строительные работы (изоляция, каменные и бетонные работы) при понижении уровня грунтовых вод удешевляются и могут быть выполнены вполне тщательно.

При производстве глубинных работ в густо населенных местностях иногда чрезвычайно остро стоит вопрос о возможно меньшем стеснении движения по улице или площади.

Понижение уровня грунтовых вод, позволяя не загромождать внутреннее пространство котлована креплением, а также давая возможность передвижения земли и прочих грузов по дну котлована, тем самым облегчает производство земляных и всех остальных работ под перекрытием, над которым может происходить обычное движение — трамвая, автомобилей, пешеходов и т. д.

При секретных работах военного значения в населенных и ненаселенных местах перекрытие может быть такой легкой конструкции, чтобы служить только маскировкой, не имея того конструктивного значения, какое должно иметь перекрытие для обеспечения движения по нему людей и грузов.

При работе под перекрытием насосные установки, трубопроводы и прочие предметы оборудования установки понижения также могут располагаться в котловане, так что вся постройка может быть, будучи полностью механизированной, скрыта от наблюдения и не стеснять движения на поверхности.

Наконец понижение уровня грунтовых вод, приводящее грунты в состояние, свойственное сухим (в строительном смысле) грунтам, делает возможным производство работ тоннельным способом, каковой в известных случаях может оказаться единственно возможным.

План производства работ находится в существенной зависимости от плана понижения грунтовых вод. Смотря по местным условиям, план работ и способы производства их иногда значительно отличаются от обычных (при сухих грунтах или при открытом водоотливе), а иногда даже самое сооружение приходится проектировать с учетом возможности понижения грунтовых вод.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛНЕННЫХ ПОНИЖЕНИЙ

1. Понижение грунтовых вод при постройке шлюза Flaesheim

В течение 1925—1926 гг. была произведена крупная работа с понижением грунтовых вод при постройке шлюза на 47-м километре судоходного канала Везель-Даттельн близ селения Flaesheim в Германии.

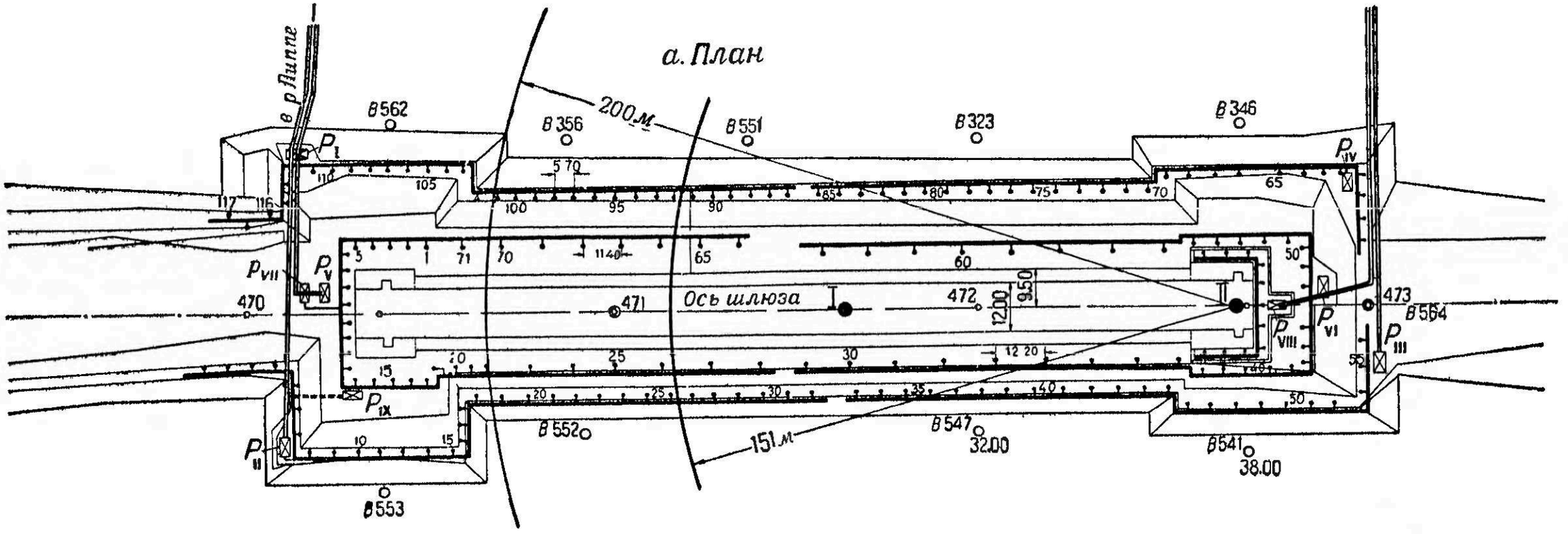
Грунт места постройки предварительно был на большую глубину обследован бурением. Под растительным слоем и отложениями глины средней мощности в 1 *м* залегает мелкий песок флювиогляциального происхождения, содержащий в верхних слоях отдельные включения мелкозернистого гравия, окрашенного солями железа в коричневый цвет. Под этими песками залегают также мелкозернистые верхнемеловые пески, которые по имеющимся сведениям на глубине 90 *м* подстилаются мергелем.

Полученные бурением данные в общих чертах подтвердились при отрывке канала и котлована для шлюза.

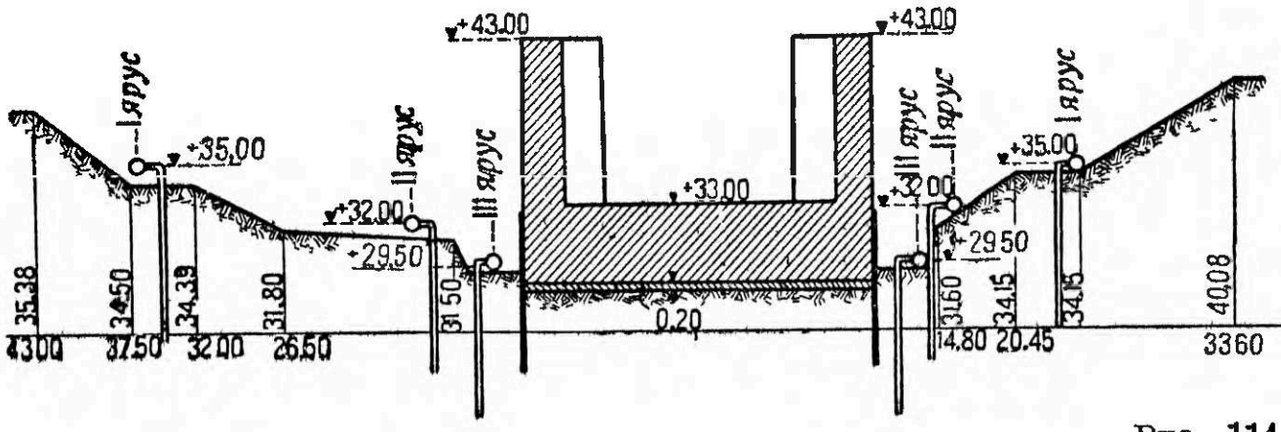
Уровень грунтовых вод вообще колеблется в зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков и в среднем по наблюдениям в течение 16 лет лежит на абсолютной отметке + 35,50 *м*, т. е. на 3,50 *м* ниже поверхности земли.

Шлюз Flaesheim имеет полезную длину 225 *м*, ширину 12 *м*, высоту боковых стенок 10 *м*; толщина подушки камеры 3,45 *м*. Отметка дна котлована камеры и нижней головы + 29,35 *м*, а отметка дна котлована верхней головы + 27,95 *м* (рис. 114, *а*, *б*, *в*).

Отрывка котлована производилась экскаваторами, причем сначала на глубину 4,50 *м*, т. е. до отметки + 34,50, с помощью открытого водоотлива. Дальнейшая отрывка при открытом водоотливе оказалась невозможной благодаря оплыванию откосов, и поэтому пришлось применить предварительное понижение грунтовых вод.



в. Поперечный разрез через верхнюю голову



б. Поперечный разрез через средину камеры

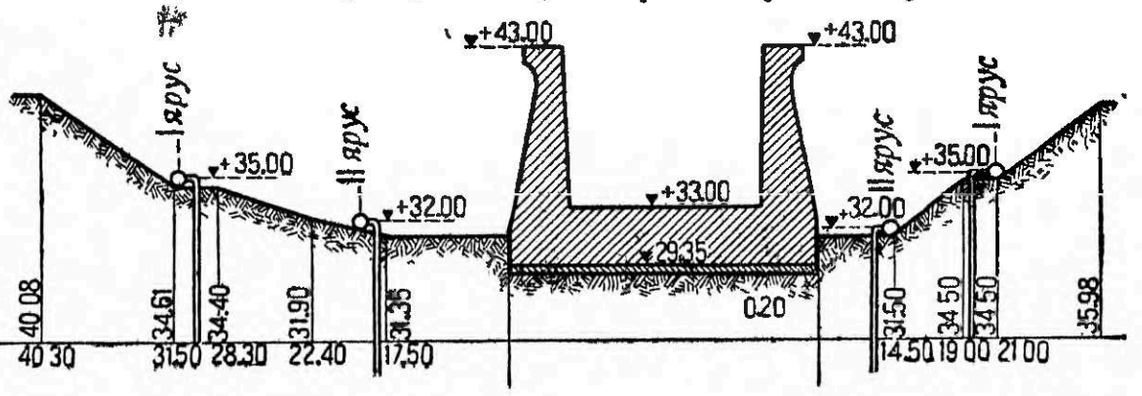


Рис. 114

Прежде чем приступить к понижению, было составлено несколько вариантов проекта установки, причем в основу были положены опытные данные, добытые при производстве понижения грунтовых вод для постройки дюкеров Шрамберг и Гернебах, находящихся недалеко от места расположения шлюза. По этим данным коэфициент проницаемости грунта составлял $k = 0{,}0003$ *м/сек*. По наблюдениям степени заиления фильтров на этих установках были выбраны конструкция и размеры колодцев проектируемой установки.

После изменений в окончательном проекте установка в действительности приняла следующий вид (рис. 114, *а*, *б*, *в*).

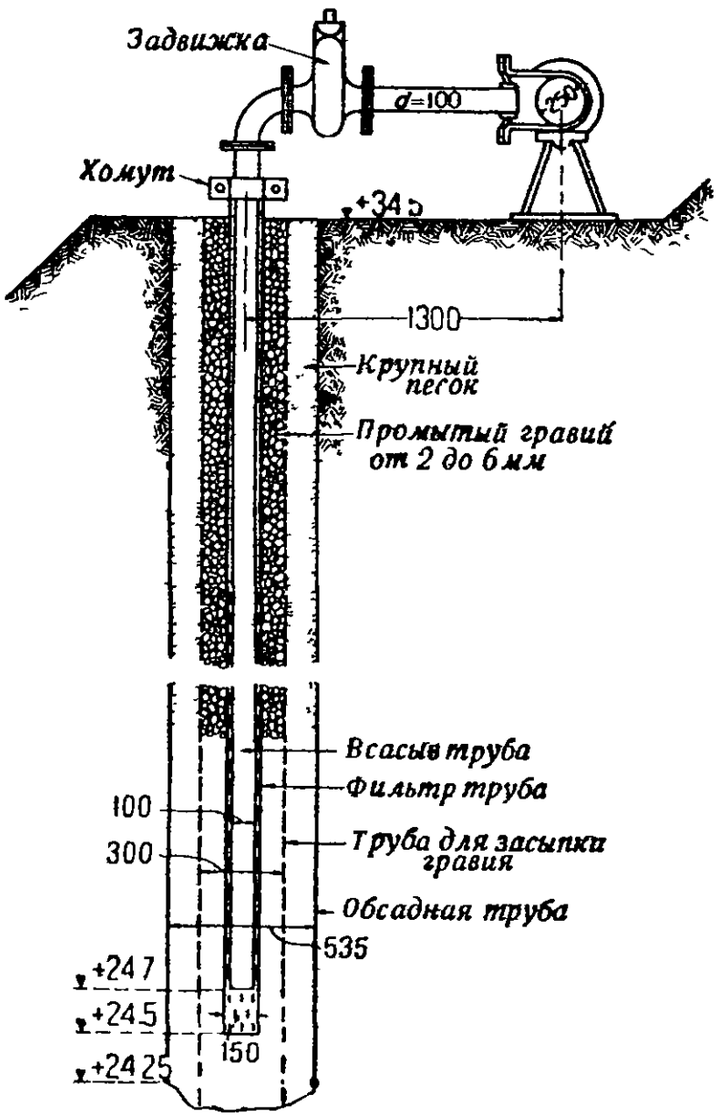


Рис. 115

Вся установка состояла из трех ярусов. Первый ярус состоял из 117 колодцев с устьями на отметке + 34,50 *м*, глубиною 10 *м*, т. е. с подошвой на отметке + 24,50 *м*. Фильтры состояли из труб диаметром 150 *мм* с щелевидными отверстиями шириною от 2 до 2,5 *мм*, без сетки, но с обсыпкой снаружи двумя концентрическими фильтрующими слоями, из коих внутренний толщиною 75 *мм* состоял из просеянного гравия крупностью от 2 до 6 *мм* и наружный толщиною 100 *мм* — из гравия и овражного песка крупностью до 1 *мм*; диаметр обсадной трубы 533 *мм*. Конструкция колодца показана на рис. 115.

Расстояния между колодцами со стороны р. Липпы, находящейся на расстоянии 80—100 *м* от края котлована, были приняты 5,7 *м*, а с противоположной стороны — 6,7 *м*.

Каждая всасывающая труба диаметром 100 *мм* была снабжена приемным клапаном и задвижкой для включения и выключения колодца. Всасывающий (диаметр 250 *мм*) и нагнетательный (диаметр 300 *мм*) трубопроводы состояли из железных сварных труб с приваренными буртиками и надвижными фланцами, уплотнявшимися при помощи картонных промасленных прокладок.

Для откачки воды в первом ярусе были установлены четыре электроцентробежных насоса Зульцера ($P_{\text{I}} - P_{\text{IV}}$ — рис. 114, *а*), каждый диаметром 250 *мм* и производительностью 6 $м^3$/*мин* при высоте подъема 20 *м*, приводившиеся в действие посредством ременного привода быстроходными электромоторами мощностью 55 *л. с.*

Засасывание воздуха производилось вакуумнасосами системы «Эльмо» завода Сименс-Шуккерт в Нюренберге (2880 об/мин), соединенными на одном валу с мотором 1,5 kW.

К насосам $P^{\text{I}} - P_{\text{IV}}$ были присоединены отдельные группы, состоящие соответственно из 32, 32, 24 и 29 колодцев, причем всасывающие трубо-

проводы всех групп не были соединены в замкнутое кольцо, а каждый проложен отдельно с небольшим подъемом к своему насосу.

При помощи установки I яруса уровень грунтовой воды в середине котлована (точка *I*) был понижен до отметки + 31,00, т. е. на глубину $s = 4{,}55$ *м*. При естественном уровне грунтовых вод + 35,55 и уровне подошвы колодцев + 24,50 высота непонижeнного уровня $H = 35{,}54 - 24{,}50 = 11{,}05$ *м*.

Для определения R воспользуемся формулой (39):

$$R = 575 \cdot 4{,}55 \sqrt{11{,}05 \cdot 0{,}0003} = 151 \text{ м}; \quad \lg R = 2{,}17898.$$

Измерив по плану расстояние точки *I* от каждого из колодцев, получаем:

$$\lg x_c = \sqrt[117]{x_1 x_2 \ldots x_{117}} = 1{,}87967 \text{ или } x_c = \sqrt[117]{x_1 x_2 \ldots x_{117}} = 75{,}8.$$

Общий дебит всех колодцев, если принять, что все колодцы подают одинаковые количества воды, был бы:

$$Q = \frac{(2H - s)\, s \cdot 1{,}36 \cdot k}{\lg R - \lg x_c} = \frac{(2 \cdot 11{,}05 - 4{,}55)\, 4{,}55 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0003}{2{,}17898 - 1{,}87967} = 0{,}111 \quad м^3/сек.$$

Следовательно дебит каждого колодца:

$$q = \frac{111}{117} = 0{,}95 \text{ л/сек}.$$

Определим понижение уровня в центре котлована верхней головы (точка *II*).

На положение уровня грунтовых вод в точке *II* могут влиять только те колодцы, которые расположены не далее, чем на 151 *м* от нее. Число таких колодцев, как показано на рис. 114, *а*, 65 шт., а именно от № 27 до 91 включительно.

Вычисление по измеренным непосредственно на плане расстояниям дает:

$$\lg \sqrt[65]{x_{27} x_{28} \ldots x_{91}} = 1{,}8122.$$

Если положить, что все эти 65 колодцев также дают воды по 0,95 *л/сек*, то общий дебит их составит:

$$Q = 0{,}00095 \cdot 65 = 0{,}06175 \quad м^3/сек.$$

Высота пониженного уровня в точке *II* получится:

$$y_{II} = \sqrt{H^2 - \frac{Q\left[\lg R - \frac{1}{65} \lg (x_{27} \ldots x_{91})\right]}{1{,}36 \cdot k}} =$$

$$= \sqrt{122 - \frac{0{,}06175 \cdot 0{,}36678}{1{,}36 \cdot 0{,}003}} = 8{,}10.$$

Достигнутое понижение следовательно тогда составило бы:

$$s_{II} = 11{,}05 - 8{,}10 = 2{,}95 \text{ м},$$

что конечно было бы недостаточно для установления колодцев II яруса. Поэтому из колодцев следовало откачивать воды больше, чем по 0,95 *л/сек*.

Чтобы достигнуть требуемого понижения 4,55 *м* также и в верхней голове, пришлось бы откачивать из всех 65 колодцев количество воды:

$$Q_{65} = \frac{(2 \cdot 11{,}05 - 4{,}55)\, 4{,}55 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0003}{\lg 151 - 1{,}8122} = 0{,}0887 \quad м^3/сек,$$

т. е. из каждого в среднем $\frac{88,7}{65} = 1,365$ *л/сек*. Из всех вместе 117 колодцев пришлось бы откачивать $1,365 \cdot 117 = 160$ *л/сек*.

В действительности дебит установки I яруса колебался от 143 до 160 *л/сек*.

Так как для понижения уровня грунтовых вод в середине котлована камеры $s = 4,55$ *м* достаточно было бы дебита I яруса 111 *л/сек*, то усиление водоотлива было произведено за счет увеличения дебита колодцев, окружающих головы шлюзов.

По мере того как дно выемки достигало отметки + 31,50, т. е. на 0,50 *м* выше пониженного уровня, устраивались на откосах котлована колодцы II яруса. Всего было установлено 71 колодец: на длинных сторонах камеры шлюза на взаимном расстоянии 11,40 *м*, а вокруг голов шлюза — на расстоянии 5,70 *м*. Такое сгущение колодцев вокруг голов шлюза объясняется, во-первых, общей необходимостью сгущать колодцы на торцевых концах вытянутого в плане котлована для достижения равномерного понижения уровня на всей площади, во-вторых, необходимостью более глубокого заложения подошв голов шлюза, что особенно было существенно для верхней головы, подошву которой потребовалось углубить на 1.55 *м* ниже подошвы камеры. В нижней голове условия оказались значительно более благоприятными, чем в верхней, так как канал на участке, соприкасающемся с нижней головой, был отрыт еще ранее и продолжительное время поддерживался в осушенном состоянии, в то время как со стороны верхней головы к отрывке канала еще не приступали. Здесь грунтовая вода имела уже сама по себе более высокий уровень, а также сильнее чувствовался приток воды из р. Липпы.

Поэтому в то время как в нижней голове понижение могло быть достигнуто при помощи только сгущения колодцев и установки добавочного насоса P_{VII}, в верхней голове потребовалась установка дополнительного III яруса, заложенного на 2 *м* глубже устьев колодцев II яруса и состоящего из 11 колодцев, обслуживаемых особым насосом (P_{VIII}). Сначала же были предусмотрены для откачки воды из колодцев II яруса (71 шт.) два насоса: P_V — для 36 колодцев и P_{VI} — для 35 колодцев.

После пуска в действие насосов II яруса первый ярус был выключен, так что для дальнейшего понижения уровня (до отметки + 28,50 *м* в котлованах голов шлюза) служил только II ярус колодцев.

Произведем расчет II яруса.

Подошвы колодцев II яруса были расположены на отметке + 21,50, следовательно для II яруса:

$$H_2 = 35,55 - 21,50 = 14,05 \text{ м}.$$

Предел действия определим по формуле (39):

$$R = 575 \cdot 7,05\sqrt{14,05 \cdot 0,0003} = 260 \text{ м}.$$

Для определения количества воды, которое требуется откачивать в единицу времени из всех колодцев для понижения уровня в центре тяжести площади установки II яруса (точка *I*), следует принять во внимание, что р. Липпа находится на расстоянии $a = 100$ *м* от оси шлюза.

Так как $100 < \frac{R}{2}$, то следует применить уравнение (55):

$$H_2^2 - y^2 = \frac{Q}{\pi k}\left[\ln 2a - \frac{1}{n}\ln(x_1 x_2 \ldots x_n)\right]$$

или:

$$Q = \frac{(2H_2 - s)\, s \cdot 1{,}36 \cdot k}{\lg 2a - \frac{1}{n} \lg (x_1 x_2 \ldots x_n)},$$

где $a = 100$ *м*, $\lg 2a = 2{,}30103$ и $\frac{1}{71} \lg (x_1 x_2 \ldots x_n) = 1{,}82793$.

На положение уровня в точке *I* оказывают влияние все колодцы II яруса, так как все они находятся в пределах круга радиуса $R' = 200$ *м* $= 2a$. Произведя все подстановки в уравнении для Q, получим:

$$Q = \frac{(2 \cdot 14{,}05 - 7{,}05)\, 7{,}05 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0003}{2{,}30103 - 1{,}82793} = 0{,}128 \text{ м}^3/\text{сек} = 128 \text{ л/сек}.$$

Следовательно дебит каждого колодца составил бы:

$$q = \frac{128}{71} = 1{,}8 \text{ л/сек}.$$

Определим, как и для I яруса, понижение уровня в точке *II* верхней головы. Проведя дугу радиусом 200 *м* (рис. 114, *а*), мы видим, что на точку *II* оказывают влияние 49 колодцев — № 22—70, а остальные 22 колодца не влияют:

$$\lg \sqrt[49]{x_{22} x_{23} \ldots x_{70}} = 1{,}75526.$$

Если каждый из этих 49 колодцев дает также 1,8 *л/сек*, то общий их дебит составит:

$$Q = 1{,}8 \cdot 49 = 0{,}088 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Высота пониженного уровня в точке *II* получится:

$$y_{II} = \sqrt{H^2 - \frac{Q\left[\lg R - \frac{1}{49} \lg (x_{22} x_{23} \ldots x_{70})\right]}{1{,}36 \cdot k}} =$$

$$= \sqrt{14{,}05^2 - \frac{0{,}088\,(2{,}30103 - 1{,}75526)}{1{,}36 \cdot 0{,}0003}} = 9 \text{ м}.$$

Следовательно достигнутое понижение в точке *II* будет: $s_{II} = 14{,}05 - 9 = 5{,}05$ *м*, что совершенно недостаточно, так как требуется $s_{II} = 7{,}05$ *м*.

Поэтому из каждого колодца следовало откачивать воды больше, чем 1,8 *л/сек*.

Чтобы понизить уровень воды в точке *II* от первоначального уровня на 7,05 *м*, следовало из всех 49 колодцев вместе откачивать:

$$Q_{49} = \frac{(2 \cdot 14{,}05 - 7{,}05)\, 7{,}05 \cdot 1{,}36 \cdot 0{,}0003}{2{,}30103 - 1{,}75526} = 0{,}115 \text{ м}^3/\text{сек},$$

т. е. из каждого в среднем:

$$q = \frac{115}{49} = 2{,}45 \text{ л/сек}.$$

Из всех 71 колодца следовало откачивать: $Q = 2{,}45 \cdot 71 = 167$ *л/сек*.

На самом деле, из колодцев II яруса откачивалось (по описанию) от 160 до 170 *л/сек*.

Отметка дна колодцев II яруса + 21,50. Уровень воды в центре верхней головы понижен до отметки + 28,50. Допустим, что уровень воды непосредственно у наружной поверхности окружающих верхнюю голову колодцев понизился глубже на 1 *м*, чем в центре головы, т. е. до отметки 27,50 *м* (допущено с запасом). Тогда:

$$y_0 = 27{,}50 - 21{,}50 = 6 \ м.$$

Определим производительность колодца по формуле Зихардта:

$$E = \pi d_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15} = 3{,}14 \cdot 0{,}15 \cdot 6 \cdot \frac{\sqrt{0{,}0003}}{15} = 0{,}0032 \ м^3/сек = 3{,}2 \ л/сек.$$

Мы видели выше, что средний дебит каждого колодца — $q = 2{,}45$ *л/сек*.

Таким образом окружающие головы шлюза колодцы можно нагрузить сверх среднего дебита еще на 30%, что, повидимому, и пришлось сделать в действительности, но зато снизить дебит каждого колодца в середине длинных сторон котлована камеры шлюза до 1,8 *л/сек*.

Вся работа по понижению протекала в таком порядке.

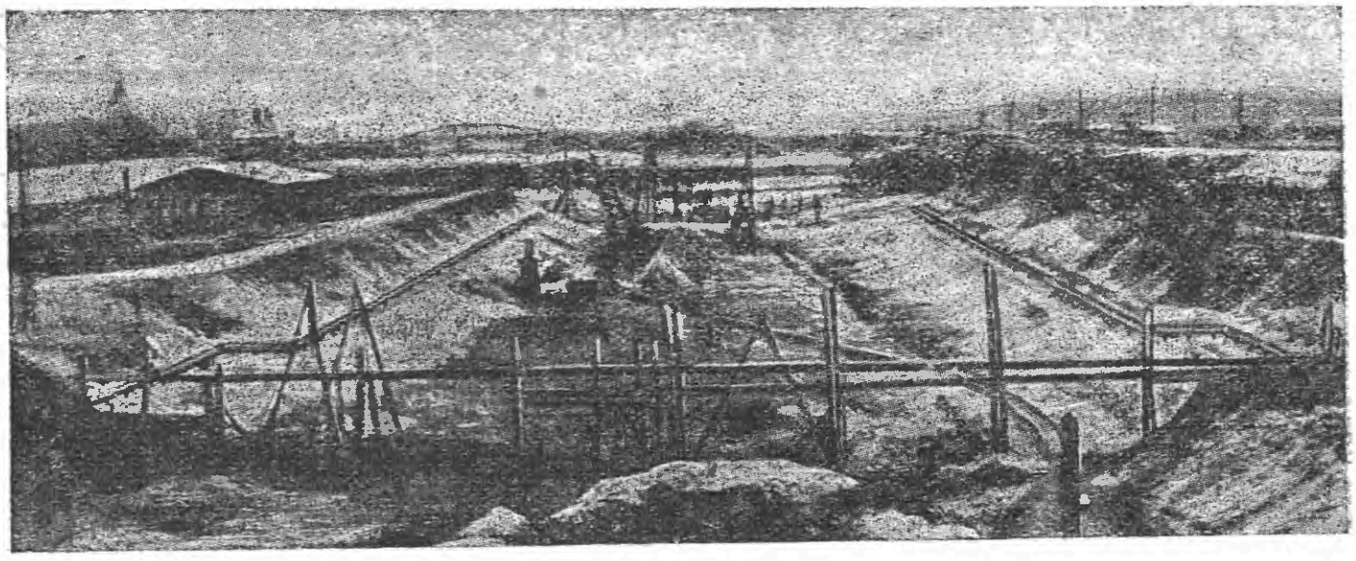


Рис. 116

После того как находящийся на абсолютной отметке + 35,50 уровень грунтовых вод был понижен при помощи открытого водоотлива до отметки + 33,60 *м*, 7 января 1925 г. было приступлено к буровым работам для колодцев I яруса. Буровые работы производились при помощи восьми буровых комплектов.

К 28 февраля, т. е. в течение 45 дней, было установлено 114 колодцев, следовательно на установку каждого колодца потребовалось в среднем три дня, или успех бурения — около 3,5 *м* в рабочий день.

8 марта установка была пущена в ход, и дальнейшие земляные работы производились под ее защитой. В этой стадии работы показаны на рис. 116.

Бурение колодцев не представило никаких затруднений и было произведено без серьезных препятствий, но вытаскивание обсадных труб оказалось весьма затруднительным, так как в некоторых скважинах они были так сильно зажаты снаружи грунтом, что их нельзя было вытащить очень сильными лебедками. Приходилось в таких случаях у самой наружной поверхности труб бурить скважины малого диаметра, ослаблявшие давление грунта на обсадные трубы, после чего вытащить последние было сравнительно легко. Для бурения употреблялись желонки диаметром 250 *мм* с поршневым клапаном (так называемый песочный насос).

Источники энергии. Основным источником энергии служила специальная электростанция с двумя двигателями Дизеля в 100 и 150 *л. с.* В качестве резерва служило присоединение к проходящей неподалеку электромагистрали, и на месте постройки были установлены трансформаторы для понижения напряжения с 10 000 до 380/220 V.

Наблюдения. Откачиваемое количество воды регистрировалось самопишущим прибором, установленным на водосливе.

Для наблюдения за понижающим действием установки по четырем поперечникам были установлены в скважинах диаметром 120 *мм* наблюдательные колодцы, состоящие из железных труб с щелевидными отверстиями и снабженные сеткой.

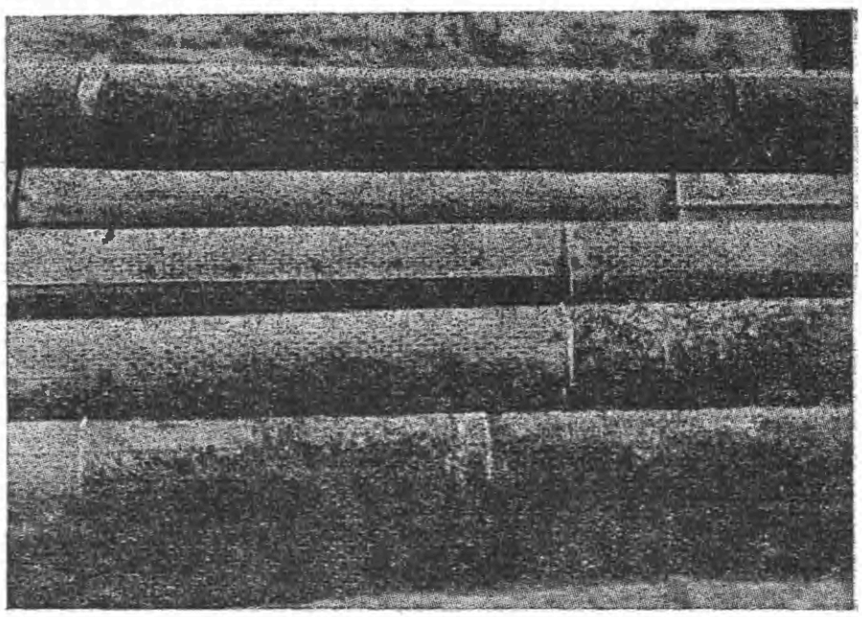


Рис. 117

Коэфициент полезного действия установки колебался от 21,5 до 43%. Правда, ввиду того что насосы не были снабжены вакуумметрами и манометрами, высоту подъема пришлось определять от уровня воды в колодцах до уровня на водосливе, что не является правильным, так как уровень воды в колодцах сильно колеблется.

Если считать за высоту подъема разность между уровнем воды на водосливе (+ 43,00) и пониженным уровнем воды в колодцах (в среднем + 28,00), то при среднем потреблении электроэнергии 0,132 kWh на 1 $м^3$ воды средний коэфициент полезного действия установки за все время ее действия получается:

$$\eta = \frac{1000 \cdot 15}{75 \cdot 0{,}132 \cdot 3600 \cdot 1{,}36} = 0{,}31.$$

Хотя этот коэфициент полезного действия и является низким, но надо иметь в виду необходимость безусловной надежности действия ввиду важности сооружения и особенностей обстановки (близость р. Липпы с резким колебанием уровня в связи с частыми ливнями). Вследствие этого насосы должны были быть более мощными, чем требовалось для среднего за все время количества откачиваемой воды.

Разборка установки производилась планомерно. Прежде всего после бетонирования подушки верхней головы был разобран III ярус, затем II и наконец I ярус. Вытаскивание фильтрационных колодцев совершалось без задержек.

Оказалось, что некоторые фильтрационные трубы были сильно забиты гидратом окиси железа, в то время как на других был обнаружен едва заметный осадок (рис. 117), что объясняется главным образом различным составом грунтовых вод в различных пунктах установки.

2. Понижение уровня грунтовых вод на заводе им. Дзержинского в г. Каменском

В 1929—1930 гг. стройобъединением Индустрой в большом масштабе было применено искусственное понижение уровня грунтовых вод при постройке подземных бункеров коксовой установки металлургического завода

им. Дзержинского в г. Каменском. Подземные бункеры надлежало построить в расстоянии около 200 *м* от берега Днепра. Отметка поверхности земли на месте постройки во время работ была + 54,00 ÷ 55,00 над уровнем Черного моря и после окончания сооружения должна была быть повышена рефулированием до + 60,50 *м*.

Уровень грунтовых вод при меженнем уровне в Днепре держался на отметке + 50,00 ÷ 51,00. Во время весеннего половодья уровень воды в Днепре поднимается до + 54 ÷ 55,00 с одновременным подъемом грунтовых вод. Основание подземных бункеров должно было быть заложено на отметке + 43,57, т. е. на 7,43 *м* ниже нормального горизонта грунтовых вод.

Грунт от самой поверхности земли до уровня грунтовых вод (+ 51,00) — мелкий песок с прослойками ила и местами — глины, а ниже уровня грунтовых вод, приблизительно до отметки + 40,00 — чистый среднезернистый песок с преобладающим зерном 0,25—0,5 *мм*.

При таких условиях проходки котлована для подземных бункеров потребовалось применение ограждающих котлован шпунтовых железных стенок и такой организации водоотлива, которая не допускала бы выпирания дна котлована и высасывания грунта из-под соседних уже построенных сооружений — коксосортировки и углесортировки.

Открытый водоотлив со дна котлована создавал опасность таких явлений и затруднял производство земляных работ в насыщенных водою песках. Поэтому был применен способ искусственного понижения уровня грунтовых вод.

Вся установка должна была по первоначальному предположению состоять из двух ярусов трубчатых колодцев глубиною 10 *м*: I ярус с отметкой устьев колодцев + 50,00 с задачей понизить уровень грунтовых вод до отметки + 46,00 и II ярус с отметкой устьев колодцев + 46,25 с задачей понизить уровень грунтовых вод до отметки + 43,25 *м*.

До отметки + 50,00 уровень грунтовых вод предполагалось предварительно понизить при помощи открытого водоотлива, так как при этом угрозы вымывания грунта из-под соседних сооружений не было.

На самом деле этого не оказалось возможным сделать, так как котлован бункеров был затоплен рефулерами, работавшими на подъеме поверхности соседних участков площадки. Поэтому фактически устья колодцев I яруса пришлось расположить на отметке + 53,00, и уровень грунтовых вод при помощи этого яруса удалось понизить только до отметки + 49,50 ÷ 50,00.

Колодцы II яруса удалось установить только с отметки + 50,00 и понизить уровень грунтовых вод до отметки + 47,00. Для понижения уровня до отметки + 43,00 пришлось установить колодцы III яруса.

На площади котлована $53{,}5 \cdot 25{,}2 = 1350$ *м*² первоначально было установлено 35 колодцев I яруса и 55 колодцев II яруса, всего 90 шт. В действительности впоследствии пришлось дополнительно установить колодцы III яруса.

Расположение колодцев I и II ярусов в плане представлено на рис. 118.

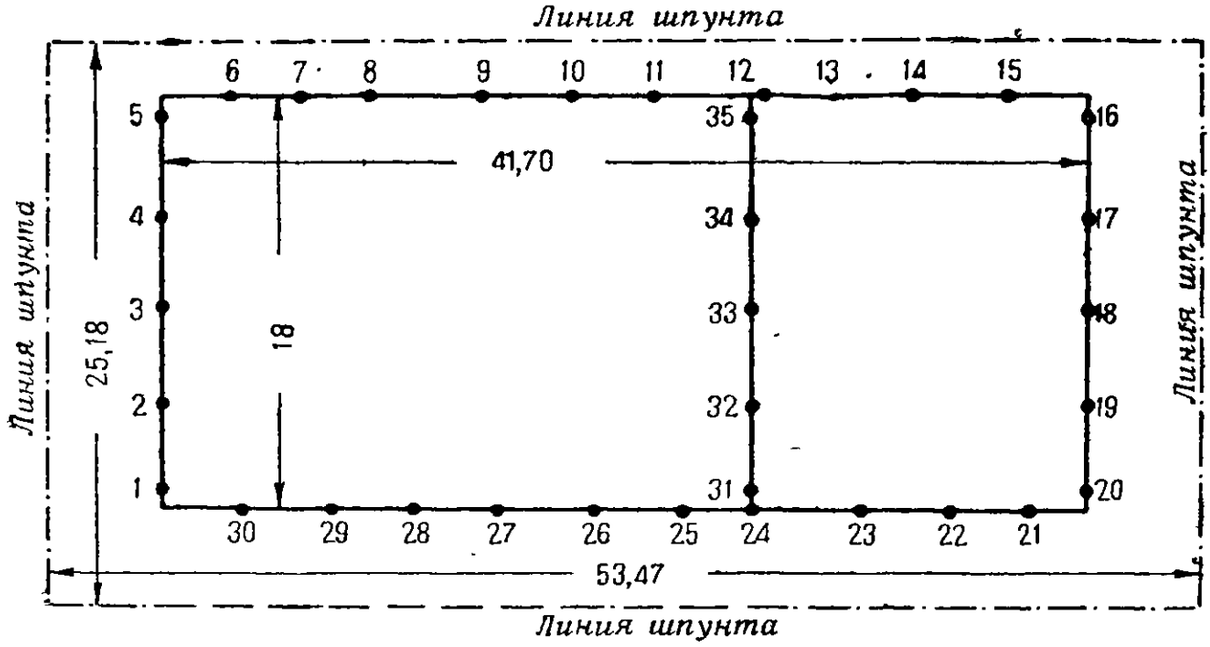
Бурение скважин с обсадными трубами 250 *мм* было начато тремя буровыми партиями 26/III 1929 г. и закончено 29/IV 1929 г. с установкой колодцев. Всего было пробурено 1240 *пог. м*. Колодцы были устроены следующим образом.

Общая длина колодца 10 *м*, фильтрующая часть длиною 4 *м*, диаметр колодца 150 *мм*. Фильтрующая часть состоит из железной трубы с расточенными щелевидными вертикальными отверстиями 40 × 3 *мм* до 70 шт. в ряду, а всего на один фильтр — около 1800 отверстий. Сверху дырчатая труба обмотана спирально медной проволокой толщиною 3 *мм*, припаянной к стенкам трубы. Поверх проволоки натянута и припаяна медная сетка.

Внизу фильтровая труба закрыта деревянной пробкой. Наставная труба длиною 6 *м* железная того же диаметра 150 *мм*.

После установки колодца в скважину обсадные трубы вытаскивались без предварительной засыпки кольцевого пространства фильтрующим материалом.

А. План расположения колодцев I яруса



Б. План расположения колодцев II яруса.

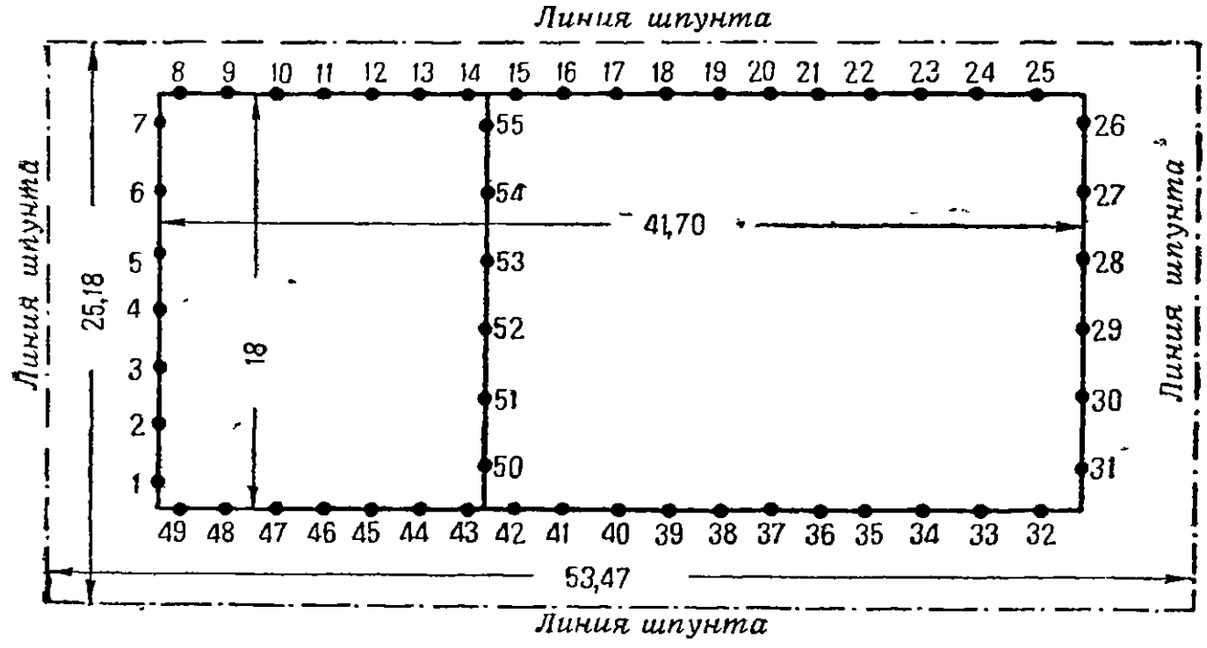


Рис. 118

В колодцы были опущены всасывающие трубы диаметром 75 *мм* с всасывающим клапаном. Нижний конец всасывающей трубы не доходил на 0,5 *м* до дна колодца. Верхний конец всасывающих труб присоединялся при помощи тройника с задвижкой «Лудло» к кольцевому всасывающему трубопроводу. Последний при помощи задвижек «Лудло» был разделен на ряд участков с присоединенными к последним пятью всасывающими трубами (от пяти колодцев).

К каждому такому участку трубопровода был присоединен центробежный насос 125 *мм* с электромотором на одном валу.

Всего было 7 насосов для I яруса, для II яруса по проекту 11, а фактически 8 насосов.

Полностью все насосы не работали. В работе одновременно было не более 8 шт., остальные оказывались резервными.

Работа понизительной установки началась 1/VII 1929 г. и окончилась 7/II 1930 г., когда были сняты последние насосы.

Под защитой понижения уровня грунтовых вод были произведены следующие работы: с 13/VIII по 15/IX отрывка котлована вручную с подъемом грунта деревянными кранами Деррика, всего 11 000 $м^3$ (в среднем в день 173 $м^3$), бетонирование железобетонной плиты насухо, кладка стен и штукатурка до отметки + 54,00 *м*.

По мере выполнения штукатурки и следующей за ней засыпки земли за стенами сооружения постепенно извлекались колодцы, трубопроводы и насосы; 11/II, когда была закончена штукатурка и засыпка грунта, были сняты последние колодцы.

Описанная установка понижения уровня грунтовых вод была полностью размещена в самом котловане, огражденном шпунтовыми железными стенками, забитыми на 3,43 *м* глубже основания бункеров.

Наличие железного шпунта, отсутствие данных о состоянии последнего, а также исходных данных о свойствах грунта не дают возможности произвести расчет осуществленной установки, чтобы оценить целесообразность и экономичность того расположения, количества и размеров колодцев и насосов, которые имели место на описанной работе, а также шпунтового ограждения. За все время работы установки понижения (221 день) работало одновременно минимум шесть насосов с общим дебитом в среднем 60 *л/сек*, было откачено всего воды $0{,}06 \cdot 86\,400 \cdot 221 = 1\,145\,664$ $м^3$. При объеме грунта в плотном теле $53{,}5 \cdot 25{,}2 \cdot 11 = 132\,800$ $м^3$ и пористости $p = 0{,}35$ объем воды внутри котлована составил бы $132\,800 \cdot 0{,}35 = 46\,500$ $м^3$.

Таким образом, за время работы установки было откачено $\frac{1\,145\,664}{46\,500} =$ $= 25$ объемов воды, помещающейся в пределах котлована.

Это указывает отчасти на водопроницаемость шпунта, отчасти на наличие притока воды со дна котлована, при котором невозможно было обойтись без откачки воды, притекающей в котлован извне, а следовательно могла быть и опасность выноса грунта внутрь котлована из-под соседних сооружений. Таким образом роль искусственного понижения уровня грунтовых вод оказалась настолько большой, что без него трудно, а может быть и невозможно, было бы обойтись. Следует заметить, что при проектировании Индустроем описанной установки искусственного понижения был произведен расчет в предположении отсутствия шпунтовых стенок при $k = 0{,}00075$ *м/сек*.

По этому расчету были определены:

Дебит I яруса — 122,0 *л/сек*.
» II » — 236,0 »

Если средний дебит всей установки при достигнутой полной глубине котлована составлял 60 *л/сек* [1], то это ясно показывает преувеличение расчетного дебита против действительного.

---

[1] Инж. С. М. Найман, Материалы исследования глубинного водоотлива, Бюллетень 2-го района Индустроя „На вищий щабень", № 5—6, стр. 175, 1932 г.

Если допустить, что действительно $k = 0{,}00075$, то по формуле Зихардта для определения производительности колодца $\left(E = \pi d_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15}\right)$ при y_0, равном 4 *м* (длина фильтра), получим $E = 3{,}45$ *л/сек*. При среднем общем дебите I яруса 60 *л/сек* должно было бы быть:

$$n_I = \frac{60}{3{,}45} = 17 \text{ колодцев.}$$

При общей длине линий колодцев $2 \cdot (42 + 18) + 18 = 138$ *м* колодцы должны были быть установлены на 8 *м* друг от друга.

В действительности колодцы были расположены на взаимном расстоянии в среднем 4 *м*. Следовательно число колодцев и насосов в I ярусе было преувеличено в два раза.

Для II яруса при $Q_{max} = 90$ *л/сек* (при 8 наносах) следовало бы иметь $\frac{70}{3{,}45} = 26$ колодцев на взаимном расстоянии $a_{II} = \frac{2(42 + 18) + 18}{26} = 5{,}4$ *м*. На самом деле было 55 шт. на взаимном расстоянии в среднем 2,5 *м*, т. е. число колодцев и насосов II яруса было также преувеличено в два раза.

Такое преувеличение числа колодцев и насосов можно объяснить следующими причинами:

1. Строительство не имело времени для устройства опытной установки понижения, при помощи которой прежде всего можно было бы определить коэфициент водопроницаемости k. Поэтому ничего не оставалось, как принять для осторожности наибольшее из всех значений k, которые можно было подсчитать только по сомнительным эмпирическим формулам зависимости k от механического состава.

2. Влияние шпунта, состояние которого неизвестно, трудно теоретически учесть, а потому для осторожности с запасом было принято как бы отсутствие шпунта. Это было правильное решение: запас был необходим на случай заливания котлована поверхностными водами при неполной плотности шпунта и при неизбежности притока воды со дна котлована.

3. Предполагалось, что I и II ярусы будут расположены на более низких отметках, чем пришлось установить их в действительности благодаря затоплению котлована водой из рефулеров, что проектировщиками не могло быть учтено.

Произведем ориентировочный расчет установки, не принимая во внимание шпунта. Определим k по формуле Хазена (ориентировочно) $k = 0{,}1\, d_e^2$; d_e (по механическому анализу) $\approx 0{,}15$ *мм*; $k = 0{,}000225$ *м/сек*; $s = 4{,}75$ *м*; $R = 575 \cdot 4{,}75 \sqrt{11{,}35 \cdot 0{,}000225} = 140$ *м*:

$$X_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \sqrt{\frac{42 \cdot 18}{3{,}14}} = 24 \text{ м:}$$

$$Q = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}000225 \cdot (2 \cdot 11{,}35 - 4{,}75)\, 4{,}75}{\lg 140 - \lg 24} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}000225 \cdot 17{,}95 \cdot 4{,}75}{0{,}766} = 0{,}034 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Производительность колодца по Зихардту:

$$E = \pi d_0 y_0 \frac{\sqrt{k}}{15} = 3{,}14 \cdot 0{,}15 \cdot 4 \frac{\sqrt{0{,}000225}}{15} = 1{,}9 \text{ л/сек.}$$

Число колодцев $n = \frac{34}{1{,}9} = 18$. Расположим колодцы подобно тому, как они были в действительности расположены, т. е. большая часть по контуру котлована и один поперечный ряд по траверсному направлению.

Поверка понижения в наиболее невыгодных точках показала, что разница по сравнению с понижением в центре столь незначительна, что перераспределения колодцев не требуется. Те же подсчеты показывают, что колодцы на траверсе можно было бы не располагать, а все их разместить по периметру котлована.

Кстати здесь следует подчеркнуть, что при $k = 0{,}0075$ получается:

$$R = 575 \cdot s\sqrt{Hk} = 250 \text{ м}.$$

Расчет I яруса был произведен проектировщиками Индустроя при $R = 300$ м, хотя по формуле Шульце $R = 60\sqrt{\frac{6HkT}{p}}$ при $T = 336$ час. $=$ $= 2$ недели (продолжительность откачки из I яруса для достижения требуемого понижения по плану работ) получилось $R = 426$ м.

Произведем подсчет II яруса;

$$H = 14{,}75;\ S = 7{,}75 \text{ м};\ k = 0{,}000225;\ x_0 = 24 \text{ м};$$

$$R = 575 \cdot 7{,}75\sqrt{14{,}75 \cdot 0{,}000225} = 256 \text{ м}^1;$$

$$Q = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}000225 \cdot (2 \cdot 14{,}75 - 7{,}75)7{,}75}{\lg 256 - \lg 24} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}000225 \cdot 21{,}75 \cdot 7{,}75}{1{,}02803} =$$

$$= 0{,}050 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

При $E = 1{,}9$ л/сек $n = \frac{50}{1{,}9} = 26$ колодцев (вместо 55).

Из этого подсчета выявилась совершенно ясно необходимость хотя бы упрощенной пробной установки для того, чтобы запроектировать рабочую установку более экономично.

Мы не можем сказать теперь, каково было на самом деле значение коэфициента водопроницаемости k, чтобы утверждать правильность приведенного нами выше ориентировочного расчета при $k = 0{,}000225$ м/сек. Но безусловно мы вправе поставить вопрос о том, достаточно ли экономична была установка, не возможно ли было снизить число колодцев и тем облегчить и удешевить выполнение работы.

Совершенно особо возникает вопрос о том, абсолютно ли необходимо было применение железного шпунтового ограждения и нельзя ли было обойтись или открытой выемкой с откосами, или же применить деревянное крепление в виде горизонтальной забирки между забитыми в грунт двутавровыми балками. Мы не можем утверждать, что без железного шпунта безусловно можно было обойтись, так как нам не известна вся обстановка, которая была перед началом работ по постройке подземных бункеров; не можем также утверждать, что можно было безусловно значительно удешевить установку понижения уровня грунтовых вод. Для нас ясным остается только одно: расчет установки понижения уровня грунтовых вод весьма важен для технически целесообразного и экономически удовлетворительного производства работ, а для получения исходных расчетных данных весьма важными и наиболее надежными являются полевые предварительные исследования при пробном понижении уровня грунтовых вод.

---

[1] Проектировщики приняли для II яруса (при $k = 0{,}00075$ м/сек) $R = 400$ м. По формуле $R = 575\ s\sqrt{Hk}$ получается $R = 422$ м.

Результаты применения искусственного понижения уровня грунтовых вод при постройке подземных бункеров на заводе им. Дзержинского в качественном отношении были вполне удачными, и строительные работы под защитой понизительной установки были произведены вполне успешно.

3. Понижение грунтовых вод на Александер-плац в Берлине

Против строившейся в 1928 г. умформерной станции на Александер-плац надлежало проложить два однопутных параллельных тоннеля линии метрополитена Гезундбруннен — Нейкёльн. Эти тоннели пересекали наискось улицу Вильгельмштрассе и должны были проходить под застроенными кварталами. Необходимое для существующих и будущих строений тяжелое покрытие тоннелей следовало опереть на три параллельных стены, между которыми проходили бы тоннели метрополитена.

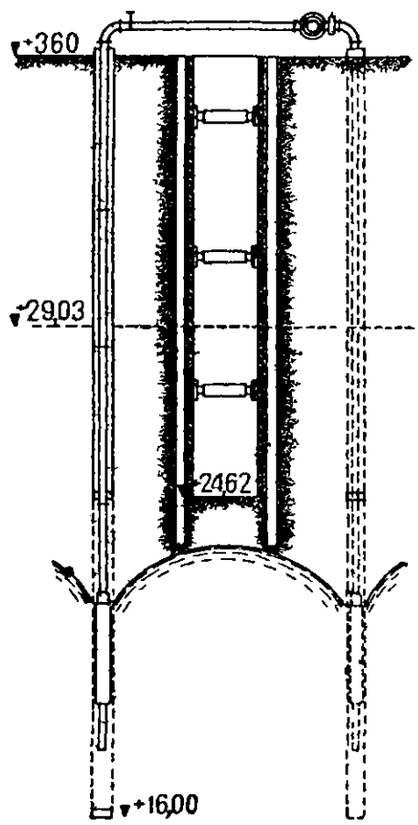


Рис. 119.

В первую очередь надлежало сделать одну из этих трех стен, примыкающую к строящейся умформерной станции. Для постройки этой стены требовалось отрыть траншею шириной 2 *м* до отметки + 24,62 (рис. 119), ниже уровня грунтовых вод на 4,4 *м*.

Для обеспечения сухости траншеи уровень воды в центре тяжести площади установки следовало понизить на 1,5 *м* ниже дна траншеи, т. е. на 5,7 *м* ниже поверхности грунтовых вод и на 12,7 *м* ниже поверхности земли. Ввиду узости траншеи и невозможности ее уширения пришлось от ярусной установки отказаться и применить понижение глубокими колодцами с опущенными в них глубинными насосами. Всего было установлено 13 колодцев, из коих было в действии 12 (№ 1—12, рис. 120) глубиною от поверхности земли 20 *м* и от поверхности грунтовых вод 13 *м*. Диаметр фильтра колодцев составлял 350 *мм*.

При протяжении строительного участка 75 *м* колодцы были установлены в шахматном порядке по обе стороны траншеи — ряд от ряда на 5,10 *м* — и на различных расстояниях друг от друга — от 10,8 до 13 *м*.

Геологические условия не отличаются от обычных для Берлина: грунт песчаный с увеличивающейся сверху вниз крупностью, причем коэфициент водопроницаемости колеблется от 0.0015 до 0,003 *м/сек* и в среднем может быть принят, как вообще для Берлина, $k = 0{,}002$ *м/сек*.

В колодцах № 1—12 были установлены глубинные насосы SSW типа TO с воздушным противодавлением, подвесные напорные трубы которых присоединены к общему напорному трубопроводу, уложенному по одну сторону траншеи (рис. 120 и 121).

Управление насосами было сосредоточено в одном месте — в будке, где были установлены компрессор, аккумулятор сжатого воздуха для противодавления в моторах насосов и распределительная доска с рубильниками, наблюдательными и сигнальными приборами (рис. 52). К распределительной доске были подведены кабели рабочего и резервного токов, а отнее отходили электропроводы и воздухопроводы к отдельным насосным агрегатам.

Такое централизованное устройство здесь было применено впервые и дало возможность четкого и легкого наблюдения и управления насос-

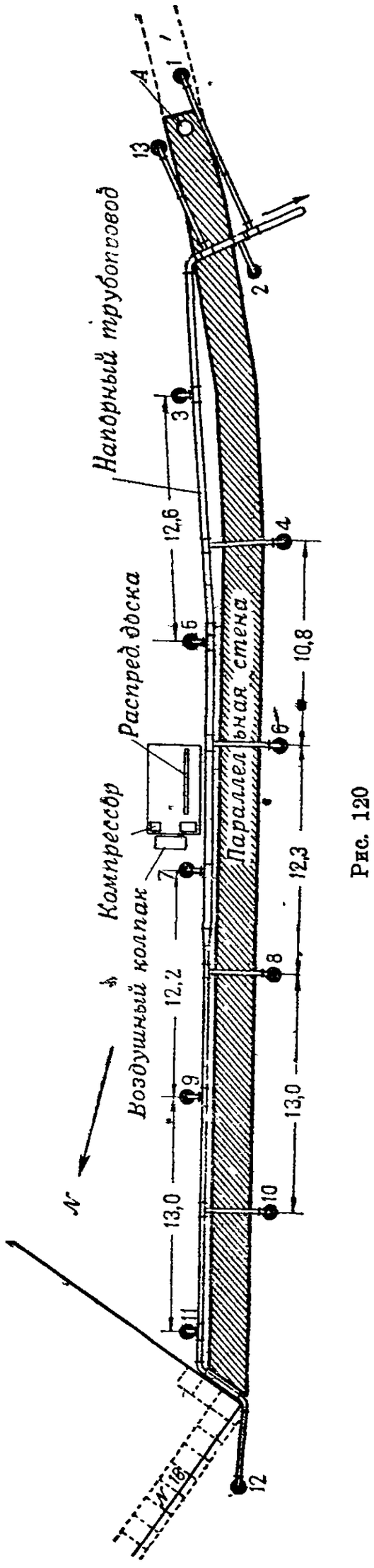


Рис. 120

ными агрегатами. Впоследствии такие централизованные системы управления стали применяться на других понизительных установках с глубинными насосами, причем на одной распределительной доске стали группироваться наблюдательные, сигнальные и включательные приборы для 12—15 глубинных насосов.

Произведем поверочный расчет описанной установки понижения:

$H = 13$ *м*; понижение в центре установки $s = 5{,}7$ *м*; $k = 0{,}002$ *м/сек*; $R = 575 \cdot 5{,}7\sqrt{13 \cdot 0{,}002} = 530$ *м*.

Определенное по чертежу (рис. 120):

$$\lg X_0 = \frac{1}{12}(\lg x_1 + \lg x_2 + \ldots + \lg x_{12}) = 1{,}20820;$$

$$\lg R = 2{,}72428;$$

$$\lg R - \lg X_0 = 1{,}51608;$$

$$Q = \frac{1{,}36 \cdot k(2H - s)s}{\lg R - \lg X_0} = \frac{1{,}36 \cdot 0{,}002 \cdot 20{,}3 \cdot 5{,}7}{1{,}51608} = 0{,}207 \text{ м}^3/\text{сек} = 207 \text{ л/сек}.$$

По сообщению Зихардта все 12 колодцев вместе давали в среднем 200 *л/сек*, так что расхождение составляет всего только 3,5%.

Определим понижение уровня у колодца № 7.

$$\lg X_0^{(7)} = \frac{1}{12}(11 \lg X_0 + \lg 0{,}175) = 1{,}04442;$$

$$\lg R - \lg X_0^{(7)} = 1{,}67985.$$

$$y_7 = \sqrt{169 - \frac{0{,}200 \cdot 1{,}68}{1{,}36 \cdot 0{,}002}} = 6{,}70 \text{ м}.$$

$$E = \frac{\pi d_0 y_0 \sqrt{k}}{15} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}35 \cdot 6{,}70 \cdot 0{,}0475}{15} = 0{,}0233 \text{ м}^3/\text{сек} = 23{,}3 \text{ л/сек}.$$

В действительности в среднем на один колодец приходилось:

$$q = \frac{200}{12} = 16{,}7 \text{ л/сек}.$$

Следовательно колодцы работали с дебитом, меньшим предельной производительности по Зихардту.

Под защитой произведенного понижения уровня грунтовых вод траншея была отрыта насухо с применением горизонтальной дощатой одежды стенок (рис. 119).

Подсчитаем высоту пониженного уровня грунтовой воды в одном из торцевых концов траншеи, например в точке A. Измерим по чертежу расстояние точки A от всех колодцев и определим:

$$\lg X_A = \frac{1}{12}(\lg x_1^A + \lg x_2^A + \ldots + \lg x_{12}^A) = 1{,}46664;$$

$$\lg R - \lg X_A = 1{,}25764;$$

$$y_A = \sqrt{H^2 - \frac{Q(\lg R - \lg X_A)}{1{,}36 \cdot k}} = \sqrt{169 - \frac{0{,}207 \cdot 1{,}25764}{1{,}34 \cdot 0{,}002}} = 8{,}6\ м.$$

Следовательно уровень грунтовой воды в точке A установится на отметке $16{,}00 + 8{,}60 = 24{,}60$ $м$ при отметке дна траншеи $+24{,}62$, т. е. в точке A вода будет стоять как раз на дне траншеи.

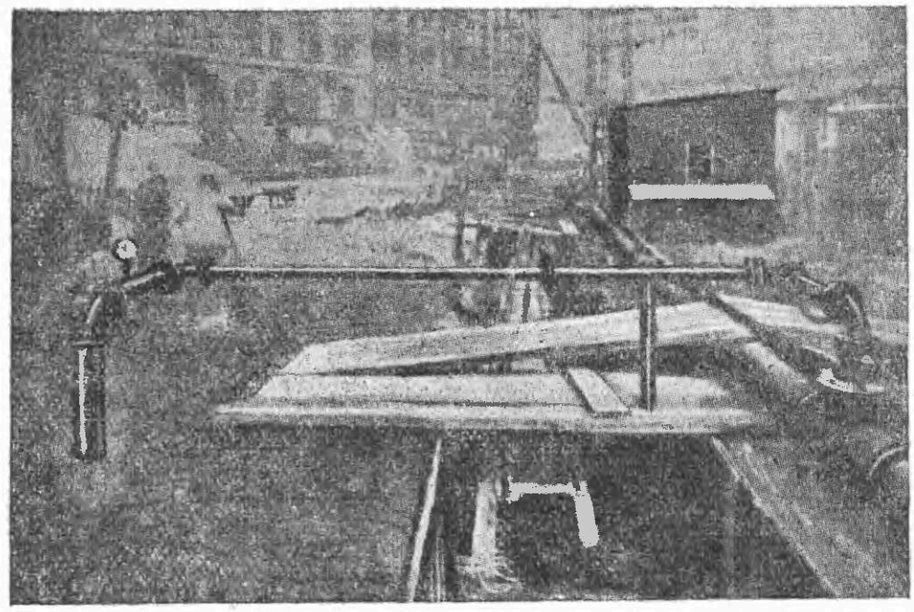


Рис. 121

Отсюда видно, что заданная глубина понижения в середине участка на 1,3 $м$ глубже дна траншеи является минимальной.

Из разобранного примера со всей очевидностью вытекает большое преимущество глубинных насосов с погруженным мотором.

В книге Кирилейса — Зихардта приведены другие примеры понижений с применением глубинных насосов. Из этих примеров выявляется не только чрезвычайно важное и решающее преимущество глубинных насосов для понижения грунтовых вод при стесненных котлованах, не допускающих или с большим ущербом допускающих загромождение их трубопроводами и насосными станциями. Эти примеры показывают также большую экономию в погонаже бурения и в количестве обсадных труб, а при применении централизованного управления всеми вместе и каждым в отдельности глубокими колодцами установка делается легко и четко управляемой.

Глубинные насосы позволяют устанавливать глубокие колодцы на больших расстояниях, что дает возможность закладывать колодцы в тех местах, которые более доступны, если осушаемая площадь занята сооружениями, находящимися в состоянии интенсивной эксплоатации.

С последней точки зрения очень показательным является описываемый ниже пример понижения.

4. Понижение уровня грунтовых вод под Лихтенбергским вокзалом в Берлине

На участке VI строившейся в 1928 г. линии Берлинского метрополитена Лихтенбергский вокзал — Фридрихсфельде требовалось проложить тоннель под Лихтенбергским вокзалом с его чрезвычайно разветвленными интенсивно эксплоатируемыми путями. Как и при проходке тоннелей под за-

строенными кварталами, проектом было предусмотрено предварительное прорытие по сторонам будущего тоннеля траншей и возведение в последних параллельных оси тоннеля каменных стен *а* (рис. 122). Затем между этими параллельными стенами надлежало построить вспомогательный тоннель и уже потом приступить к постройке настоящего тоннеля метрополитена. Все подготовительные работы на товарных путях, в том числе и бурение скважин для колодцев, производились только в воскресные дни, когда могли быть допущены перерывы в эксплоатации путей.

Это обстоятельство вызывало применение возможно меньшего числа колодцев для необходимого понижения уровня грунтовых вод.

С этой трудной задачей удалось справиться благодаря применению глубинных насосов.

Всего было установлено 14 глубоких колодцев (рис. 122) диаметром 350 *мм*, глубиною от головки рельса железнодорожных путей 21,50 *м*.

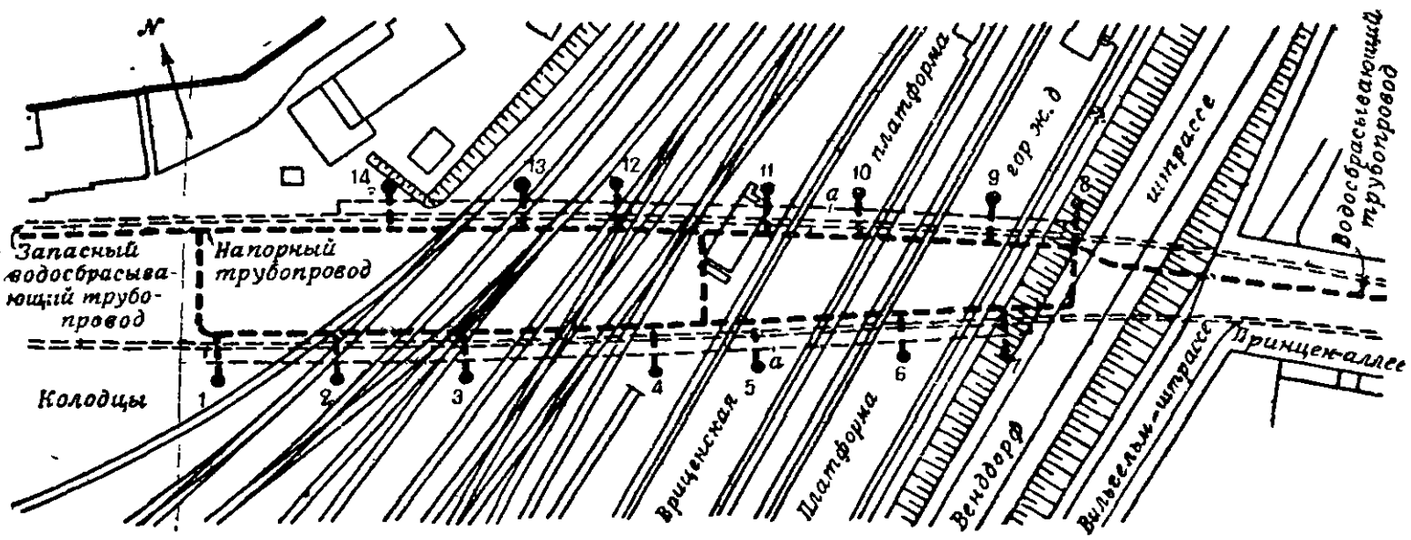


Рис. 122

Расстояние между колодцами было принято неодинаковое, так как бурить можно было только на платформах и вообще на широких полосах между путями.

Длина всего участка, обслуживаемого установкой понижения, составляла около 150 *м*, при средней ширине между рядами колодцев 28 *м*. Геологическое строение места постройки значительно отличается от обычного для Берлина.

Сверху на глубину 7 *м* идут пески, в нижней части водоносные глинистые со включением линз и прослойков суглинков. Ниже залегают глины и суглинки мощностью 7,5—10 *м*. Залегание этих глин и суглинков неправильное, с признаками местных утонений и даже выклинивания не очень далеко от места постройки. Под глинами залегают слои песка переменной крупности: от илистых плывунов до среднезернистых песков с напорными водами (рис. 123).

Вышеупомянутые суглинки и глины в пределах постройки разделяют грунтовые воды на два этажа, принадлежащие однако к одному горизонту с общим пьезометрическим уровнем приблизительно на отметке + 33,50. Колодцы должны были понижать уровень воды сразу в обоих этажах: над водонепроницаемой глиной и под нею.

В результате работы 14 колодцев пьезометрический уровень был понижен до отметки + 26,20, т. е. на 7,30 и на 2,50 *м* ниже самой низкой отметки котлованов. Последнее было необходимо для устранения возможности пробивания ключей в основании строящегося тоннеля и просадок здания станции и железнодорожных путей.

В описании этой работы к сожалению отсутствуют необходимые данные для гидравлического расчета установки (дебит установки, водопроницаемость грунта и др.).

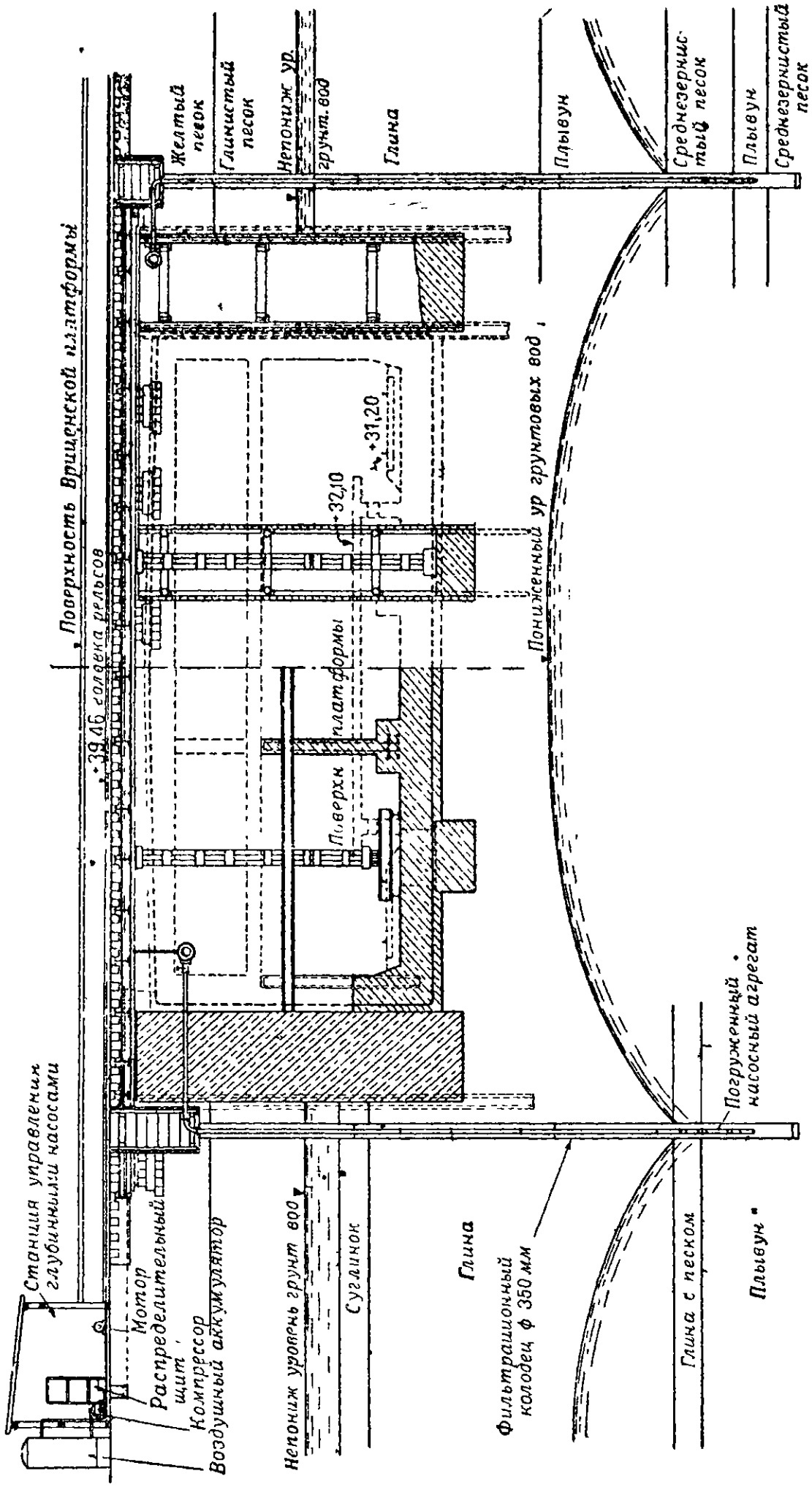


Рис. 123

В колодцы были установлены насосы SSW типа ТО с воздушным противодавлением в кожухе мотора, для чего на центральной станции управления (рис. 123) был установлен компрессор с воздушным

аккумулятором, из которого воздух подавался по воздухопроводу под воздушный колокол каждого насосного агрегата. Приборы наблюдения и управления были сосредоточены на общей распределительной доске, установленной в помещении станции управления.

Напорные трубопроводы были проложены ниже поверхности земли сначала в траншеях для каменных параллельных стен, а затем перенесены в тоннель.

Из этого примера видно большое преимущество глубинных насосов в условиях стесненности места постройки, а также требуемой большой глубины понижения грунтовых вод при этажном залегании последних.

Из приведенных примеров ясно, какие большие возможности открывают способу понижения грунтовых вод выработанные в последние годы типы глубинных насосов с погружаемым мотором.

Можно сказать, что глубинные насосы произвели коренной переворот в технике понижения уровня грунтовых вод: ярусные установки должны все чаще уступать место безъярусным установкам с глубинными насосами.

Поэтому вполне справедливым является разделение Зихардтом способов понижения на старые — ярусные и современные — глубокие с применением глубинных насосов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного выше вытекает, что теория понижения уровня грунтовых вод не является еще вполне точной и законченной.

Основной закон Дарси-Дюпюи и вытекающие из него уравнения А. Тима и Форхгеймера даже для равномернозернистых грунтов справедливы только при известных ограничениях и допущениях.

Другие известные формулировки общего закона движения грунтовых вод или уравнения для выражения действия колодцев (Смрекер, Нуртье, Козени) не нашли применения в современной теории понижения грунтовых вод по целому ряду причин, из коих главными являются:

а) недостаточная обоснованность этих формулировок;

б) отсутствие или недостаточность практической проверки их;

в) затруднительность построения на основании их расчетных формул.

Более значительные затруднения встречаются при определении основных величин, входящих в расчетные формулы.

Из приведенной выше оценки различных методов определения коэфициента водопроницаемости k видно, что ни пользование теоретическими или эмпирическими формулами, ни даже лабораторные опыты для большинства природных грунтов не являются достаточно надежными.

Только определение k при помощи пробных откачек может считаться приемлемым и более или менее точным.

Существовавшая до 1928 г. неопределенность в установлении производительности колодцев была одной из причин ненадежности расчетов установок понижения.

Эта ненадежность до некоторой степени ослаблена предложенной Зихардтом эмпирической формулой для определения захватной способности (производительности) колодца, хотя эту формулу нельзя признать вполне обоснованной теоретически и всегда выгодной практически.

Дальнейшее уточнение определения предельной производительности должно итти по пути изучения зависимости между величиной скорости фильтрации воды через стенки колодца, с одной стороны, и величиной

сопротивления, а также возможностью вымывания частиц грунта, — с другой.

До сих пор расчет установок понижения затруднялся также неопределенностью величины R — предела действия установки.

Предложенная в 1924 г. Шульце формула для определения R в зависимости от времени, как указано выше, не имеет практического значения.

На основании данных ряда произведенных в разное время и в различных местах понижений оказалось возможным найти простую зависимость величины R от проницаемости грунта — k, мощности водоносного слоя (или глубины колодцев) — H и глубины понижения уровня грунтовой воды — s.

Предлагаемая формула $R = 575s\sqrt{Hk}$ вполне согласуется с господствующим в науке и практике представлением о явлении понижения уровня грунтовых вод, приводит к достаточно удовлетворительным для практики результатам и удобна для пользования.

Если существующая теория понижения грунтовых вод с известной приближенностью может быть принята для расчета установок понижения грунтовых вод, представляющих неподвижные сплошные бассейны, то в отношении понижения уровня потоков, а также этажных и прослоечных вод теория представляется далеко не законченной и не вполне надежной.

То же можно сказать относительно влияния на понижение открытых водоемов и дождя.

Существующие для этих случаев уравнения, как указано в соответствующих местах настоящей работы, или встречают ряд возражений теоретического характера, или недоступны для практического пользования из-за неопределенности отдельных входящих в них величин.

Поэтому для большинства случаев, и особенно для проектирования крупных установок понижения, можно получить достаточно надежные данные только при помощи пробного понижения, производимого в условиях, наиболее приближающихся к условиям действия проектируемой установки.

Для правильного применения теоретических формул необходимо достаточно точное знание геологических и гидрологических условий.

Поэтому главным и непременным условием для возможности проектирования установки понижения является производство достаточно подробных и правильно поставленных геогидрологических изысканий.

Активность разведочного бурения, основанная на применении генетического анализа, возможная при налаженности и быстроте сравнительной гранулометрической оценки грунтов, способствует получению наиболее достоверных данных о геологических и гидрологических условиях при одновременном удешевлении разведочных работ.

Задачи уточнения общей теории движения грунтовых вод и совершенствования методов расчета установок понижения наряду с чисто теоретическими исследованиями требуют более широкого развития экспериментальных исследований, а также накопления опытных данных, которые можно и должно получать при производстве работ с понижением уровня грунтовых вод.

Параллельное уточнение методов расчета и усовершенствование конструктивных элементов установок понижения (фильтры, глубинные насосы, газоудалители и пр.), способствуя повышению технического и экономического эффекта, открывают все новые и новые области применения искусственного понижения уровня грунтовых вод.

Давая возможность производства строительных работ в водоносных грунтах на любой имеющей практическое значение глубине, способствуя облегчению крепления, уменьшению объема земляных работ и открывая возможность широкого применения строительных машин, способ искус-

ственного понижения грунтовых вод находит все более и более широкое применение. Простота оборудования, безопасность отрывки грунта (при правильном применении) не только вблизи сооружений и зданий, но и непосредственно под ними, возможность тщательного производства каменных, изоляционных и всех остальных работ в котловане под перекрытием, обеспечивающим наименьшее стеснение уличного движения в оживленных частях больших городов, возможность скрытности работ и наконец гигиеничность и безопасность для здоровья и жизни рабочих — все эти положительные свойства способа понижения делают его более желательным по сравнению с обычным способом открытого котлована с обыкновенным водоотливом.

Однако перечисленными достоинствами способ понижения уровня грунтовых вод обладает только при вполне благоприятных геологических условиях. Слоистая текстура, неоднородность строения и состава грунтов, залегание недостаточно мощных водоносных пластов среди водоупорных, мелкозернистость водоносного грунта с примесью глины или оторфованных растительных остатков являются такими условиями, при которых понижение грунтовых вод может оказаться неэкономичным и не дающим желательного эффекта, а в некоторых случаях и совершенно не применимым.

В каждом частном случае вопрос о возможности применения понижения грунтовых вод должен решаться на основании предварительно выясненных геогидрологических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснопольский, Грунтовые и артезианские колодцы, «Горный журнал», 1912 г.
2. Слихтер, Подземные воды, перев. Стопневича, СПБ 1912 г.
3. Люгер, Водоснабжение городов, перев. 1898—1904 г.
4. Рихерт, Подземные воды и в частности подземные воды Швеции, перев. под редакцией Рузского, Киев 1914 г.
5. Кейльгак, Подземные воды и источники, перев. под редакцией Отоцкого, 1914 г.
6. Гефер-Семихатов, Подземные воды и источники, Москва 1925 г.
7. Е. Принц, Гидрогеология, перев. 1932 г.
8. Г. Н. Каменский, Основы динамики подземных вод, 1932 г.
9. Н. Н. Павловский, Неравномерное движение грунтовых вод, Гос. институт сооружений, 1930 и 1932 гг.
10. В. Чиков, Опыты Клибборна над просачиванием через песок, 1916 г.
11. Зауербрей, Обзор современных германских работ по установлению связи и т. д., изд. Мелиор. института, № 11—13, 1925 г.
12. Зауербрей, К вопросу о коэфициенте фильтрации грунтов и методике его исследования, «Изв. Института гидротехники», т. III, 1932 г.
13. Г. В. Богомолов, К методике определения производительности водоносных пластов откачкой, изд. Гидротехгеоинститута, 1933 г
14. Мушкетов, Физическая геология, т. II, 1926 г.
15. Штини-Мушкетов, Техническая геология, 1926 г.
16. С. А. Яковлев, Наносы и рельеф Ленинграда и окрестностей, 1925 г.
17. Отчет гидрометрической части ОЗУ Туркестанского края, т. I, 1910 г.
18. А. В. Сабанин, К вопросу о механическом анализе почв, «Почвоведение», т. 9, № 3, 1907 г.
19. «Труды II Всероссийского съезда прикладной геологии», 1911/12 г.
20. Пояснительная записка к проекту водоснабжения Москвы.
21. Н. М. Ушаков, Способы расчета и устройство дренажа в крепостных сооружениях, Петербург 1913 г.
22. Шелянин, Временное понижение грунтовых вод при заложении оснований, 1909 г.
23. И. П. Кусакин, О пробном понижении уровня грунтовых вод на Вас. острове в Ленинграде, «Изв. Гос. гидролог. института», № 21, 1928 г.
24. И. П. Кусакин, Искусственное понижение уровня грунтовых вод, изд. ВТА, 1930 г.
25. В. Кирилейс, Искусственное понижение уровня грунтовых вод, русский перевод со 2-го издания, переработанного В. Зихардтом, Госстройиздат, 1933 г.
26. С. М. Найман, Из опыта строительства Каменской коксовой установки, Бюллетень Индустроя «На высшую ступень», 1931 г.
27. С. Н. Каменецкий, Глубинный водоотлив при постройке подземных бункеров коксовой установки в Каменском, Бюлл. Индустроя «На вищий щабель». № 1—2, 1932 г.
28. С. М. Найман, Материалы исследования глубинного водоотлива «На вищий щабель» № 5—6, 1932 г.
29. Brennecke, Der Grundbau, Berlin 1927.
30. O. Franzius, Der Grundbau, Berlin 1927.
31. W. Kyrieleis, Über Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten, Berlin 1911 и 1913.
32. F. Bergwald. Grundwasserabsenkung für Gründung von Bauwerken, 1917.
33. M. Enzweiler, Die Grundwasserabsenkungsmethode, Berlin 1918.
34. J. Schultze, Grundwasserabsenkung in Theorie u. Praxis, Berlin 1924.
35. W. Sichardt, Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung u. s. w., Berlin 1928.
36. Ph. Forchheimer, Wasserbewegung durch Boden, ZVd. I. 1901.
37. Ph. Forchheimer, Hydraulik, Leipzig-Berlin 1924.

38. O. Smrecker, Das Grundwasser, seine Erscheinungsformen, Bewegungsgesetze und Mengebestimmung, Leipzig-Berlin 1914.
39. R. Lummert, Neue Methode der Bestimmuug der Durchlässigkeit wasserführender Bodenschichten, Braunschweig 1917.
40. E. Prinz, Handbuch der Hydrologie, Berlin 1924.
41. F. Kreuter, Ein neues Verfahren zur Trockenlegung von Baugruben, „Zbl. d. Bvw.", 18, 5.
42. Bredtschneider, Absenken des Wasserspiegels mittels Rohrbrunnen, „Zbl. d. Bvw." № 7—8, 1898.
43. M-h, Von Bau des Tunnels der elektr. Stadtbahn am Zoo, „Zbl. d. Bvw.", № 1, 1901.
44. E. Prinz, Die Trockenhaltung des Untergrundes mittels Grundwassersenkung, Zbl. d. Bvw." № 93, 1906.
45. K. Bernhard, Untertunnelung eines bewohnt. Geschäfthauses für Untergrundbahn in Berlin, „Zbl. d. Bvw." № 95, 1906.
46. Zimmermann, Anwendung von Grundwasserabsenkung zu Neubauten in Fürstenwald, „Zbl. d. Bvw.", 1906.
47. T. Steen, Mammutpumpen — Anlage zur Untertunnellung der Spree, „Zbl. d. Bvw." № 85, 1911.
48. Gerlach, Die elektrische Untergrundbahn der Stadt Schöneberg, „Zeitschr. f. Bauwesen", 1911.
49. Himmer, Senkung des Grundwasserspiegels bei Gründung von Bauwerken, „Zbl. d. Bvw." № 15—16, 1914.
50. Schneck, Bau der zweiten grossen Schleuse in Fürstenwalde a. Spree, „Zbl. d. Bvw." № 49, 1916.
51. Die Grundwasserabsenkung beim Neubau der Züricher Kantonalbank, „Schweizerische Bauzeitung" № 13, 1924.
52. Wehe, Tiefgründung in der Nähe bestehender Bauwerke, „Deutsche Bauzeitung" № 27, 1925.
53. J. Mulder, Discussion des formules de débit, déduites de la loi Darcy-Dupuit, „Le Genie Civil." № 17, 1918.
54. H. Müller, Der Aufschluss des Zweiten Flötzes der Grube „Matador" bei Senfteuberg L. „Zts. f. Gewinn. und Verwert. der Braunkohle" № 1, 1925.
55. Sichardt, Das Grundwasserabsenkungverf. bei Gründung des Krafthauses in Gratwein, „Wasserwirtschaft" № 12, 1925.
56. Arp u. Detmers, Grundwasserabsenkung beim Bau der Doppelschleuse in Wesermünde — Geestemünde, „Zschr. f. Bauwesen", Hefte VI и VIII, 1926.
57. K. Schonopp, Gefördete Baugruben, „Bautechnik" № 21 и 24, 1926.
58. G. Lehr, Brunnenwiderstände, ihre Berechnung, Entstehung und Beseitigung, „Ges. Ing." № 49, 1926.
59. L. Bonnet, Drenage by means of Filtration Tubes of the Excavation for the New-Kruisschan's Lock at Antwerp, „The Dock and Harbour Auroty", 1925 April.
60. W. Sichardt, Über Tiefsenkungen des Grundwasserspiegels, „Die Bautechnik" № 47—50, 1927.
61. H. Tietze, Die Tiefbauarbeiten beim Umbau der Staatsoper in Berlin, „Deutsches Bauwesen" № 1, 1927.
62. „Zeitschr. Siemens-Bauunion", 1921—1932.
63. Ehrenberger, Versuche über Ergiebigkeit von Brunnen und Bestimmung der Durchlässigkeit des Sandes, „Zts. d. Öster. Ing.", V. № 9—14, 1928.
64. J. Kozeny, Über Grundwasserbewegung, „Wasserkraft und Wasserwirtschaft", 1927.
65. J. Kozeny, Theorie und Berechnung der Brunnen, „Wasserkraft und Wasserwirtschaft", 1933.
66. H. Weber, Die Reichweite von Grundwasserabsenkungen mittels Rohrbrunnen, Berlin, Julius Springer, 1928.
67. Ряд статей в русских и иностранных журналах, а также проспекты иностранных фирм.

Редактор *М. В. Краснопольский.* Техн. редактор *Д. М. Медриш.*
Сдано в набор 15/III 1935 г. Печатных листов 15½. Бум. листов 7¾ Подписано к печати 23/VII 1935 г.
Формат 72×105½. Изд. л.—21. Индекс С-55-5-2. ТКК № 55. Тип. зн. в 1 бум. л. 126.000.
Уполн. Главлита № В-104646. Издат. № 771. Тираж 6000. Заказ № 375.

2-я типография ОНТИ имени Евгении Соколовой. Ленинград, просп. Красных Командиров, 29.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

в книге Кусакин И. П. „Искусственное понижение уровня грунтовых вод"

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
58	2 снизу	a	
99	7 сверху	постепенного уменьшения	постепенно умеиьшающуюся
115	20 снизу	$R^{(n-}$	$\cdot R^{(n-2)}$
125	12 „	$\ln\frac{R}{-}$.	$\ln\frac{R}{x}$
143	4 „	$\mathrm{td}\,\alpha$	$\mathrm{tg}\,\alpha$
144	1 „	$^{q}(\ln R_2 -$	$\frac{q}{\pi k}(\ln R_2 -$
185	18 „	$\sqrt[4]{\frac{8(H-a-1)}{(H-b)^3}}$	$\sqrt[4]{\frac{8(H-b-1)}{(H-b)^3}}$
216	1 „	$XЦ$	$X_Ц$
238	9 сверху	$k = 0{,}0075$	$k = 0{,}00075$

Заказ № 375.