Исследования и доклады по гидрологии 38

Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании

Вклад в Международную гидрологическую программу

Руководство подготовлено Рабочей группой — проект 3.1

Редакционная коллегия:
Я. Киндлер
А. А. Соколов, председатель
Г. А. Шульц
Б. С. Эйхерт



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1984

Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании

Вклад в Международную гидрологическую программу

Руководство подготовлено Рабочей группой — проект 3.1

Редакционная коллегия:
Я. Киндлер
А. А. Соколов, председатель
Г. А. Шульц
Б. С. Эйхерт

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1984

Methods of hydrological computations for water projects

A contribution to the International Hydrological Programme

Report prepared by the Working Group — Project 3.1

Edited by
B. S. Eichert
J. Kindler
G. A. Schultz
A. A. Sokolov, Chairman

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression if any opinion whatsoever on the part of Unesco concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Published in 1982 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris

Printed by
Imprimerie de la Manutention, Mayenne

УДК 556.048(083.13) : 556.18.001.2=03.20=82

Перевод с английского Н. П. Артемьевой
под редакцией А. А. Соколова

Рассматриваются основные гидрологические характеристики, используемые при водохозяйственном проектировании и методы их определения, разработанные в СССР и за рубежом, а также методы оценки влияния планируемых водохозяйственных мероприятий на гидрологический режим и окружающую среду. Приводится описание математических моделей, применяющихся за рубежом для моделирования речных водосборов, процессов формирования стока весеннего половодья и дождевых паводков, речного стока в аридных и полуаридных районах, а также условий работы водохранилищ. Содержится подробный список литературы. Рассчитана на инженеров-гидрологов, гидротехников и других специалистов, занимающихся вопросами водного хозяйства.

© ЮНЕСКО на англ. яз., 1982 г.

М 1903030200-153 / 069(02)-84 КБ №-31-0,07

© Гидрометеоиздат/ЮНЕСКО

Русский перевод подготовлен Гидрометеоиздатом при финансовой поддержке ЮНЕСКО

Предисловие

Быстрый рост населения наряду с расширением орошаемого земледелия и интенсивным развитием промышленности повышает значимость количественных и качественных аспектов природных вод. Ввиду возрастающих проблем человечество начало сознавать, что оно не может больше следовать принципу «используй и выброси» ни в отношении водных, но в отношении любых других природных ресурсов. Поэтому становится очевидной необходимость последовательной политики рационального управления водными ресурсами.

Однако такая политика должна основываться на современной информации о запасах воды и закономерностях их изменения. Поэтому для решения водных проблем по инициативе ЮНЕСКО в 1965 г. была начата первая международная программа исследований гидрологического цикла — Международное гидрологическое десятилетие (МГД). В этой программе основное внимание было обращено на повышение квалификации кадров в области гидрологии.

Работа, выполненная во время МГД, вызвала интерес и имела большое значение для стран-участниц. К концу этого периода большинство стран — членов ЮНЕСКО сформировали национальные комитеты МГД для проведения соответствующих мероприятий в данной стране и для участия в международном сотрудничестве в рамках программы МГД. В результате этого значительно пополнились и расширились сведения о водных ресурсах земного шара. Гидрология начинает широко признаваться как самостоятельная научная дисциплина. Разрабатываются методы и средства подготовки специалистов-гидрологов.

Учитывая необходимость дальнейшего развития работ, проведенных во время МГД, а также следуя рекомендациям стран-участниц, ЮНЕСКО как продолжение МГД развернута новая долгосрочная межправительственная программа — Международная гидрологическая программа (МГП).

Хотя в своей основе МГП является научно-исследовательской и учебно-просветительной программой, в ЮНЕСКО с самого начала учитывалась необходимость проведения мероприятий, направленных на практическое решение глобальных проблем водных ресурсов. В соответствии с рекомендациями Конференции

ООН по водным проблемам 1977 г., цели МГП постепенно расширяются. В ее задачи входит не только рассмотрение вопросов взаимосвязи гидрологических процессов с окружающей средой и оценки влияния на них хозяйственной деятельности, но и научные аспекты многоцелевого использования и охраны водных ресурсов с учетом дальнейшего социально-экономического развития.

Таким образом, в рамках научной концепции МГП ее цели заметно расширены в направлении междисциплинарного подхода к оценкам, планированию и рациональному управлению водными ресурсами.

В качестве вклада в решение задач МГП ЮНЕСКО опубликованы две серии работ: «Исследования и доклады по гидрологии» и «Технические доклады по гидрологии». Помимо этих публикаций для интенсификации обмена информацией в тех областях, где она нужнее всего, издаются работы предварительного характера в виде технических документов.

Публикации серии «Исследования и доклады по гидрологии», к которой относится и настоящее издание, печатаются для ознакомления с полученными данными и основными результатами гидрологических исследований, а также для представления информации по используемым методам исследования. Эта серия включает труды некоторых симпозиумов. Предполагается, что эти работы представят теоретический интерес и будут иметь практическое значение при исследовании водных ресурсов, а также при их оценке и планировании рационального использования.

Содержание

1. Введение

1.1. Цели и область применения Руководства 10

1.2. Структура Руководства и рекомендации по его использованию 11

1.3. Связь с другими публикациями 13

1.4. Сведения о гидрологическом режиме как источник информации для проектирования водохозяйственных мероприятий 15

1.5. Основные этапы разработки водохозяйственных мероприятий (планирование, проектирование, строительство и эксплуатация) 17

Таблицы

1.1. Список литературных источников на английском языке, наиболее часто упоминаемых в данном Руководстве 18

1.2. Список адресов для заказов литературных источников, упоминаемых в Руководстве 19

1.3. Труды международных гидрологических конференций и симпозиумов 26

Список литературы 28

2. Обзор методов гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании

2.1. Гидрологические и метеорологические данные и их обработка 30

2.1.1. Введение —

2.1.2. Метеорологические данные —

2.1.3. Гидрологические данные 31

2.1.3.1. Данные об уровнях воды —

2.1.3.2. Данные о расходах воды —

2.1.3.3. Данные о стоке наносов 32

2.1.4. Временна́я дискретность данных —

2.1.5. Статистические особенности данных —

2.1.6. Моделирование данных 34

2.1.7. Оценка надежности данных —

2.2. Краткие сведения о методах гидрологических расчетов и их связи с различными типами водохозяйственных объектов 35

2.2.1. Общие положения —

2.2.2. Региональный анализ для восстановления недостающих данных 36

2.2.3. Определение естественного стока 37

2.2.4. Анализ изменчивости речного стока —

2.2.5. Гидрологическое моделирование 38

2.2.6. Другие методы гидрологических расчетов 40

2.2.7. Оценка последствий водохозяйственных мероприятий 41

Таблица

2.1. Методы гидрологических расчетов и типы водохозяйственных мероприятий 42

Список литературы 44

3. Расчетные гидрологические характеристики, необходимые при проектировании различных водохозяйственных объектов

3.1. Введение 47

3.1.1. Цели и назначение водохозяйственных мероприятий 48
3.1.2. Основные типы водохозяйственных мероприятий 49

3.2. Гидрологические расчеты при проектировании водохранилищ 51

3.2.1. Общие этапы расчетов для водохранилищ любых типов 52
3.2.2. Этапы расчетов при проектировании водохранилищ для регулирования паводков 53
3.2.3. Этапы расчетов для водохранилищ ГЭС 54
3.2.4. Этапы расчетов для водохранилищ, создаваемых в целях водоснабжения 55
3.2.5. Этапы расчетов для водохранилищ многоцелевого назначения —
3.2.6. Этапы расчетов для водохозяйственных мероприятий смешанного типа —

3.3. Гидрологические расчеты при проектировании мероприятий, не связанных с сооружением водохранилищ 56

3.3.1. Мероприятия по регулированию паводков —
3.3.2. Мероприятия для контроля качества воды 57
3.3.3. Мероприятия по орошению 58
3.3.4. Мероприятия по осушению территорий 59
3.3.5. Проектирование промышленного и коммунально-бытового водоснабжения 60
3.3.6. Навигационные мероприятия 61
3.3.7. Организация зон отдыха и обеспечение условий существования животного и растительного мира 62

3.4. Гидрологические расчеты при долгосрочном планировании комплексного использования водных ресурсов рек —

Таблица

3.1. Назначение водохозяйственных мероприятий, их цель и комплекс сооружений 64

Список литературы 67

4. Методы гидрологических расчетов, используемые при водохозяйственном проектировании

4.1. Методы регионального анализа гидрологических и метеорологических данных 69

4.1.1. Введение —

4.1.2. Однородность данных —
4.1.3. Статистические параметры 70
4.1.4. Картографирование гидрометеорологических данных 71
4.1.5. Регрессионный анализ 72
4.1.6. Водобалансовые соотношения 73
4.1.7. Применение регрессионного анализа при недостаточности данных измерений 74

Список литературы —
4.2. Определение естественного стока 75
4.2.1. Введение —
4.2.2. Сбор данных наблюдений 76
4.2.3. Связь между осадками и стоком 77
4.2.4. Расчет трансформации стока в водохранилище —
4.2.5. Расчет трансформации паводочного стока в руслах 78
4.2.6. Графические и регрессионные методы 79
Список литературы 80
4.3. Методы оценки изменчивости годового стока и характеристик гидрологического режима 81
4.3.1. Введение —
4.3.2. Изменчивость речного стока 82
4.3.2.1. Изменчивость годового стока —
4.3.2.2. Изменчивость характеристик гидрологического режима —
4.3.3. Построение кривых распределения вероятностей речного стока 83
4.3.3.1. Графический метод —
4.3.3.2. Метод моментов 84
4.3.3.3. Метод наибольшего правдоподобия —
4.3.3.4. Другие методы —
4.3.4. Применение кривых распределения вероятностей к изучению внутригодового распределения речного стока —
4.3.4.1. Кривые распределения средних месячных расходов 85
4.3.4.2. Кривые распределения средних суточных расходов —
4.3.5. Отсутствие данных наблюдений —
Список литературы 86
4.4. Определение кривых обеспеченности экстремальных расходов и уровней в естественных условиях и в условиях регулирования стока —
4.4.1. Введение —
4.4.2. Многолетние ряды наблюдений 87
4.4.3. Однородность данных —
4.4.4. Кривые обеспеченности расходов 88
4.4.5. Кривые обеспеченности максимальных расходов в естественных условиях —
4.4.6. Кривые обеспеченности максимальных расходов в условиях регулирования стока 89
4.4.7. Кривые обеспеченности минимальных расходов в естественных условиях и в условиях регулирования стока 90
4.4.8. Определение кривых обеспеченности уровней воды рек и водохранилищ —
Список литературы 91
4.5. Определение расчетных максимальных расходов воды 92
4.5.1. Введение —
4.5.2. Общие положения —
4.5.3. Максимальные расходы расчетной обеспеченности 93
4.5.4. Максимально возможный расход 95
4.5.5. Переход от расчетных дождевых осадков к стоку 96
4.5.5.1. Потери —
4.5.5.2. Снеготаяние —
4.5.5.3. Прямое стекание 97

4.5.5.4. Базисный сток —
4.5.5.5. Трансформация и слияние речных потоков 98
4.5.5.6. Трансформация стока в водохранилище —
4.5.5.7. Применение вычислительной техники 99

Таблица

4.5-2. Расчетные максимальные характеристики расходов воды и волнения для водохранилищ в зависимости от категории плотин 100

Список литературы 102

4.6. Расчет превышения гребня сооружений при ветровом и волновом воздействиях 103

4.6.1. Введение —
4.6.2. Определение понятия превышения гребня сооружений над уровнем воды 104
4.6.3. Назначение —
4.6.4. Каналы и плотины —
4.6.5. Большие озера и береговые дамбы 105
4.6.6. Насыпные дамбы 106
4.6.7. Ветровой нагон —
4.6.8. Высота волн 107
4.6.9. Накат волны 108
4.6.10. Расчетный уровень воды —
4.6.11. Расчетные характеристики ветра —
4.6.12. Поправки на непредвиденные обстоятельства —

Список литературы 109

4.7. Определение профилей водной поверхности 110

4.7.1. Введение —
4.7.2. Одномерное установившееся движение воды —
4.7.3. Одномерное неустановившееся движение воды 111

4.7.3.1. Гидрологические методы —
4.7.3.2. Методы, частично использующие уравнения неустановившегося движения воды (уравнение Сен-Венана) —
4.7.3.3. Методы, основанные на использовании полного уравнения неустановившегося движения воды —

4.7.4. Двумерное установившееся и неустановившееся движение 112

Список литературы —

4.8. Гидрологические расчеты при определении объема водохранилища 113

4.8.1. Введение —
4.8.2. Противопаводочный объем водохранилища 114
4.8.3. Полезный объем водохранилища 117
4.8.4. Объем водохранилища для удовлетворения нужд гидроэнергетики 121
4.8.5. Объем, резервируемый для отложения наносов 123
4.8.6. Мертвый объем водохранилища 125

Список литературы —

4.9. Гидрологические расчеты при построении диспетчерских графиков водохранилищ 127

4.9.1. Введение —
4.9.2. Методы общего анализа 129
4.9.3. Анализ одиночного водохранилища 131
4.9.4. Анализ системы водохранилищ 136
4.9.5. Имитационные модели 137

4.9.6. Оптимизационные модели 138
4.9.7. Определение сбросов воды из водохранилища в периоды критических паводков 139
Список литературы 142
4.10. Оценка влияния проектируемых мероприятий на сток, испарение, движение наносов, подземные воды и окружающую среду 144
4.10.1. Введение —
4.10.2. Влияние проектируемых мероприятий на речной сток 145
4.10.2.1. Водохранилища —
4.10.2.2. Мероприятия, не связанные со строительством водохранилищ —
4.10.2.3. Внутрибассейновые системы 146
4.10.3. Влияние водохозяйственных мероприятий на испарение 147
4.10.4. Влияние проектируемых мероприятий на окружающую среду —
4.10.4.1. Водохранилища 148
4.10.4.2. Мероприятия, не связанные с созданием водохранилищ —
4.10.5. Влияние проектируемых мероприятий на движение наносов 149
4.10.5.1. Водохранилища —
4.10.5.2. Мероприятия, не связанные со строительством водохранилищ 150
4.10.6. Влияние проектируемых мероприятий на подземные воды 151
4.10.7. Влияние проектируемых мероприятий на температурный режим воды —
4.10.7.1. Водохранилища —
4.10.7.2. Мероприятия, не связанные с созданием водохранилищ 152
4.10.8. Влияние водохозяйственных мероприятий на ледовый режим —
4.10.8.1. Водохранилища —
4.10.8.2. Мероприятия без создания водохранилищ 153
4.10.9. Использование вычислительных программ в расчетах речного стока и исследованиях качества воды —
Список литературы 154
Приложение к главе 4: «Методы гидрологических расчетов, используемые при водохозяйственном проектировании». 156
Обобщенные математические модели: —
1. HEC-1 157
2. SSARR —
3. Модель имитации гидрологических условий водосбора 158
4. SWMM —
5. Модель резервуара (Танк-модель) 159
6. Линейно несвободная система (CLS) 160
7. STORM —
8. WQRRS 161
9. HEC-5 162
Список литературы 163

1. Введение

1.1. Цели и область применения Руководства

Планирование и проектирование водохозяйственных мероприятий производится целиком и полностью на основании гидрологических расчетов. Настоящее издание подготовлено как руководство по гидрологическому анализу и расчетам. Оно предназначено для инженеров, гидрологов и представителей других профессий, в особенности для специалистов развивающихся стран, остро нуждающихся в рекомендациях по применению современных методов. В Руководстве дается краткое описание наиболее употребительных методов с указанием условий, при которых эти методы могут использоваться. Кроме того, приводятся многочисленные ссылки на международные и национальные публикации, содержащие информацию о практическом применении методов для получения расчетных гидрологических характеристик, необходимых для различных типов водохозяйственных проектов. Дается также краткое описание программ расчета на ЭВМ.

При подготовке Руководства не ставилась задача дать описание самой процедуры расчета. Его составители стремились представить сведения о работах, в которых можно найти подробное описание методов расчета, и указать, какой из них может дать в определенных условиях наиболее надежный результат.

Работа посвящена в основном вопросам использования поверхностных вод. Расчеты по использованию подземных вод здесь не рассматриваются.

Руководство подготовлено Рабочей группой по методам расчета гидрологических характеристик при водохозяйственном проектировании в рамках Международной гидрологической программы (МГП — проект 3.1) под председательством проф. А. А. Соколова. В состав Рабочей группы также входили: Н. Б. Айботеле (Гана), Р. М. Валлехос (Аргентина), Я. А. Ван дер Маде (Нидерланды), Х. Киккава (Япония), Я. Киндлер (Польша), Р. Хегстад (Норвегия), Х. Херас (Испания), Г. А. Шульц (Федеративная Республика Германии), Б. С. Эйхерт (США).

Из числа членов Рабочей группы избрана редакционная коллегия по подготовке Руководства в составе Киндлера, Соколова, Шульца и Эйхерта. Активное участие в работе этой коллегии принимали сотрудник Секретариата ВМО А. Дж. Аскью и В. Вингард (Норвегия). Окончательное редактирование и подготовка рукописи к печати осуществлялись под руководством Эйхерта.

1.2. Структура Руководства и рекомендации по его использованию

Руководство состоит из четырех глав и одного приложения. В главе 1 в общих чертах раскрывается содержание остальных глав с указанием предполагаемого круга читателей, дается обзор методов гидрологических расчетов при проектировании мероприятий по управлению водными ресурсами и описываются этапы их осуществления (планирование, проектирование, строительство и эксплуатация).

В главе 2 «Обзор методов гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании» приводятся основные сведения о гидрологических и метеорологических данных и их обработке и дается краткое описание методов гидрологических расчетов водохозяйственных мероприятий.

В табл. 2.1 приводятся методы гидрологических расчетов, кратко описанные в главе 2 (их критический анализ и подробный список литературы см. в главе 4), а также их связь с типами водохозяйственных объектов, рассмотренных в главе 3, где перечисляются все расчетные гидрологические характеристики для каждого типа сооружений.[1]

Глава 3 «Расчетные гидрологические характеристики, необходимые при проектировании различных водохозяйственных объектов» содержит краткую информацию об основных типах водохозяйственных объектов различного назначения. Кроме того, в этой главе подробно перечисляются гидрологические характеристики, обычно используемые при планировании и проектировании различных мероприятий. Для каждой характеристики, приведенной в главе 3, дается ссылка на соответствующую часть главы 4, содержащую критический анализ методов расчета данной характеристики, и ссылка на соответствующие литературные источники.

В главе 4 «Методы гидрологических расчетов, используемые при водохозяйственном проектировании» дается краткое описание и критический анализ методов, которые могут использоваться для расчета гидрологических характеристик, перечисленных в главе 3, а также ссылки на соответствующие авторитетные литературные источники, содержащие подробные описания этих методов. В этой главе приводятся также ссылки на программы расчета, широко используемые при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования.

В приложении к главе 4 дается краткое описание некоторых

---

[1] Термины «расчетная гидрологическая характеристика» и «методы гидрологических расчетов» могут привести читателя в некоторое смущение при попытке провести четкое различие между ними. В некоторых случаях перечень методов гидрологических расчетов (см., например, табл. 2.1) может служить перечнем названий расчетных гидрологических характеристик (например, расчетный максимальный расход, по которому определяется пропускная способность водослива, является гидрологической характеристикой, причем существует несколько методов ее расчета).

обобщенных программ для ЭВМ, которые могут быть использованы при определении различных гидрологических характеристик, и приводится соответствующий список литературы.

Для наиболее эффективного использования Руководства рекомендуется:

1) просмотреть главы 1—3 и ознакомиться в общих чертах с вводным материалом и структурой Руководства;

2) проверить, имеется ли возможность достать бо́льшую часть литературных источников, приведенных здесь, с подробным описанием расчетных методов, которые предполагается использовать (см. табл. 1.1). В случае отсутствия необходимых источников следует заказать соответствующие публикации по адресам, приведенным в табл. 1.2;

3) найти по табл. 2.1 тип объекта, для проектирования которого необходим гидрологический анализ (например, водохранилище для гидроэлектростанции). Пользуясь той же таблицей, найти пункты главы 3, относящиеся к этому объекту (например, в п. 3.2.1 обсуждаются все типы водохранилищ, а в п. 3.2.3 — водохранилища для гидроэлектростанций). С помощью табл. 2.1 подобрать метод расчета и найти относящийся к нему пункт главы 4. Все это даст общее представление о будущей работе (используемые методы обсуждаются в п. 4.1—4.10);

4) после этого следует обратиться к тем пунктам главы 3, которые касаются выбранного типа объекта (например, п. 3.2.1 и 3.2.3 по табл. 2.1 или по оглавлению для главы 3). В соответствующих пунктах главы 3 приводится перечень расчетных гидрологических характеристик, необходимых при водохозяйственном проектировании (например, в п. 3.2.1 приводится 15, а в п. 3.2.3— 7 таких характеристик). Для каждого этапа расчета необходимо найти соответствующие ссылки на другие пункты (например, в первом абзаце п. 3.2.1 дается ссылка на п. 4.1 по региональным исследованиям);

5) после этого рекомендуется просмотреть материал главы 4, на который дается ссылка для каждой расчетной характеристики, и подобрать необходимую литературу, содержащую подробное описание соответствующих методов;

6) произвести расчет гидрологических характеристик, используя литературные источники, приведенные в главе 4.

Списки литературы в Руководстве приводятся в конце глав 1—3, после приложения к главе 4, а также после каждого пункта главы 4 (4.1, 4.2 и т. д.) из-за большого количества ссылок в каждом из них. Кроме того, каждый пункт главы 4 касается важных методов гидрологических расчетов, которые можно проводить независимо от расчетов, приведенных в других пунктах.

1.3. Связь с другими публикациями

Из-за ограниченного объема Руководства его составители решили не давать подробного описания методов гидрологических расчетов, а только привести ссылки на наиболее распространенные международные и национальные издания. Поэтому одной из основных задач Руководства была идентификация расчетных гидрологических характеристик, необходимых для различных типов водохозяйственных объектов (см. главу 3), и подбор опубликованных материалов, содержащих подробное описание методик определения этих характеристик (в главе 4 описаны методы гидрологических расчетов, а в главе 3 — основные гидрологические характеристики). Связь настоящего Руководства с другими публикациями показана главным образом на материалах, использованных в главе 4. Большая часть этих работ написана на английском языке, так как он является рабочим языком Рабочей группы МГП. Литературные источники, на которые наиболее часто ссылаются в главе 4, сведены в табл. 1.1. Для использования Руководства с максимальной эффективностью важно (для читающих на английском языке) иметь возможность пользоваться литературой, указанной в табл. 1.1.

Если для конкретной работы нужна информация нескольких пунктов, следует достать большую часть работ, на которые ссылаются в этих пунктах. В табл. 1.2 приводятся адреса организаций, где можно заказать эти издания. В каждом списке литературы в конце описания каждой публикации в виде индекса (например, A-10, B-19) дается указание на эти организации в соответствии с табл. 1.2.

В Руководстве не использованы многие другие публикации, содержащие аналогичный материал, если они: 1) по своему характеру дублируют использованные работы; 2) неизвестны членам Рабочей группы (особенно это относится к работам не на английском языке); 3) к ним не имеется свободного доступа.

Большая часть опубликованных работ широко известна международной аудитории и предназначена главным образом для студентов и научных сотрудников, а не для инженеров, принимающих участие в практических работах по водохозяйственному планированию.

В рамках МГП-II Рабочая группа по проекту А. 2.10 начала подготовку к печати «Сборника типовых примеров по методам гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании». В сборник будут включены расчетные методы и примеры осуществленных проектов, а также основные сведения об отдельных гидрологических методах, применяемых при водохозяйственном проектировании, что еще больше повысит практическую ценность книги для планирующих организаций, проектировщиков и инженеров.

Проведение МГД и МГП вызвало интенсивный обмен идеями по основным проблемам гидрологии и научными достиже-

ниями в области гидрологических расчетов. Усилиями ЮНЕСКО, ВМО, МАГН и национальных комитетов МГП проводились многочисленные международные научные конференции, симпозиумы, семинары и заседания рабочих групп, ссылки на труды которых приведены в табл. 1.3.

В 1979 г. в Ленинграде состоялся Международный симпозиум по вопросам гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании (тема данного Руководства), организаторами которого были ЮНЕСКО, ВМО и МАГН в сотрудничестве с Советским национальным комитетом МГП. На этом симпозиуме было заслушано более 70 научных докладов представителей стран — участниц МГП. Труды этого симпозиума опубликованы в СССР в 1981 г. под названием «Специфические аспекты гидрологических расчетов для водохозяйственного проектирования».

Результаты гидрологических исследований и данные, полученные при измерении элементов гидрологического режима, обобщаются в различных международных публикациях. Особый интерес с точки зрения гидрологических исследований и практических инженерных расчетов представляют результаты исследований на репрезентативных и экспериментальных водосборах (Toebes, 1970), методы водобалансовых расчетов (Sokolov, 1974), сбор и обработка данных для исследования стока половодий и паводков (Snyder, 1971), «Атлас гидрологических карт» (Unesco, 1974), исследования качества воды (СЭВ, 1977), работы по методам расчета паводочного стока (Sokolov, 1976).

По вопросам практической гидрологии ВМО подготовлен к печати целый ряд работ, например «Метеорологические и гидрологические данные, необходимые при планировании развития водных ресурсов» (Андреянов, 1975), «Руководство по гидрологической практике» (WMO, 1975). Новейшие достижения в области гидрологии включены в серию гидрологических справочников (Viessman, 1977; Dubreuil, 1974; Heras, 1972; National Environmental Research Council, 1975).

Большое количество работ по вопросам качества воды, обработки и интерпретации данных опубликовано различными организациями ООН. К ним относятся «Руководство по оперативной гидрологии» (UNEP, 1978), «Служба качества вод» (Unesco/WMO, 1978) и др. Для развития гидрологии большое значение имеют монография «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» и «Атлас мирового водного баланса» (Unesco, 1978b; Unesco, 1978a).

В рамках МГП подготовлены к печати книги: «Справочник по методам расчета водного баланса крупных озер и водохранилищ», т. 1 (Методология) (Unesco, 1981), «Сборник примеров по расчетам низкого стока», а также техническая статья «Исследование водного режима речных бассейнов в условиях орошения».

Недавно по инициативе ВМО началось осуществление Гидрологической оперативной многоцелевой подпрограммы (ГОМС), целью которой является изыскание способов и средств для между-

народного обмена расчетными методами, используемыми в оперативной гидрологии между странами-участницами, включая методы сбора, передачи и обработки информации, используемой при проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов. Обмен методами осуществляется в виде публикаций соответствующих справочников и инструкций, технических данных и программ для ЭВМ. Эти работы имеются в распоряжении гидрометеорологических служб и могут использоваться в различных водохозяйственных проектах в соответствии с главой 3 данного Руководства.

1.4. Сведения о гидрологическом режиме как источник информации для проектирования водохозяйственных мероприятий

Гидрологические характеристики составляют основу для управления водными ресурсами, которое невозможно осуществлять, не имея сведений о качестве воды, ее пространственном распределении и изменении во времени.

В последние годы происходит интенсивное развитие гидрологии благодаря усовершенствованию систем сбора данных, т. е. перехода от наблюдений за редкими событиями (половодья, паводки, засухи, аномалии в ледовом режиме и т. д.) к систематическим наблюдениям на все расширяющейся сети станций и постов. В настоящее время в мире функционируют 60 тыс. гидрологических постов и более 100 тыс. метеостанций, проводящих систематические наблюдения за различными характеристиками гидрометеорологического режима рек, озер, водохранилищ, океанов и подземных вод. В некоторых странах методы, применяемые при проектировании и обслуживании гидрометеорологической сети, регламентируются специальными инструкциями и руководствами (Гидрометеоиздат, 1969; 1975; 1978; 1973; [1] U. S. Geological Survey, 1978).

Развитие сетей по сбору гидрологических данных значительно пополнило сведения о мировых водных ресурсах. Остается все меньше белых пятен на гидрологических картах всего мира и отдельных стран. Все больше ощущается необходимость контактов гидрологии с метеорологией и другими дисциплинами, что способствует усовершенствованию региональных и глобальных исследований всех элементов гидрологического режима.

Расчет основных элементов гидрологического режима, включая характеристики речного стока, осадки, испарение, динамику

---

[1] Такое сокращение используется здесь и далее по тексту для краткого описания ссылок на инструкции, руководства, рекомендации и наставления, подготовленные Государственным гидрологическим институтом (СССР) и опубликованные Гидрометеоиздатом.

движения водных масс, сток наносов, качество воды, т. е. параметров, очень важных для проектирования, строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов и гидротехнических сооружений, является одной из главных задач практической гидрологии. Безопасность работы, стоимость и эффективность водохозяйственных мероприятий зависят во многом от надежности гидрологических расчетов.

Надежное определение гидрологических характеристик для проектирования различных сооружений с разным расчетным сроком службы осложняется необходимостью учета изменений этих характеристик во времени (например, изменения стока воды и наносов). Опубликован целый ряд работ по общим принципам решения этих проблем при проектировании водохозяйственных сооружений (Крицкий, 1952, 1977; Maass, 1962). Особое значение для получения расчетных гидрологических характеристик имеют многолетние ряды гидрологических данных. Отсутствие данных или их недостаточность вызывает многочисленные трудности.

В дополнение к национальным и региональным изданиям, содержащим сведения о речном стоке, начиная с 1965 г. ЮНЕСКО публикует данные о расходах воды по гидрологическим станциям с наиболее длинными периодами наблюдений под общим названием «Расходы избранных рек мира» (Unesco, 1965).

До настоящего времени отдельные водохозяйственные проблемы решались на местном уровне (например, строительство водохранилищ для ГЭС или навигационных каналов). Однако в эти мероприятия могут быть вовлечены целые речные бассейны или регионы, и, следовательно, будут затронуты интересы различных областей народного хозяйства, а последствия таких мероприятий могут оказать воздействие на окружающую среду и социально-экономическое развитие на огромных территориях. Такие крупномасштабные проекты часто вызывают значительные изменения окружающей среды. Они могут влиять на ландшафт и природные условия, изменять водный и солевой балансы внутренних морей, создавать потенциальную возможность изменения климата и влагооборота в атмосфере.

Одной из самых сложных проблем гидрологии является понимание и предсказание изменений водного режима и водного баланса, вызванных хозяйственной деятельностью. Несмотря на то что уже делались неоднократные попытки оценить воздействие таких процессов, как урбанизация и вырубка лесов, на гидрологический режим (Unesco, 1974, 1980; FAO, 1969; Шикломанов, 1975), последствия всех возможных изменений в комплексе предсказать чрезвычайно трудно. Сложность этой проблемы можно частично объяснить тем, что результаты воздействия на природу в больших масштабах проявляются не сразу, и могут пройти десятки лет прежде чем обнаружатся какие-то отрицательные или необратимые изменения в природных условиях. Поэтому очень важным аспектом современной водохозяйственной деятельности является оценка и предсказание возможных ее последствий для

окружающей среды, что требует разработки научно обоснованных мер для защиты окружающей среды от загрязнения и истощения. В частности, надо определить и оценить результаты воздействия урбанизации, вырубки лесов и облесения, вспашки и других агротехнических мероприятий, бурения, сбросов промышленных вод и других видов хозяйственной деятельности в речных бассейнах, которые могут изменять водный режим и водный баланс. Возможно, решению этих сложных гидрологических проблем будет способствовать более интенсивное применение спутниковой информации в гидрологии и водном хозяйстве (Reeves, 1975; Кудрицкий, 1977; Куприянов, 1976; Wiesnet, 1979).

Развитие водных ресурсов регулируется специальными законами о воде. В них также определяется приоритетность использования воды. Например, законы о воде могут требовать, чтобы схемы регионального и межбассейнового многоцелевого использования водных ресурсов разрабатывались с учетом настоящих и перспективных требований всех отраслей национальной экономики на основе прогнозов экономического и социального развития (Environment Canada, 1975). Предсказание изменений водного режима и водного баланса является обязательной частью таких схем и составляет фундамент для научного обоснования мероприятий, обеспечивающих наиболее эффективное использование водных ресурсов и их защиту.

1.5. Основные этапы разработки водохозяйственных мероприятий (планирование, проектирование, строительство и эксплуатация)

Разработка водохозяйственных мероприятий является сложной задачей, выполнение которой требует минимум 3—5 лет от первоначального замысла до завершения строительства, а для больших объектов это время обычно увеличивается в несколько раз (James, 1971). Она происходит поэтапно: планирование, проектирование, строительство, эксплуатация. Настоящее Руководство касается в основном стадии планирования, поскольку оно базируется целиком и полностью на гидрологических расчетах. Расчетные гидрологические характеристики, используемые на стадии проектирования и строительства, не являются ключевыми, и мы не будем подробно останавливаться на них. Хотя гидрологические расчеты играют первостепенную роль на стадии эксплуатации многих типов водохозяйственных сооружений, в данном Руководстве они обсуждаются только для того, чтобы проследить их влияние на процесс планирования.

Деление процесса разработки водохозяйственного мероприятия на четыре этапа является довольно четким, исключая границу между этапами планирования и проектирования. Проектирование можно считать переводом разработанного плана (на стадии пла-

нирования) на специальный язык чертежей и документов, необходимых для осуществления строительства. Стадия эксплуатации, хотя и отделена от стадии планирования, в большой степени определяется критериями, допущениями и планами, разработанными и принятыми во время планирования. Конечно, после завершения строительства слишком поздно начинать думать об эксплуатации объекта, а во многих случаях именно эксплуатация определяет его тип, размер и стоимость, а также экономическую эффективность.

Весь процесс разработки мероприятия от первоначального замысла до окончания строительства может делиться на более мелкие этапы, различные в разных странах и даже в разных фирмах и организациях одной страны. Джеймс и Ли (James and Lee, 1971) предлагают следующую схему, применимую для большинства объектов:

1) обоснование необходимости строительства объекта;
2) получение разрешения на гидрологические исследования;
3) обсуждение широкой общественностью;
4) определение возможности осуществления проекта для подтверждения его обоснованности;
5) привлечение местных организаций к оказанию финансовой и моральной поддержки проекта;
6) ознакомление с проектом заинтересованных сторон;
7) утверждение проекта;
8) изыскание источников финансирования проектирования и строительства объекта;
9) сбор дополнительных данных и проведение детальных исследований;
10) подготовка окончательных планов, технической документации и определение стоимости объекта;
11) выбор подрядчика и строительство объекта;
12) пуск объекта и ввод в эксплуатацию.

Таблица 1.1.

Список литературных источников на английском языке, наиболее часто упоминаемых в данном Руководстве

Международные публикации	Индекс по табл. 1.2.
Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — WMO, N 356, Geneva.	A-10 [1]
Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Flood flow computation methods compiled from world experience. — The Unesco Press, Paris.	A-7
Unesco. 1976. World catalogue of very large floods. — Studies and Reports in Hydrology, vol. 21. The Unesco Press, Paris.	A-7
United Nations. 1967. Assessment of the magnitude and frequency of flood flows. — Water Resources Series, N 30. Economic Commission for Asia and the Far East, New York.	A-8

[1] Распродана в 1980 г. Возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.

WMO. 1969. Estimation of maximum floods. — Technical Note, N 98. WMO, N 233, T. P. 126, Geneva. A-10.

WMO. 1973. Manual for estimation of probable maximum precipitation. — Operational Hydrology Report, N 1. WMO, N. 332, Geneva. A-10

WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3rd ed. — WMO, N 168, Geneva. A-10[1]

WMO. 1975. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. — Operational Hydrology Report, N 7. WMO, N 429, Geneva. A-10

Другие публикации

Bureau of Reclamation. 1977. Design of small dams. 2nd ed. — U. S. Department of the Interior. B-57

Chow V. T. 1964. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill Book Company, New York. B-27

Davis Calvin V. and *Kenneth E. Sorensen.* 1969. Handbook of applied hydraulics. 3rd ed. — McGraw-Hill Book Company, New York. B-27

Henderson F. M. 1966. Open channel flow. — The McMillan Company, New York. B-25

James L. D., Lee R. R. 1971. Economics of water resources planning. — McGraw-Hill Book Company, New York. B-27

Linsley Ray K., Joseph B. Franzini. 1979. Water resources engineering. 2nd ed. — McGraw-Hill Book Company, New York. B-27

Linsley Ray K., Kohler Max A., Paulhus Joseph L. H. 1975. Hydrology for engineers. 2nd ed. — McGraw-Hill Book Company, New York. B-27

Rouse Hunter (ed.). 1950. Engineering hydraulics. — John Wiley & Sons, Inc. B-23

The Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1971—1977. Hydrologic engineering methods for water resources development. — A United States Contribution to the International Hydrological Decade. Vols. 1—12, California. B-32, B-52

U. S. Water Resources Council. 1977. Guidelines for determining flood flow frequency. — Bulletin, N 17A, Washington, D. C. B-57

Vanoni Vito (ed.). 1976. Sedimentation engineering. — American Society of Civil Engineers, New York. B-3

Таблица 1.2.

Список адресов для заказов литературных источников, упоминаемых в Руководстве

Индекс

Международные организации

A-1 Economic Commission for Europe (ECE)
10, Palais des Nations
CH-1211 Geneva
Switzerland

[1] Готовится к опубликованию 4-е издание Руководства на английском языке в двух томах. Перевод на русский язык 3-го издания Руководства опубликован в 1975 г., индекс издательства по табл. 1.2 В-68 (Руководство по гидрологической практике. 3-е изд. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975).

A-2 Food and Agricultural Organization (FAO)
UNIPUB, Inc.
345 Park Avenue South
New York, NY 10010
USA

A-3 International Association for Hydraulic Research (IAHR)
P. O. Box 177
2600 MH Delft

The Netherlands

A-4 International Association of Hydrological Sciences (IAHS)
Office of the Treasurer IAHS
2000 Florida Avenue
Washington, D. C. 20009
USA

или

International Association of Hydrological Sciences (IAHS)
Blackwell Scientific Publications, Ltd.
Osney Mead
Oxford OX2 OEL
United Kingdom

A-5 International Atomic Energy Agency (IAEA)
Wargamerstrasse 5
P. O. Box 100
A-1400
Vienna
Austria

A-6 International Commission on Large Dams
151 Boulevard Haussmann
75008 Paris
France

A-7 The Unesco Press
UNIPUB, Inc.
(только для заказов из США)
345 Park Avenue South
New York, NY 10010
USA

или

The Unesco Press
Unesco
Place de Fontenoy
75700 Paris
France

A-8 United Nations
Publications Room A-3315
New York, NY 10017
USA

или

United Nations
Sales Section
Palais de Nations
CH-1211 Geneva
Switzerland

A-9 World Health Organization
Organisation Mondiale
De La Santé
CH-1211 Geneva 27
Suisse

A-10 World Meteorological Organization Publications Center
UNIPUB, Inc.
(только для заказов из США)
345 Park Avenue South
New York, NY 10010
USA

[redacted]

World Meteorological Organization
P. O. Box 5
CH-1211
Geneva, 20
Switzerland

Издательства

B-2 American Geophysical Union
200 Florida Avenue
Washington, D. C. 20009
USA

B-3 American Society of Civil Engineers
Engineering Societies Library
345 East 47th Street
New York, NY 10017
USA

B-4 American Society of Photogrammetry
105 North Virginia Avenue
Falls Church, VA 22046
USA

B-5 B. T. Batsford, Ltd., London
4 Fitzhardinge Street
London W1H OAH
England

B-6 Bureau de Recherches Geologiques et Minieres
Department de Documentation
B.P. 6009
F 45018 Orleans
France

B-8 Colorado State University
Hydrology Department
Engineering Research Center
Foothills Campus-Publication Department
Fort Collins, CO 80523
USA

B-9 D. C. Heath and Company
125 Spring Street
Lexington, MA 02173
USA

B-10 Deutsche Hydrographische Institut
Bernhard-Nocht, Street 78
2000 Hamburg 4
Federal Republic of Germany

B-11 Elsevier Scientific Publishing Company
P. O. Box 211
1000 A. E. Amsterdam
The Netherlands

или

American Elsevier Publishing Company
52 Vanderbilt Avenue
New York, NY 10017
USA

B-12 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
Johannesstrasse — 3A
D-7000 Stuttgart 1
Federal Republic of Germany

B-13 Editora Edgard Blucher
Rua Pedroso Alvarenga 1245
2 Andar C. P. 5450, 04531
Sao Paulo, SP
Brazil

B-14 Edward Arnold, London
41 Bedford Square
London WC1B 3DQ
England

B-16 Guathier-Villars
17 Rue Remy-Dumoncel
75014 Paris
France

B-17 Harper and Row Publishers, Inc.
10 East 53rd Street
New York, NY 10022
USA

B-18 Harvard University Press
79 Garden Street
Cambridge, MA 02138
USA

B-19 Instituto de Hidrologia
Escuela de Hidrologia
Bajo Virgin del Puerto 3
Madrid 5
Spain

B-20 International Institute of Environmental Engineering
Oude, Delft 95
P. O. Box 3015
2601 da Delft
The Netherlands

B-21 Jenkins Publishing Company
P. O. Box 2085
Austin, TX 78768
USA

B-22 Johns Hopkins University Press
Baltimore, MD 21218
USA

B-23 John Wiley and Sons, Inc.
605 Third Avenue
New York, NY 10016
USA

B-24 United States Department of Commerce
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
California-Nevada River Forecast Center
National Weather Service
1641 Resources Building
1416 Ninth Street
Sacramento, CA 95814
USA

B-25 The Macmillan Company
866 Third Avenue
New York, NY 10022
USA

B-26 Masson
220 Boulevard Saint Germain, F-75006
Paris
France

B-27 McGraw-Hill Book Company
1221 Avenue of the Americas
New York, NY 10020
USA

B-29 Natural Environment Research Council
Institute of Hydrology
MacLean Building, Crowmarsh Gifford
Wallingford OXON
OX10 8BB
England

B-31 National Research Center for Disaster Prevention
Science and Technology Agency
Ten-Nodai, 3-Chome
Sakura-Mura, Niihari-Gun
Ibaraki, 305
Japan

B-32 The National Technical Information Service (NTIS)
United States Department of Commerce
5285 Port Royal Road
Springfield, VA 22161
USA

B-33 Norconsult A/S
Maries Vei 20
1322 Hovik
Norway

B-34 Nordic Hydrology
Isva, Technical University, Denmark
Building 115
DK-2800 Lyngby
Denmark

B-35 Norges Teknishke Hgskele
River and Harbour Laboratory
Klaeburegen 153
7034 Trondheim
Norway

B-36 Norwegian Hydrological Committee
P. O. Box 5091
Majorstua
Oslo 3
Norway

B-37 Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM)
Service Diffusion
70—74 route d'Aulnay
93140 Bondy-France

B-38 Pergamon Press, Inc.
Maxwell House
Fairview Park
Elmsford, NY 10523
USA

или

Pergamon Press
Headington Hill Hall
Oxford OX30BW
England

B-39 Prentice Hall, Inc.
Attn: Mail Order Service
Old Tappan, New Jersey, 07632
USA

B-42 G. T. Orlob and Associates
424 Brentwood Drive
Benicia, CA 94510
USA

B-43 Richard D. Irvin, Inc.
1818 Ridge Road
Homewood, IL 60430
USA

B-44 Royal Meteorological Society
James Glacier House
Grenville Place
Bracknell, Berkshire RG121BX
England

B-45 Science Magazine
American Association for the Advancement of Science
1515 Massachusetts Ave., Northwest
Washington, D. C. 20005
USA

B-46 Société Hydrotechnique de France
199, Rue de Grenelle 75007
Paris
France

B-48 Stanford University
Microfilms
300 Zeeb Road
Ann Arbor, MI 48106
USA

B-49 Technical University of Dresden
Mommsenstrasse 12
8027 Dresden
German Democratic Republic

B-50 Texas Department of Water Resources Library
P. O. Box 13087
Capitol Station
Austin, TX 78711
USA

B-51 United States Department of the Army
Office, Chief of Engineers
Publications Depot
890 S. Pickett Street
Alexandria, VA 22304
USA

B-52 United States Army Corps of Engineers
The Hydrologic Engineering Center
609 Second Street
Davis, Ca 95616
USA

B-53 Division Engineer Commander
United States Army Engineer Division, North Pacific
P. O. Box 2870
Portland, OR 97208
USA

B-55 United States Environmental Protection Agency
401 M Street, Southwest
Washington, D. C. 20460
USA

B-56 United States Geological Survey
Branch of Distribution
Box 25286
Denver Federal Center
Denver, CO 80225
USA

или

United States Geological Survey
Office of Water Data Coordination
USGS Mail Stop 417
National Center
Reston, VA 22092
USA

B-57 United States Government Printing Office
Superintendent of Documents
Washington, D. C. 20402
USA

B-59 University of Minnesota
Water Resources Research Center
866 Biological Sciences Center
1445 Gortner Avenue
St. Paul, M. N 55108
USA

B-60 Veb Verlag für Bauwesen
Franzosische Street 12—14
108 Berlin
German Democratic Republic

B-61 Water Information Center
The North Shore Atrium
6800 Jericho Turnpike
Syosset, NY 11791
USA

B-62 Water Resources Publications
P. O. Box 2841
Littleton, CO 80161
USA

B-63 Department of Supply and Services Canada
Mail Order
270 Alberta Street
Ottawa, Ontario
K1A 059
Canada

B-64 Thomas Telford Ltd.
1—7 Great George Street
London SWIP 3AA
UK

B-65 Krieger Publishing Company
645 N. York Avenue
Huntington, NY 11743
USA

B-66 СССР
Москва
Совет экономической взаимопомощи (СЭВ)

B-67 СССР
191041 Ленинград
Марсово поле, 1
Энергоатомиздат

B-68 СССР
199053 Ленинград
2-я линия, 23
Гидрометеоиздат

B-69 СССР
195220 Ленинград
Гжатская ул., 21
ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева

B-70 СССР
380060 Тбилиси
ул. Кутузова, 19
Издательство «Мецниереба»

B-71 СССР
117864 Москва
ул. Профсоюзная, 90
Издательство «Наука»

B-72 СССР
103633 Москва
Третьяковский проезд, 1/19
Издательство «Недра»

B-73 СССР
251000 Алма-Ата
ул. Шевченко, 28
Издательство «Наука»

Таблица 1.3.

Труды международных гидрологических конференций и симпозиумов

IAHS. 1965. Design of hudrological networks. — Proceedings of the Quebec Symposium. June, 1965. Vols. 1, 2. IAHS publication, N 67, 68.

IAHS. 1965. Representative and experimental areas. — Proceedings of the Budapest Symposium. September — October, 1965. Vols. 1, 2. IAHS publication, N 66.

IAHS. 1966. Hydrology of lakes and reservoirs. — Proceedings of the Garda, Verona Sumposium. October, 1966. Vols. 1, 2. LAHS publication, N 70, 71.

IAHS/Unesco. 1968. Water in the unsaturated zone. — Proceedings of the Wageningen Symposium. August, 1966. Vols. 1, 2. LAHS publications, N 82, 83. Unesco, Studies and Reports in Hydrology, N 2, Paris.

IAHS/Unesco. 1967. Hudrology of fractured rocks. — Proceedings of the Dubrovnik Symposium. October, 1967. Vols. 1, 2. IAHS publications, N 73, 74.

WMO/Unesco. 1969. Hydrological forecasting. — Proceedings of the Queensland Symposium. November — December, 1967. WMO, N 228. TP. 122.

IAHS/Unesco/WMO. 1969. Floods and their computation. — Proceedings of the Leningrad Symposium. August, 1967. Vols. 1, 2. IAHS publications, N 84, 85. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 3, Paris.

IAHS/Unesco. 1972/3. Results of research on representative and experimental basins. — Proceedings of the Wellington Symposium. December, 1970. Vols. 1, 2. IAHS publications, N 96, 97.
Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 12, Paris.

IAHS/Unesco/WMO. 1972. Sumposium on world water balance. — Proceedings of the Reading Symposium. July, 1970. Vols. 1—3. IAHS publications, N 92—94. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 11, Paris.

LANS/Unesco/WMO. 1973. Hydrometry. — Proceedings of the Koblenz Symposium. September, 1970 Vols. 1, 2. IAHS publication, N 99. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 13, Paris.

Man-Made lakes, their problems and environmental effects. Knoxville, 1971. (Abstracts of papers). — 233 p.

IAHS/Unesco/WMO. 1974. Mathematical modeling in hydrology. — Proceedings of the Warsaw Symposium. July, 1971. Vols. 1—3. IAHS publications, N 100—102. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 15, Paris.

IAHS. 1975. Groundwater pollution. — Proceedings of the Moscow Symposium. August, 1971. IAHS publication, N 103.

IAHS. 1975. Snow and ice. — Proceedings of the Moscow Symposium. August, 1971. IAHS publication, N 104.

Unesco/IAHS. 1975. Hydrology of marsh-ridden areas. — Proceedings of the Minsk Sumposium. June, 1972. IAHS publication, N 105. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 19, Paris.

Unesco/WMO/IAHS. 1973. The role of snow and ice in hydrology. — Proceedings of the Banff Symposium. September, 1972. Vols. 1, 2. IAHS publication, N 107.

Unesco/WMO/IAHS. 1974. Design of water resources projects with inadequate data. — Proceedings of the Madrid Symposium. June, 1973. Vols. 1, 2. IAHS publication, N 108. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 16, Paris.

IAHS. 1973. Hydrology of lakes. — Proceedings of the Helsinki Symposium. July, 1973. IAHS publication, N 109.

IAHS. 1975. Application of mathematical models in hydrology and water resources systems. — Proceedings of the Bratislava Symposium. September, 1975. IAHS publication, N 115.

IAHS. 1975. The hudrological characteristics of the river basins. — Proceedings of the Tokyo Symposium. December, 1975. IAHS publication, N 117.

Unesco. 1978. Water balance of Europe. — Key Reports of the Workshop on the Water Balance of Europe. Varna, September — October, 1976. Technical Documents in Hydrology. Unesco, Paris.

IAHS. 1976. Artificial recharge of aquifers and management of aquifers. — Proceedings of the Haifa Sumposium. March, 1976. — IAHS publication, N 72.

IAHS. 1977. Erosion and solid matter transport in inland Waters. — Proceedings of the Paris Symposium. July, 1977. IAHS publication, N 122.

IAHS/Unesco. 1977. Effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on water quality. — Proceedings of the Amsterdam Symposium. October, 1977. IAHS publication, N 123. Unesco Studies and Reports in Hydrology, N 24. Paris.

IAHS. 1978. Modeling the water quality of the hydrological cycle. — Proceedings of the Baden Symposium. September, 1978. IAHS publication, N 125.

1980. Logistics and benefits of using mathematical models of hydrologic and water-resource sustems. — Proceedings of Pisa International Symposium. October, 1978. Pergamon Press.

ЮНЕСКО. 1981. Специфические аспекты гидрологических расчетов для водохозяйственного проектирования. Материалы Международного симпозиума, Ленинград, 3—7 сентября 1979 г. Гидрометеоиздат.

IAHS. 1980. Hydrology of areas of low precipitation. — Proceedings of the Canberra Symposium. December, 1979. IAHS publication, N 128.

IAHS. 1980. Hydrological forecasting. — Proceedings of the Oxford Symposium on the Application of Recent Developments in Hydrological Forecasting to the Operation of Water Resources System. April, 1980. IAHS piblication, N 129.

IAHS. 1980. Influence of man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins. — Proceedings of the Helsinki Symposium. June, 1980. IAHS publication, N 130.

Список литературы [1]

Andrejanov V. G. 1975. Meteorological and hydrological data required in planning the development of water resources. — Operational Hydrology Report, N 5. WMO, N 419. Geneva. A-10.

СЭВ. 1977. Унифицированные методы исследования качества вод. Методы химического анализа вод. Ч. 1. — М.: Изд. СЭВ. — Т. 1. — 288 с. Т. 2 — 291 с.; Т. 3—150 с. В-66.

Dubreuil P. 1974. Initiation à l'analyse hydrologique. — Paris. Masson et Cie. B-26.

Environment Canada. 1975 Comprehensive river basin planning. — Ottawa, Deparment of Supply and Services. B-63.

FAO. 1969. Influence of man on the hydrological cycle. Guide to policies for the safe development of land and water resources. — Rome. A-2.

Гидрометеоиздат. 1960, 1969, 1973, 1975, 1978. Наставления гидрометстанциям и постам. Т. 1; Т. 2. Ч. 1, 2; Т. 6. Ч. 1; Т. 7. Ч. 1. — Л.: Гидрометеоиздат. В-68.

Гидрометеоиздат, 1973. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 111 с. В-68.

Heras R. 1972. Manual de hidrologia. — Madrid, Escuela de Hidrologia, Instituto de Hidrologia. B-19.

International Atomic Energy Agency. 1968. Guide on nuclear techniques in hydrology. — Technical Report Series, N 91. Vienna, 214 p. A-5 или A-7 (США).

James D. L., Lee R. R. 1971. Economics of water resources planning. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. 1952. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеоиздат. В-68.

Крицкий С. Н., Коренистов Д. В. 1977. О теоретических основах использования речного стока в СССР. — Водные ресурсы, № 6. В-71.

---

[1] Здесь и в других списках литературы в конце описания каждого издания приводится индекс (например, А-10, В-66, В-26) по табл. 1.2.

Кудрицкий Д. М. (ред.). 1977. Вопросы методики дистанционного изучения водных ресурсов. — Л.: Гидрометеоиздат. — 169 с. — (Труды ГГИ. Т. 232). В-68.
Куприянов В. В., Прокачева В. Г. 1976. Спутниковая информация и изучение вод суши. — Л.: Гидрометеоиздат. — 171. с. — (Труды ГГИ. Т. 238). В-68.
Maass a. o. 1961. Design of water resources systems. — Massachusetts, Harvard University Press. В-18[1].
National Environment Research Council. 1975. Flood studies report. — London. В-29.
Reeves R. G. a. o. 1975. Manual of remote sensing. — Virginia, American Society Photogrammetry. В-4.
Шикломанов И. А. (ред.). 1975. Исследование влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим рек. Л.: Гидрометеоиздат. — 248 с. — (Труды ГГИ. Т. 229). В-68.
Snyder F., Sokolov A., Scesztay K. (eds.). 1971. Flood studies: an international guide for collection and processing of data. — Paris, Unesco. Technical papers in Hydrology, 8. A-7[1].
Sokolov A. A., Chapman T. G. 1974. Methods for water balance computations. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 17). A-7[1].
Sokolov A. A., Ranz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. — 269 p. (Studies and Reports in hydrology, 22). A-7.
Toebes C., Ouryvaev V. (eds.). 1970. Representative and experimental basins. — Paris, Unesco (Studies and Reports in hydrology, 4). A-7.
UNEP/WHO/Unesco/WMO. 1978. GEMS/Water Operational Guide. — Geneva, (WHO ETS, 78.). A-9[2].
Unesco. 1965 and later. Discharge of selected rivers of the world. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 5). A-7[3].
Unesco. 1974. Hydrological effects of urbanization. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 18). A-7.
Unesco/WMO. 1977. Hydrological maps. A contribution to the international hudrological decade. — Paris. Unesco (Studies and reports in hudrology, 20). A-7[1].
Unesco. 1978a. Atlas of the world water balance, Annex to monograph. World water balance and water resources of the earth. — Paris. 12 p.+65 maps. A-7[4].
Unesco. 1978b. Monograph. World water balance and water resources of the earth. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 25). A-7[4].
Unesco/WHO. 1978. Water quality surveys. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, a3).
Unesco. 1980. Casebook of methods of computation of quantitative changes in the hydrological due regime to human activities. — Paris. A-7.
Unesco. 1981. Methods of computation of water Balance of large lakes and reservoirs. Vol. 1. Methodology. — Paris, Unesco (Studies and reports in hudrology, 31).
U. S. Geological survey, 1978. National handbook of recommended methods for water data asquisition. — Virginia, Department of the Interior. B-56[5].
Viessman W., Jr, Knap J. W., Lewis G. L., Harbough T. E. 1977. Introduction to hydrology. 2nd ed. — New York, Harper & Row. B-17.
Wiesnet D. R. a. o. 1979. Application of remote sensing to hudrology. — Operational Hydrology Report, N 12 (WMO, N 513). Geneva. A-10.
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3rd ed. — WMO, N 168. Geneva. A-10[6].

---

[1] Распродана, обращайтесь в библиотеки.
[2] В ограниченном количестве.
[3] Тома 2 и 3.1 распроданы. Обращайтесь в библиотеки.
[4] Отдельно не продаются. Цена около 110 ам. долл.
[5] Заказы направляйте в Геологическую службу США (США, Вирджиния).
[6] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию.

2. Обзор методов гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании

2.1. Гидрологические и метеорологические данные и их обработка

2.1.1. Введение

Гидрологическая и метеорологическая информация, поступающая от гидрометеорологической сети, составляет основу гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании, и поэтому качество расчетов зависит от наличия гидрологических и метеорологических данных, их разрешения в пространстве и во времени, а также от их точности (Klemes, 1973; McMahon, 1979). Проектирование любого водохозяйственного мероприятия должно начинаться с анализа надежности данных имеющейся сети или с осуществления специальных гидрологических изысканий для сбора данных по проекту (WMO, 1976).

Гидрологические ежегодники могут быть самым первым источником информации. Однако для большинства проектов необходимо использовать данные информационной базы (машинные распечатки, перфокарты, магнитные ленты и т. п.). Уточнение и обработка гидрологических данных может выполняться более эффективно, если необходимая информация представлена в форме, удобной для обработки на ЭВМ (Roche, 1968). Иногда необходимые данные имеются уже в готовом для использования виде (скомпилированные и обработанные), однако и в этих случаях может потребоваться некоторая их доработка.

2.1.2. Метеорологические данные

Если в районе проектирования водохозяйственного сооружения имеется густая гидрометрическая сеть с длинными рядами наблюдений при высоком разрешении, то этой информации часто достаточно для большей части гидрологических расчетов.

Однако при решении ряда проблем необходимы метеорологические данные (WMO, 1976, 1974, 1975b); например, сведения об осадках используются для расчета экстремальных расходов воды на основании моделей дождевого стока, для восстановления пропусков в рядах данных по стоку и т. д. Очень часто большую ценность представляют собой данные по испарению и другая метеорологическая информация (данные о солнечной радиации, влажности воздуха, скорости ветра), которая используется для расчета испарения, например, при определении полезного объема воды в водохранилище или потерь при орошении (Раткович, 1976; Сыроежин, 1974).

Измерения толщины снежного покрова и наблюдения за процессом снеготаяния могут оказаться полезными в прогнозировании стока весеннего половодья. Данные наблюдений за количеством осадков, температурой воздуха, солнечной радиацией, скоростью ветра и другими метеорологическими элементами необходимы также при оценке запаса воды в снеге или при моделировании процесса снеготаяния и ледового режима на реках и озерах. При расчетах стока в результате снеготаяния необходимы данные о толщине снежного покрова и его распределении по поверхности водосбора, а также о влагосодержании снега. Во многих странах лед на реках, озерах и водохранилищах может затруднять навигацию и эксплуатацию гидротехнических сооружений. Поэтому наблюдения за ледовыми явлениями и измерения толщины льда помогают в предсказании будущих ледовых условий.

2.1.3. Гидрологические данные

В водохозяйственных расчетах используется целый ряд данных гидрологических наблюдений, в первую очередь за уровнем воды, расходами воды и наносов, которые более подробно будут рассматриваться ниже. Большую роль в этих расчетах играют сведения о скорости ветра, температуре воды, ее химическом составе, а также сведения о физико-географических условиях водосборов.

Прежде чем приступить к проведению водохозяйственных расчетов, рекомендуется в большинстве случаев создать банк метеорологических и гидрологических данных, который должен быть постоянным файлом, иногда входящим в систему управления базой данных, и содержать как данные непосредственных наблюдений и измерений, так и данные, прошедшие качественный контроль и первичную обработку.

2.1.3.1. Данные об уровнях воды. Измерения уровня воды на реках производятся гидрологическими постами, типы которых, а также различные проблемы, связанные с измерением уровня, описаны в многочисленных пособиях (WMO, 1974, 1977; U. S. Geological Survey, 1987) и здесь не рассматриваются.

2.1.3.2. Данные о расходах воды. Переход от данных наблюдений за уровнем воды в реках к значениям расходов воды осуществляется с помощью нелинейной зависимости между уровнем и расходом (кривые расхода), которая определяется по измеренным расходам (например, с помощью приборов для измерения скорости течения). Поскольку на постах производится обычно несколько измерений расхода воды за год и только во время паводка эти измерения учащаются, кривые расхода очень часто не дают надежных результатов, особенно если они экстраполированы в верхней части. Возможные изменения гидравлических условий вблизи поста, например в результате отложения наносов, эрозии, зарастания, заторов льда, также могут стать источником погреш-

ностей. Еще одна трудность заключается в том, что кривые расхода для установившихся потоков, например при паводке, иногда образуют петлю. Подробную информацию по всем этим вопросам можно найти в ряде работ (Chow, 1964; Roche, 1963).

2.1.3.3. Данные о стоке наносов. Сбор сведений о расходах наносов (взвешенных и влекомых) представляет известные трудности. Кроме того, точность их недостаточна. Со временем, по-видимому, станут возможными постоянные измерения расходов донных наносов; измерения же расходов взвешенных наносов — процесс дорогостоящий, и их необходимость должна быть хорошо обоснована. Описание измерения расходов наносов приводится в ряде работ (WMO, 1974; Chow, 1974; Davis, 1969). Расчет отложения наносов в водохранилищах рассматривается в п. 4.8.5.

Для анализа средних годовых данных по взвешенным наносам можно использовать графики связи между средними годовыми расходами воды и количеством взвешенных наносов (Chow, 1964; Davis, 1969).

2.1.4. Временна́я дискретность данных

Для достижения наибольшей точности гидрологических расчетов желательно иметь непрерывные записи (ленты самописцев) и выполнять необходимые вычисления на основании многолетних рядов таких наблюдений. Однако во многих случаях в этом нет необходимости по следующим причинам:

1) данные наблюдений соответствуют определенным моментам или промежуткам времени, например суткам, неделе, месяцу;

2) вычисления с использованием данных за малые интервалы времени, например за 1 ч, оказываются иногда дорогостоящими даже с применением быстродействующих ЭВМ;

3) часто достаточно использовать данные с большими временны́ми интервалами между наблюдениями. Например, для расчета полезного объема водохранилища, проектируемого для водоснабжения, достаточно использовать средние месячные значения.

От правильного выбора интервалов измерений и расчетов зависит точность расчетных гидрологических характеристик, поэтому к выбору этих интервалов нужно подходить с особым вниманием и индивидуально в каждом конкретном случае.

2.1.5. Статистические особенности данных

Гидрологические и метеорологические данные можно рассматривать как статистические выборки из генеральных совокупностей, описывающих естественные гидрологические и метеорологические процессы (Dyck, 1976; Сванидзе, 1977; Рождественский, 1974; Brunet-Moret, 1969; Yevjevich, 1972a, 1972b; Shen, 1976).

Основными характеристиками, которые используются (среди прочих) при водохозяйственном проектировании, являются:

— средний многолетний годовой сток;

— распределение стока в течение года (по сезонам, отдельным периодам, в течение месяца, суток);

— максимальные расходы воды:

а) сформированные весенним снеготаянием (максимумы весеннего половодья);

б) сформированные ливневыми осадками (максимумы дождевых паводков);

в) сформированные в результате обоих факторов (весеннее снеготаяние и ливневые осадки);

г) различной обеспеченности;

— объем стока весеннего половодья и дождевых паводков;

— минимальные расходы:

а) минимальный средний суточный расход за отдельные сезоны, например за осенне-летний и зимний периоды;

б) минимальный средний месячный расход за отдельные сезоны;

в) длительность периодов пересыхания и перемерзания рек;

— средний годовой расход взвешенных или донных наносов;

— распределение расходов взвешенных или донных наносов в течение года;

— продолжительность периодов с ледовыми явлениями, например периода с ледяным покровом, ледохода.

Эти характеристики устанавливают по многолетним рядам наблюдений. Для применения стандартных статистических методов данные необходимо проверить на стационарность и однородность с помощью методов, описанных в п. 4.1. Для стационарных данных применяются стандартные методы теории вероятности и анализа временных рядов (стохастических процессов). Статистическая неоднородность и нестационарность многолетних рядов могут быть вызваны:

а) включением в один ряд генетически неоднородных гидрологических характеристик, например максимального расхода дождевого паводка в ряд максимальных расходов весеннего половодья;

б) влиянием хозяйственной деятельности (IAHS, 1977; Rodier, 1974; Шикломанов, 1975) на условия формирования стока, например урбанизации водосбора.

Методы выявления нестационарности и неоднородности, а также способы решения различных проблем, связанных с особенностями гидрологических данных, приводятся в главе 4. Дополнительной проблемой является возможная неточность данных наблюдений в результате следующих причин: изменения местоположения гидрологического поста или отметки нуля поста, неисправностей измерительных приборов или неточности измерений, изменения распределения скорости вследствие зарастания русла или ледовых явлений. Кроме того, погрешности могут возникать из-за малой продолжительности периода наблюдений (случайная выборочная погрешность), так как период наблюдений может быть нерепрезентативным для совокупности, описывающей естественный процесс.

Обычно считают, что при недостаточности данных наблюдений (низкое качество или недостаточный объем наблюдений) можно применять простые методы расчета. Однако в большинстве случаев ситуация как раз обратная — если данные не соответствуют предъявляемым к ним требованиям, то для получения с их помощью наиболее достоверной информации требуются усложненные методы.

В отчете ВМО № 491 (WMO, 1975b) приводится сводка гидрометеорологических данных, необходимых при планировании водохозяйственных мероприятий. Там же содержится перечень гидрометеорологических характеристик, используемых при водохозяйственном проектировании, который может оказаться весьма полезным и для целей планирования.

2.1.6. Моделирование данных

Методы моделирования могут быть полезными для получения гидрологических данных в следующих случаях:

1) при наличии пропусков в рядах наблюдений;

2) при коротком периоде наблюдений;

3) при отсутствии данных для обследуемого участка, например вблизи плотин, но при их наличии на соседних участках.

Эти методы могут применяться:

1) для восстановления пропусков в рядах при использовании информации:

а) соседних гидрологических постов, т. е. методом взаимной корреляции или регрессионного анализа (Chow, 1964; Dyck, 1976; Сванидзе, 1977; Fiering, 1971; Fleming, 1975);

б) осадкомерных постов;

2) для приведения коротких рядов к репрезентативному периоду по данным других гидрологических или осадкомерных постов с помощью методов взаимной корреляции или регрессионного анализа;

3) для моделирования других рядов, приблизительно эквивалентных рядам наблюдений в статистическом смысле. Такие моделируемые ряды представляют собой дополнительные последовательности вероятных будущих расходов, подобные полученным за период наблюдений.

2.1.7. Оценка надежности данных

При любом исследовании с использованием гидрологической информации главным является надежность данных, поэтому прежде чем их использовать, необходимо проверить их качество. Способы предупреждения, обнаружения и корректировки погрешностей составляют систему контроля качества данных (WMO, 1974). Погрешности данных можно разбить на два больших класса: случайные и систематические.

Случайные погрешности появляются в результате ошибок на-

блюдателя, неправильной интерпретации его записей, неверного воспроизведения и обработки данных. Погрешности могут быть следствием физических явлений. Примером этого служит влияние атмосферного давления на уровень воды в колодце самописца уровня или изменение уровня озера под влиянием сейшей. Случайные погрешности обычно имеют нормальное распределение, поэтому случайная погрешность уменьшается при использовании большого числа наблюдений для определения среднего значения.

Некоторые случайные погрешности можно выявить путем тщательной проверки данных. При появлении аномальных значений в ряду наблюдений необходимо проверить, не являются ли они следствием грубого просчета. В некоторых случаях аномалии могут возникать в результате малого объема выборки, поэтому необходимо проводить сравнение с данными других постов в этом районе. Существуют различные мнения о том, как обрабатывать эти так называемые выбросы.

Систематические погрешности могут появляться в результате неисправности прибора, некомпетентности наблюдателя, неудачного расположения поста и неверно выбранного метода анализа. Такие погрешности обнаружить нелегко. При анализе данных необходимы сведения о местоположении поста, изменениях в системе использования земель на водосборе, заборах воды выше по течению реки и т. п. В зависимости от назначения данных наблюдений, наличия рабочей силы и средств каждую замеченную систематическую погрешность необходимо исправить для получения надежных данных.

Опубликованных работ по оценке надежности данных немного. Методы обнаружения и исправления погрешностей кратко рассматриваются лишь в нескольких работах (Herschy, 1978). К сожалению, нет публикаций, специально посвященных системе контроля в целом, которые бы содержали описание различных методов и их сравнение. Такую информацию можно найти в разных работах по гидрологии. Поэтому национальные учреждения по обработке гидрологической информации должны давать консультации по вопросу контроля качества данных.

2.2. Краткие сведения о методах гидрологических расчетов и их связи с различными типами водохозяйственных объектов

2.2.1. Общие положения

Ниже приводятся краткие сведения об основных методах гидрологических расчетов, которые более подробно описываются в главе 4. В табл. 2.1 они соотнесены с различными типами водохозяйственных объектов, рассматриваемых в главе 3. Типы объектов из главы 3 приводятся в табл. 2.1 в графе «Тип объекта», а ме-

тоды гидрологических расчетов, которые рассматриваются в главе 4, — в первой графе табл. 2.1. Знаком x указывается тип объекта, для проектирования которого обычно используется данный метод. Чтобы избежать дублирования, в главе 3 методы гидрологических расчетов для всех типов водохранилищ рассматриваются в п. 3.2.1, а дополнительные процедуры, необходимые при расчете только определенных типов объектов, приводятся в п. 3.2.2—3.2.5 (см. табл. 2.1). Например, при проектировании водохранилищ для регулирования паводков используются все расчетные методы из п. 3.2.1 и 3.2.2. Более подробно эти соотношения описаны в п. 3.1.

2.2.2. Региональный анализ для восстановления недостающих данных

Региональный анализ, обсуждаемый в п. 4.1 необходим, если многолетние ряды наблюдений за речным стоком отсутствуют или слишком коротки для решения поставленных в данном речном бассейне задач (Klemes, 1973). В основе этого метода лежит сравнение характеристик водосбора, для которого ряды значений стока отсутствуют или их недостаточно, с характеристиками соседних водосборов, для которых эти ряды имеются. Основными характеристиками, по которым проводится сравнение, являются площадь водосбора, его рельеф, почвы и грунты, осадки и другие метеорологические факторы (при их наличии). Можно сравнивать и другие характеристики, представленные по квадратам сетки (Solomon, 1968; Foyster, 1975). Установив однородность водосборов, можно оценить межрядную корреляцию данных наблюдений. Если коэффициент корреляции окажется достаточно высоким, можно удлинить короткий ряд, чаще всего с помощью моделей линейной регрессии (Benson, 1967). Однако если этим методом восстанавливали большое количество значений в ряду, то дисперсия полученного ряда будет слишком занижена. Поэтому необходимо применить метод, учитывающий случайные компоненты (см. п. 4.1.5). Возможная связь между гидрометеорологическими характеристиками различных водосборов может быть установлена также графическими методами. В случае отсутствия данных по стоку в исследуемом районе, он оценивается по данным наблюдений для хорошо изученного водосбора на основе отношения площадей водосборов и (или) отношения количества осадков. Эти методы более подробно изложены в п. 4.1.

Региональный анализ применяется при рассмотрении проблем, связанных с использованием многолетних рядов наблюдений, например для определения размеров водохранилищ и в расчетах сооружений безводохранилищного типа для регулирования паводков, орошения и водоснабжения, при определении площадей возможного затопления и общем планировании речных бассейнов.

2.2.3. Определение естественного стока

Бóльшая часть многолетних данных наблюдений за речным стоком не учитывает заборов воды, осуществляемых для различных целей выше створа измерения. Сток, измеряемый на гидрологических постах, необходимо откорректировать, чтобы получить значения естественного стока (Shen, 1976), например, для статистического анализа (Chow, 1964), составления водного баланса, установления приоритетного права водопользования (юридический аспект), определения экономического эффекта водохозяйственного мероприятия с учетом и без учета планируемых или существующих сооружений (см. п. 4.2). Метод корректировки может показаться очень простым. Он состоит в исключении воздействия искусственных сооружений, например плотин. Однако во многих случаях сведения о таких воздействиях отсутствуют или требуют оценки. Проблема усложняется необходимостью учета возвратных вод от водозаборов, осуществляемых выше гидрологического поста, для которых возможны только приближенные оценки. Расчет трансформации речного стока также требует определения естественных расходов воды.

2.2.4. Анализ изменчивости речного стока

Так как речному стоку присущи многолетние колебания (см. п. 4.3), большую ценность представляет дополнительная информация, в частности, о периодах повышенной и пониженной водности или о направленных тенденциях ее изменения. Изменчивость стока может быть также следствием изменения системы землепользования на площади водосбора (Шикломанов, 1975; FAO, 1969).

Для получения данных об изменчивости годового стока необходимо выполнить анализ многолетних колебаний за достаточно длинный период наблюдений с помощью методов математической статистики.

Внутригодовое распределение стока зависит от сезонных изменений климата (см. п. 4.3). В большинстве случаев достаточно знать средние месячные значения расходов воды, которые зависят от изменения метеорологических элементов. Для некоторых целей требуется знание средних суточных расходов (см. п. 4.3.4). Поскольку многолетние колебания максимальных расходов воды относятся к случайным процессам, для обоснования проектных решений при создании водохранилища по регулированию паводков и некоторых других объектов необходимо использовать кривые обеспеченности (Chow, 1964; U. S. Water Resources Council, 1977). Эти расчетные методы обсуждаются в п. 4.4.

Анализ обеспеченности низкого стока также осуществляется на основе данных наблюдений за многолетний период. В некоторых случаях его результаты используются для определения полезного объема водохранилищ, в расчетах систем водохранилищ и комплексных систем использования водных ресурсов района. Вероят-

ностный анализ низкого стока необходим также для обоснования мероприятий по его увеличению.

Кривые обеспеченности объемов воды в водохранилище применяются для расчета вероятности аварийных ситуаций при разработке предупредительных мер в случае угрозы полной сработки водохранилища, оценке вероятной выработки электроэнергии или эффектов от создания зон отдыха на берегах водохранилища (Askew, 1974b, 1974a).

В последнем случае оценка производится на основании вероятности наполнения водохранилища выше расчетного уровня в течение определенных периодов времени. Для расчета кривых обеспеченности объема воды в водохранилище могут применяться современные методы теории массового обслуживания или моделирования.

Для разработки противопаводочных мероприятий необходимо знать несколько характеристик стока, в том числе расчетный максимальный расход паводка или половодья, а также интервалы его повторяемости, гидрограф, суммарный объем и продолжительность подъема паводка. Зная эти характеристики, можно рассчитать противопаводочный объем водохранилища, а также осуществить проектирование других мероприятий, в том числе и без строительства сооружений, для предотвращения затопления ценных земель с заданной вероятностью превышения расчетного максимального расхода. Сравнение затрат на проведение этих мероприятий и их экономической эффективности также производится на основе этих характеристик. Площадь затопления определяется методом расчета трансформации паводочного стока по водохранилищу или руслу.

2.2.5. Гидрологическое моделирование

В случае отсутствия или недостаточности данных наблюдений по максимальному стоку их можно оценить по связям с метеорологическими данными, используя метод единичного гидрографа или другие модели «осадки — сток». Некоторые методы расчета паводочного стока приведены в п. 4.5. Модели «осадки — сток» ((Cembrowicz, 1978; Girard, 1970; Gupta, 1977), см. также приложение к главе 4), весьма эффективны для удлинения рядов стока, которое требуется для некоторых из вышеупомянутых методов анализа. В моделях в качестве исходных данных используются данные измерения температуры воздуха и количества осадков, суммарного испарения и влагосодержания почвы, а также характеристики водосборов. Этот метод применяется в случаях, когда ряды гидрологических наблюдений короче метеорологических, что встречается очень часто. Важной областью применения этих моделей является краткосрочный прогноз и предсказание паводков. Система предупреждения о наводнениях на основе надежной модели прогнозирования паводков (WMO, 1975a) входит составной частью в мероприятия по борьбе с наводнениями без строительства

защитных сооружений. С помощью таких систем предупреждения, проведя своевременную эвакуацию с подверженных затоплению территорий или регулируя паводок водохранилищем, можно избежать значительного ущерба.

Методы моделирования используются для получения ряда расходов любой заданной длины, статистические параметры которого соответствуют параметрам исходного ряда наблюдений. Такие искусственно создаваемые ряды используются в основном для определений оптимальных объема и режима эксплуатации водохранилища. В моделируемых рядах стандартные статистические параметры (среднее, среднее квадратическое отклонение и коэффициент внутрирядной корреляции) должны быть близкими или совпадающими с оценками параметров фактического ряда наблюдений. Однако фактические ряды могут содержать неблагоприятное группирование лет повышенной и пониженной водности или нерепрезентативно освещать экстремальные явления. Если этот метод применяется для расчета различных систем, следует моделировать несколько рядов равной длины, которые затем используют для определения надежных статистических уравнений и связей (WMO, 1974; Fiering, 1971; Yevjevich, 1972a; Shen, 1976).

Моделирование широко используется для расчета полезного объема водохранилища (Schultz, 1976). При расчетах противопаводочных мероприятий осуществляется моделирование с временны́м шагом, намного меньшим месячного интервала, по которому обычно выполняются расчеты мероприятий для других целей.

Для каждого значительного наблюденного паводка производится моделирование работы проектируемого сооружения на основании изменений расходов за короткие интервалы. Независимо от назначения плотины всегда рассчитывается трансформация паводка в водохранилище для оценки надежности работы водосливов при сбросе паводочных вод (см. п. 4.5). При расчетах водохранилищ многоцелевого назначения, используемых, например, для водоснабжения, орошения и выработки гидроэлектроэнергии, тоже требуется анализ, выполняемый путем моделирования средних месячных расходов. При расчетах рабочего объема водохранилищ одноцелевого назначения достаточно точные результаты иногда дает анализ диаграммы Риппла (см. п. 4.8).

В последнее время разработаны более сложные математические методы, в частности для планирования комплексного использования целого речного бассейна. К ним относятся методы оптимизации и моделирования (Hall, 1970; Harboe, 1970). Эти методы могут также применяться для анализа и расчета режимов работы водохранилища (см. п. 4.8, 4.9). Все они прямо или косвенно предназначены для оптимизации параметров водохозяйственных систем и поэтому требуют разработки количественного критерия оценки стоимости и окупаемости каждого варианта проекта. Такие характеристики системы, как водный баланс, выработка электроэнергии, входные гидрологические данные, качество воды и некоторые требования к нему, должны рассматриваться как условия

работы системы и быть представлены в соответствующей форме. Набор характеристик условий работы водохозяйственной системы, по которому должна осуществляться оптимизация параметров, может меняться.

Математические модели применяют также при определении в реальном времени оптимального режима работы действующего водохранилища или системы водохранилищ. Такое применение обычно требует надежных систем прогнозирования паводочного стока (см. п. 4.9).

2.2.6. Другие методы гидрологических расчетов

При проектировании водохранилищ резервный объем для отложения наносов обычно рассчитывается отдельно (см. п. 4.8). Он должен быть достаточным для того, чтобы не успеть заполниться до окончания срока эксплуатации водохранилища. Сток наносов рассчитывают по прямым измерениям расходов донных и взвешенных наносов на участке проектируемого водохранилища. Могут применяться также косвенные методы расчета, основанные на расходах воды, уклоне реки, характеристиках почвенного покрова и других параметрах, но они дают менее точные результаты. Необходимо обращать особое внимание на сток наносов в период паводков (см. п. 4.10).

Для учета воздействия волн к расчетной высоте проектируемого сооружения необходимо добавить величину, называемую превышением гребня сооружения (см. п. 4.6). Эта величина определяется на основании практического опыта и возрастает пропорционально потенциальной угрозе разрушения. Она также зависит от изменчивости ветра.

При определении высоты дамб для защиты от наводнений рассчитывают профили водной поверхности на основании значений подпора или кривых расхода, определяемых на гидрологических постах. Для этого разработано несколько математических методов различной степени точности и целый ряд программ расчета. Эти методы рассматриваются в п. 4.7. Требования к объему воды для обеспечения интересов рыбного хозяйства и охраны природной среды в районе водохранилища учитываются отдельно и включаются в расчеты объема водохранилища и режимов его эксплуатации в виде параметров условий работы (см. п. 4.8). Для этих целей необходимо создать междисциплинарные группы специалистов, куда входили бы инженеры, биологи и экологи. Требования по обеспечению минимальных объемов для целей рекреации трудно выразить количественно в экономических показателях, что может препятствовать их оптимизации. Если установить удовлетворительные экономические соотношения невозможно, рекреационные требования надо ввести в расчеты объема водохранилища в определенные сезоны или в течение всего года. В конечном счете рекреационные критерии при проектировании объекта будут зависеть от требований и пожеланий общественности в этом районе.

Меры по повышению низких расходов воды предусматриваются для поддержания глубины, достаточной для навигации, чистоты вод путем разбавления промышленных стоков, сохранения условий существования представителей флоры и фауны, а также создания зон отдыха. Все эти факторы требуют специальных исследований (см. п. 4.4. 4.8).

2.2.7. Оценка последствий водохозяйственных мероприятий

Некоторые положительные и отрицательные последствия всех водохозяйственных мероприятий требуют особого внимания (см. п. 4.4, 4.10).

Изменение условий речного стока ниже проектируемых водохранилищ могут затрагивать правовые интересы других водопотребителей. При наличии законодательства, регулирующего использование водных ресурсов, оно должно обеспечивать соблюдение этих интересов при эксплуатации водохранилища в будущем или возмещение ущерба в результате его строительства.

Создание водохранилищ приводит к увеличению площади открытой водной поверхности. При этом, естественно, увеличиваются потери воды на испарение. В засушливых районах с высокой температурой и солнечной радиацией эти потери значительны. Потери на испарение можно определить на основании измерений или расчета испарения с водной поверхности и поверхности затопленной суши. Эти дополнительные потери необходимо учитывать в расчетах эффективной водоотдачи водохранилища (см. п. 4.8).

Эксплуатация водохранилища может вызвать как положительные, так и отрицательные изменения качества воды. Количество химических и биологических примесей уменьшается после длительного отстоя воды в водохранилище. В результате забора из глубинных слоев содержание растворенного кислорода в сбрасываемой воде должно быть ниже, чем в воде, поступающей в водохранилище. Этот отрицательный эффект можно устранить, если при проектировании водосбросных отверстий предусмотреть забор воды из верхних слоев водохранилища или аэрацию воды. В п. 4.10.4 приводится описание нескольких методов, в основном с применением ЭВМ, для анализа изменений качества воды.

Строительство водохранилищ способствует уменьшению стока наносов, поскольку бóльшая их часть накапливается в самом водохранилище (см. п. 4.10.5). Если до его строительства речные отложения, представляющие ценность для сельского хозяйства, транспортировалась паводками и оседали в пойме на сельскохозяйственных угодьях, то после завершения строительства этого эффекта не будет, что является отрицательным последствием и требует оценки компенсирующих мероприятий, например внесения удобрений. Размывы в нижнем бьефе водохранилища также представляют собой серьезную проблему.

Водохранилища оказывают влияние и на ледовые условия в нижнем бьефе, являясь причиной заторов и зажоров льда, кото-

Таблица 2.1

Методы гидрологических расчетов и типы водохозяйственных мероприятий

Метод гидрологических расчетов (см. главу 4)	Типы водохозяйственных мероприятий (см. главу 3)													
	водохранилища						без водохранилищ							
	всех типов (п. 3.2.1)	противопаводочные (п. 3.2.2)	энергетические (п. 3.2.3)	накопительные (п. 3.2.4)	многоцелевого назначения (п. 3.2.5)	в сочетании с другими мероприятиями (п. 3.2.6)	регулирование паводочного стока (п. 3.3.1)	контроль качества воды (п. 3.3.2)	орошение (п. 3.3.3)	осушение (п. 3.3.4)	водоснабжение (п. 3.3.5)	навигация (п. 3.3.6)	рекреация, рыбоводство, охрана природы (п. 3.3.7)	планирование мероприятий для всего речного бассейна (п. 3.4)
4.1. Метод регионального анализа	×						×		×					×
4.2. Определение естественного стока	×						×		×			×		×
4.3. Методы оценки изменчивости годового стока и внутригодового распределения			×	×					×		×			×
4.4. Кривые обеспеченности:														
максимальных расходов	×						×	×			×	×	×	×
меженного стока		×					×	×			×	×	×	×
объемов водохранилища	×													
4.5. Расчетные паводки для определения высоты сооружения:														
гидрограф стока	×					×	×		×					×
расчет трансформации паводочного стока	×													
4.6. Расчет превышения гребня с учетом ветрового и волнового воздействий	×						×					×		

4.7. Определение профилей водной поверхности	×								×			×					
4.8. Расчет объемов водохранилища для:																	
регулирования паводков;		×															
гидроэнергетики			×														
накопления воды для разных целей				×													
резервный объем для отложения наносов и мертвый объем	×																
4.9. Построение диспетчерских графиков:																	
одиночного водохранилища	×	×			×	×											
системы водохранилищ	×	×			×	×											
4.10. Оценка влияния проектируемых мероприятий на:																	
сток	×						×	×	×		×	×	×	×			
испарение	×						×	×	×		×	×	×	×			
окружающую среду	×						×	×	×		×	×	×	×			
движение наносов	×						×	×	×		×	×	×	×			
грунтовые воды	×						×	×	×		×	×	×	×			
температуру воды	×											×		×			
ледовый режим	×						×	×	×			×		×			
4.А. Программы расчета на ЭВМ	×					×	×										

рые в свою очередь могут вызывать наводнения. Водохранилища также оказывают влияние на ледяной покров. При сбросе вод из водохранилища в озера или моря, тепловые и химические свойства этих вод могут значительно изменяться. Все эти воздействия необходимо учитывать при планировании и в период эксплуатации водохранилищ (см. п. 4.10.8).

Изменения климата, вызванные строительством водохранилищ, имеют особое значение в условиях суровых зим. Увеличение зимнего стока в нижнем бьефе может, например, вызывать изморозь. Такие последствия требуют особого внимания (см. п. 4.10.8).

Мероприятия без сооружения водохранилищ, например строительство дамб или регулирование речного русла, могут приводить к увеличению скорости течения во время паводков. В период повышенных меженных расходов полезными могут оказаться дренажные системы.

Высокие паводки часто являются следствием интенсивного использования земель на водосборе, в частности урбанизации. В результате изменения условий стекания воды на водосборах большая часть выпадающих осадков трансформируется непосредственно в поверхностный сток, тогда как в естественных условиях значительная часть осадков расходовалась на транспирацию и инфильтрацию.

В результате эрозии большие количества наносов выносятся в реки, вызывая повышение отметок дна и уменьшая пропускную способность русла.

Интенсификация поверхностного стекания и одновременное снижение пропускной способности русла приводят к ухудшению условий прохождения паводков. Регулирование отдельных участков речного русла как метод борьбы с паводками обеспечивает только частичное решение проблемы, которая может потребовать регулирования во всем бассейне, а также более основательного планирования использования земель на водосборе.

Список литературы

Askew A. J. 1974a. Change-constrained dynamics programming and the optimization of water resources systems. — Water Resources Research, 10 (6). Washington D. C., American Geophysical Union. B-2[1].

Askew A. J. 1974b. Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability constraint. — Water Resources Research, 10 (1). Washington D. C., American Geophysical Union. B-2[1].

Benson M. A., Matelas N. C. 1967. Synthetic hydrology based on regional statistical parameters. — Water Resources Research, 3 (4). Washington D. C., American Geophysical Union. B-2[1].

Brunet-Moret Y. 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisees and hydrologie. — Paris, Cahiers de l'ORSTOM (Series hudrologie, vol. 6, n 3). B-37[2].

Cembowicz R. C., Hahn H. H., Plate E. J., Schultz G. A. 1978. Aspects of pre-

[1] Оттисков нет. Имеются экземпляры журнала по цене от 10 до 15 ам. долл.

[2] Только ксерокопии.

sent hydrological and water quality modeling. — J. Ecological Modeling, 5. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. B-11.
Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Davis Calvin Victor, Sorensen Kenneth E. 1969. Handbook of Applied Hydraulics. 3d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Dyck S. 1976. Angewandte Hydrologie. T. 1.-Berlin, VEB Verlag für Bauwesen. B-60.
FAO. 1969. Influence of man on the hydrologic cycle. Guide to policies for the safe development of land and water resources. — Rome. A-2 [1].
Fiering M. B., Jackson B. 1971. Synthetic ateramflow. — Water resources monograph, N 1, Washington D. C., American Geophysical Union. B-2.
Fleming G. 1975. Computer simulation techniques in hydrology. — New York, American Elsevier Publishing Company. B-11.
Foyster A. M. 1975. Mapping runoff by the grid square technique. — Nordic Hydrology, 6 (4). Denmark, Nordic Hydrology. B-34.
Girard G. 1970. Essai pour un modele hydropluviometrique conceptuel et son utilisation au Quebec. — Cahiers de l'ORSTOM. Serie hydrologie, vol. 7, n 2. B-37.
Gupta S. K., Solomon S. I. 1977. Distributed numerical model for estimating runoff and sediment discharge of ungaged rivers. — Water Resources Research, 13 (3), Washington D. C., American Geophysical Union. B-2 [2].
Hall W. A., Dracup J. A. 1970. Water resources systems engineering. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Harboe Mobasheri, Yeh. 1970. Optimal policy for reservoir operation. — J. Hyd. Div., 1 (11). New York, American Society Civil Engrs. B-3 [3].
Herschy R. W. (ed.). 1978. Hydrometry: principles and practices. — Chisester, Wiley. International Stand. Book N 0471996491, 511 p. B-23.
IAHS/Unesco. 1977. Effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on water quality. — IAHS publication, n 123. Amsterdam. Unesco, Paris. (Studies and reports in hydrology. 24). A-4 [4].
Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10 [5].
McMahon T. A. 1979. A review of data estimation procedures and associated errors. — J. Hydrology, 41 (1, 2). Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. B-11.
Раткович Д. Я. 1976. Многолетние колебания речного стока. — П.: Гидрометеоиздат. — 255 с. B-68.
Roche M. 1963. Hydrologie de surface. — Paris, Guatheir-Vallars. B-16.
Roche M. 1968. Traitement automatique des donees hydrometriques et des donnes pluviometriques au service hydrologique de l'ORSTOM. — Paris, Gauthier-Villars. (Serie hydrologie, vol. 5, n 3). B-37.
Rodier J. A. 1974. Influence des grands amenagements hudrauliques sur le cycle hydrometeorologique et l'environnennement. — XIIIes Journees de l'hydraulique, Question 5, Rapport General. Paris, Societe Hydrotecnique de France. B-46 [6].
Рождественский А. В., Чеботарев А. И. 1974. Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 423 с. B-68.
Schultz G. A. 1976. Elimination of deficiencies of the ripple-diagram method for reservoir sizing by use of synthetically generated runoff data. — Proceedings of the XII Congress of the International Commission on Large Dams, vol. 3, p. 1. A-6 [7].

---

[1] Возможно, распродана.
[2] Оттисков нет. Имеются журналы по цене примерно 15 ам. долл.
[3] Можно заказать только фотокопии по цене 7,60 ам. долл.
[4] Имеется только во Франции.
[5] В настоящее время распродано. Возможно переиздание. Есть в библиотеках.
[6] Цена 30 фр.
[7] Оттисков и журналов нет. Возможно, есть в библиотеках.

Shen H. W. (ed.). 1976. Stochastic approaches to water resources. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.
Шикломанов И. А. (ред.). 1975. Исследования влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим рек. — Л.: Гидрометеоиздат. — 242 с. — Труды ГГИ. Т. 229. В-68.
Solomon S. I., Denpuvilliez J. P., Chart E. J., Wobley J. A., Gadou C. 1968. The use of a square grid system for computer estimation of precidation, temperature and runoff. — Water Resources Research, 4 (5). Washington D. C., American Geophysical Union. B-2 [1].
Сванидзе Г. Г. 1977. Математическое моделирование гидрологических рядов. — Л.: Гидрометеоиздат. — 296 с. В-68.
Сыроежин М. И. 1974. Обоснование водохозяйственных комплексов. — Л.: Энергия. — 271. с. В-67.
U. S. Geological Survey. 1978. National handbook of recommended methods for water data acquisation. — Virginia, Department of the Interior. B-56 [1].
U. S. Water Resources Council. 1977. Guidelines for determining flood flow frequency. — Washington D. C., U. S. Govt. Printing Office (WRC Bull. 17A). B-57.
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d ed. — WMO, N 168. Geneva. A-10 [2].
WMO. 1975a. Intercompatison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. — Operational Hydrology Report, N 7. WMO, N 433. Geneva. A-10.
WMO. 1975b. Meteorological and hydrological data required in planning the development of water resources. — Operational Hydrology Report, N 5. WMO, N 419. Geneva. A-10.
WMO. 1976. Hydrological network design and information transfer. — Operation hydrology report, N 8. WMO, N 433. Geneva. A-10.
Yevjevich V. 1972a. Probability and statistics in hudrology. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.
Yevjevich V. 1972b. Stochastic processes in hydrology. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.

[1] Заказы направляйте в Геологическую службу США (США, Вирджиния).
[2] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

3. Расчетные гидрологические характеристики, необходимые при проектировании различных водохозяйственных объектов

3.1. Введение

В главе дается общая информация о различных типах водохозяйственных мероприятий (см. п. 3.1) и приводится подробный перечень расчетных гидрологических характеристик (по отдельным этапам проектирования), которые используются при проектировании и оценке экономической эффективности различных объектов (см. п. 3.2—3.4). Расчетные гидрологические характеристики делятся на три группы: характеристики, используемые для проектирования водохранилищ (п. 3.2), для мероприятий, не связанных с созданием водохранилищ (п. 3.3), и для планирования комплексного использования водных речных бассейнов (п. 3.4). В свою очередь в расчетных гидрологических характеристиках, используемых при проектировании водохранилищ, можно выделить основную группу характеристик, применяемых для всех типов водохранилищ (п. 3.2.1), и дополнительные характеристики, которые используются наряду с основными при проектировании отдельных типов водохозяйственных мероприятий (например, для регулирования паводочного стока, см. п. 3.2.2.).

Для большей части расчетных гидрологических характеристик, перечисленных в главе 3, в главе 4 указываются дополнительные методы и программы расчета со ссылками на соответствующие опубликованные работы. В табл. 2.1 приводятся перекрестные ссылки на расчетные характеристики и литературные источники из главы 4 и типы проектов из главы 3.

Целью главы 3 является последовательное перечисление всех расчетных гидрологических характеристик, используемых при проектировании водохозяйственных мероприятий, с указанием соответствующего пункта главы 4, в котором описаны возможные методы их определения. Как указывалось выше, в главе 4 не дается подробного изложения самих расчетных процедур, а только приводится информация о литературных источниках, где можно найти подробное описание этих методов.

Планирование водохозяйственных мероприятий неизменно связано с применением не только гидрологических, но и других типов расчетов, как, например, для оценки экономического и социального обоснования проектируемого мероприятия. В главе 3 эти расчеты упоминаются только в связи с гидрологическими характеристиками или при необходимости не нарушать логическую

цепь этапов планирования и проектирования водохозяйственных мероприятий. Расчеты других видов, перечисленные в главе 3, в главе 4 не рассматриваются, и поэтому литературные источники, содержащие их подробное описание, приводятся в главе 3.

Поскольку при разработке схем многоцелевого использования водных ресурсов возможны различные сочетания водохранилищ и других водохозяйственных мероприятий, все описанные этапы исследований и расчетов могут значительно видоизменяться. Так, некоторые из них могут не потребоваться, поэтому каждый отдельный расчетный метод следует рассматривать как конструктивный блок для построения схемы расчетов, наилучшим образом соответствующей рассматриваемому объекту.

3.1.1. Цели и назначение водохозяйственных мероприятий

Одной из наиболее заметных тенденций в проектировании водохозяйственных мероприятий является расширение области их назначения и использования. Не так давно водохозяйственные мероприятия проводились для решения отдельных проблем, возникающих в связи с какой-либо определенной задачей, например, для орошения земель или гидроэнергетики. По мере увеличения размеров объектов и их числа стало очевидным, что при решении частных водохозяйственных задач возникают конфликтные ситуации, оказывающие далеко не лучшее воздействие на экономику и вызывающие зачастую нежелательные последствия.

В проблеме управления водными ресурсами выделяются два аспекта: количественный и качественный. Оценки запасов воды для коммунального и промышленного водоснабжения, орошения, гидроэнергетики, улучшения условий навигации, расчеты по регулированию паводочного стока и осушению земель являются примерами количественного аспекта управления водными ресурсами. Предотвращение загрязнения вод, сокращающего возможность их использования для коммунального, промышленного, сельскохозяйственного водоснабжения и создания зон отдыха и снижающего эстетическую ценность рек и озер, относится к регулированию качества вод и является важной задачей многих водохозяйственных мероприятий.

Осуществление современных водохозяйственных мероприятий обычно планируется для достижения сразу нескольких вышеперечисленных целей, так как многоцелевые объекты являются экономически более обоснованными. По одной из классификаций, водохозяйственные мероприятия разделяются на мероприятия, планируемые для какого-либо одного участка, и мероприятия, влияние которых распространяется на значительные территории, причем каждое из них может быть одноцелевого и многоцелевого назначения. Мероприятия первого типа предназначены для обслуживания ограниченного района, мероприятия второго типа включают несколько пространственно разобщенных сооружений,

комплексное воздействие которых сказывается на больших территориях.

В табл. 3.1, подготовленной преимущественно по материалам работы Чоу (Choy, 1964, с. 26-2, 26-3), приведены мероприятия различного назначения, их цели и комплекс сооружений, необходимых для осуществления поставленных целей. Из данных таблицы видно, что одни и те же комплексы сооружений применяются для осуществления различных целей. В ней указываются также технические идеи, составляющие основу всех мероприятий многоцелевого назначения.

Очень часто назначение водохозяйственного объекта изменяется со временем. Например, план водохозяйственных мероприятий для всего бассейна предусматривает строительство одиночного водохранилища в качестве первого звена этих мероприятий и его эксплуатацию в соответствии с этим назначением. По мере строительства других водохранилищ этой системы режим эксплуатации первого звена может измениться в соответствии с режимом всей системы, а также измениться его назначение. Поэтому для всех водохозяйственных мероприятий следует предусмотреть возможность периодического изменения правил работы сооружений и их задач.

Многие цели управления водными ресурсами могут хотя бы частично решаться с помощью мероприятий, не связанных со строительством сооружений. Например, правильное регулирование использования земель на водосборе для поддержания и улучшения качества воды является важным мероприятием такого типа. В этом отношении очень ценным является комплексное планирование использования водных ресурсов и развития сельского хозяйства и других видов землепользования. Еще одним примером мероприятий рассматриваемого типа является рациональное использование пойменных участков и введение системы страхования для возмещения ущерба, наносимого паводками.

В связи с этим планирование использования водных ресурсов требует рассмотрения всех вариантов различных сочетаний водохозяйственных мероприятий, связанных с возведением сооружений и без него. Большая часть затруднений для учета мероприятий без строительства сооружений при водохозяйственном планировании связана с ведомственными факторами. К сожалению, учреждения, ответственные за планирование и утверждение планов в области управления водными ресурсами, очень редко склонны к подробному изучению и использованию таких мероприятий.

3.1.2. Основные типы водохозяйственных мероприятий

Все существующие классификации водохозяйственных мероприятий в настоящем Руководстве разделяются на два типа: 1) мероприятия, включающие строительство водохранилищ, и 2) мероприятия, в которых не предусматривается сооружение водохранилищ. Мероприятия первого типа могут включать строи-

тельство различных водохранилищ, предназначенных для перераспределения поверхностного стока с целью оптимального удовлетворения экономических, социальных и экологических потребностей. Вопросы, связанные с использованием грунтовых и подземных вод, выходят за рамки настоящего Руководства.

Водохозяйственные мероприятия первого типа включают как отдельные водохранилища одноцелевого и многоцелевого назначения, так и системы водохранилищ. Водохранилища обычно служат одной или нескольким из нижеперечисленных целей:

1) регулирование паводочного стока;
2) выработка гидроэлектроэнергии;
3) коммунальное и промышленное водоснабжение;
4) навигация;
5) контроль качества воды;
6) создание зон отдыха;
7) улучшение условий для поддержания рыбопродуктивности и сохранения природной среды.

В случае водохранилищ многоцелевого назначения полезный объем, соответствующий одной или более из названных целей (регулирование паводков, водоснабжение и т. д.), часто определяется проектными и эксплуатационными требованиями. Эти требования к объему водохранилищ должны быть очень гибкими. Иногда, например, для бассейнов, характеризующихся внезапными интенсивными паводками, целесообразно проводить анализ требований к объему водохранилищ для регулирования паводочного стока отдельно от требований к полезному объему водохранилищ. Такой подход позволяет раздельно определять противопаводочный и полезный объемы водохранилищ. Размеры этих призм могут со временем меняться. Например, объем противопаводочной призмы может значительно уменьшаться в сезоны, когда вероятность появления паводков мала. Поэтому при анализе требований к объемам водохранилища многоцелевого назначения необходимо учитывать возможные перераспределения запросов на воду между потребителями в каждый отдельный промежуток времени. Полезный объем, исключая случаи регулирования паводков, должен учитывать требования и интересы всех водопотребителей — гидроэнергетики, водоснабжения и т. д.

Отдельное водохранилище редко представляет собой единственный элемент водохозяйственного мероприятия. Обычно строительство водохранилища связано с целым комплексом сооружений, таких, как плотины, ГЭС, и мероприятиями по регулированию русла, которые могут служить тем же целям, что и водохранилище, не обеспечивая, однако, перераспределение поверхностного стока. Все водохозяйственные мероприятия, не предусматривающие накопление воды, относятся в этом Руководстве ко второму типу. Классическим примером таких мероприятий является система водоснабжения (например, для нужд орошения), включающая переброску речного стока на большие расстояния из областей с избыточным увлажнением в районы с недостатком

воды, в результате чего осуществляется пространственное перераспределение поверхностного стока. Средства для такой переброски воды обычно включают водохранилища, однако с точки зрения гидрологических расчетов они представляют собой целый комплекс задач, отличающихся от задач, связанных со строительством водохранилищ.

Как правило, мероприятия для снижения ущерба, наносимого паводками, как со строительством сооружений, так и без них, включают:

1) уменьшение максимального паводочного стока с помощью водохранилищ;

2) отведение паводочного стока в определенное русло путем строительства дамб, каналов или закрытых водоводов;

3) снижение наивысших уровней за счет увеличения скорости течения в результате регулирования русла;

4) переброска паводочных вод по каналам, водоводам, трубопроводам, обводным каналам;

5) эвакуация населения с затопляемых участков;

6) строительство специальных защитных сооружений;

7) уменьшение паводочных расходов воды путем регулирования землепользования;

8) создание системы прогнозирования и предупреждения о паводках;

9) введение систем страхования для возмещения ущербов, наносимых паводками.

Другие типы мероприятий, предназначенных для обеспечения водой в целях орошения и водоснабжения, включают строительство дамб, каналов, распределительных систем, водозаборных сооружений, бурение скважин, проведение очистительных работ и т. д. Навигационные проекты связаны с сооружением шлюзов, плотин и проведением работ по регулированию русла.

3.2. Гидрологические расчеты при проектировании водохранилищ

При планировании и проектировании мероприятий, предусматривающих создание водохранилищ независимо от их цели или назначения, применяются различные методы гидрологических расчетов. Некоторые общие расчетные методы используются при проектировании водохранилищ всех типов (см. п. 3.2.1), другие, дополнительные методы необходимы для проектирования водохранилищ определенного типа: для регулирования паводков (см. п. 3.2.2), гидроэнергетики (см. п. 3.2.3) и водоснабжения (см. п. 3.2.4). В п. 3.2.5 приводится алгоритм расчета параметров водохранилищ многоцелевого назначения. В п. 3.2.6, посвященном смешанным проектам водохранилищ и других мероприятий, обсуждается связь рассмотренных расчетных характеристик и ме-

тодов их определения для водохранилищ и мероприятий, не включающих создание водохранилищ.

3.2.1. Общие этапы расчетов для водохранилищ любых типов

1. В случае отсутствия гидрологических постов на участках предполагаемого строительства водохранилищ или недостаточности данных наблюдений за стоком воды выполняется региональное исследование с использованием данных наблюдений по соседним постам. Обобщаемые на основании регионального анализа данные могут включать средние за многолетний период годовые осадки, соотношения интенсивности, продолжительности и частоты выпадения осадков, параметры единичного гидрографа, значения годового стока и экстремальные обеспеченные расходы воды (см. п. 4.1).

2. Определяются значения естественного стока на участке водохранилища и опасных участках нижнего бьефа (см. п. 4.2).

3. Определяются характеристики водохранилища — кривые площадей, объемов, уровней (Choy, 1964, с. 25—65; Linsley, 1979, с. 148).

4. По результатам обработки временны́х рядов строятся кривые обеспеченности объемов и уровней воды водохранилища, при которых осуществляется эксплуатация его для всех предусмотренных проектом целей (см. п. 4.4, 4.8).

5. Определяются расчетные максимальные расходы воды, по которым рассчитывается пропускная способность водосливов, а также устанавливаются критерии для расчета трансформации паводка в водохранилище и русле реки (см. п. 4.5).

6. Определяется наивысшая отметка уровня воды водохранилища, на основании максимального расчетного расхода воды (см. п. 4.5).

7. Рассчитывается превышение гребня плотины на ветровое и волновое воздействие (см. п. 4.6).

8. Определяются отметки поверхности воды в водохранилище и по притокам для принятого расчетного максимального расхода и предполагаемого максимального расхода, который может вызвать разрушение плотины (см. п. 4.7).

9. Определяются объемы и распределение отложений наносов в водохранилище (накопление наносов) за отдельные периоды будущей эксплуатации (см. п. 4.8).

10. Определяются мертвый объем водохранилища и отметка наинизшего уровня воды для обеспечения интересов рыбного хозяйства, сохранения природы, создания зон отдыха и др. (см. п. 4.8).

11. Рассчитываются водосбросные отверстия с учетом требований аварийного сброса паводка (Linsley, 1979, с. 230—242).

12. Рассчитывается уменьшение объема водохранилища в результате образования льда и снежного покрова, если они имеют место (см. п. 4.8).

13. Разрабатываются правила эксплуатации водохранилища (см. п. 4.9).

14. Определяется вероятность отказа в удовлетворении запланированных требований к водохранилищу (Linsley, 1975, с. 391; WMO, 1974a, с. A20; Linsley, 1979, с. 157—158).

15. Оценивается влияние сооружаемого водохранилища на речной сток, окружающую среду (включая изменения температуры, содержания растворенного кислорода и т. д.), движение наносов на участке подпора и в нижнем бьефе, размыв русла в нижнем бьефе, заиление берегов, испарение, условия существования органической жизни в водной системе, режим подземных вод и процессы ледообразования (см. п. 4.10).

3.2.2. Этапы расчетов при проектировании водохранилищ для регулирования паводков

1. Разрабатывается диспетчерский график водохранилища с учетом прогнозируемых паводочных расходов и условий участков нижнего бьефа, на которых водохранилище должно уменьшить возможный ущерб от паводка (см. п. 4.9).

2. Определяется минимальная заблаговременность предсказания расходов, которые могут оказать влияние на работу водохранилища, и оценивается соответствующая точность прогноза (например, погрешность 20 % для расходов, прогнозируемых с заблаговременностью 12 ч (см. п. 4.9.7.)).

3. Определяются требования к противопаводочному объему водохранилища и рассчитываются соответствующие расходы воды, регулируемые проектируемым водохранилищем, на основании анализа и обработки данных при условии минимизации паводков на опасных участках нижнего бьефа (см. п. 4.8).

4. Строятся кривые обеспеченности максимальных расходов в естественных условиях и в условиях регулирования стока для каждого опасного участка ниже проектируемого водохранилища во всем диапазоне колебаний противопаводочных объемов водохранилища (см. п. 4.4).

5. Определяются требования к пропускной способности водосбросных сооружений с учетом пропускной способности русла в нижнем бьефе и желаемого времени опорожнения водохранилища (Linsley, 1979, с. 240—242).

6. На основании кривых связей уровней и расходов паводков на опасных участках и кривых обеспеченности максимальных расходов строятся кривые обеспеченности предпроектных паводков и кривые вероятности средних годовых ущербов от предпроектных паводков для каждого из основных опасных участков нижнего бьефа (WMO, 1974a, с. 5.70; James, 1971, с. 229—263).

7. Для выбранного диапазона колебаний противопаводочных объемов рассчитываются соответствующие средние годовые затраты (Chow, 1964, с. 26.13—26.25; James, 1971, с. 229—263).

8. Для каждого альтернативного варианта регулирования па-

водочного стока строится модифицированная кривая вероятности ущерба от паводка. Оценивается ожидаемый эффект от предотвращения ущерба, причиняемого паводками (экономическая эффективность от регулирования паводков) (см. п. 4.4; WMO, 1972a, с. 5.70; James, 1971, с. 229—263).

9. Определяется функциональная зависимость между средними годовыми затратами на регулирование паводков (см. подпункт 7) и ожидаемым эффектом от предотвращения материального ущерба, наносимого паводками (см. подпункт 8) (Chow, 1964, с. 26.23—26.25; James, 1971, с. 229—263) [1].

10. На основании экономических (затраты — экономический эффект) и других критериев (социальные, экологические и т. д.) выбирается наиболее целесообразное решение по регулированию паводков. При необходимости расчет должен проводиться на основании не только зависимости расход паводка — ущерб, им причиняемый, но и учета влияния сезонности и продолжительности паводков (James, 1971, с. 229—263).

3.2.3. Этапы расчетов для водохранилищ ГЭС

1. Определяются местные потребности в электроэнергии, которые должен удовлетворять проект. Если водохранилище проектируется для энергосистемы, должны учитываться требования системы и минимальные требования к создаваемому водохранилищу (см. п. 4.8.4.; Linsley, 1979, с. 470; James, 1971, с. 325—349) [1].

2. Рассчитывается испарение с поверхности водохранилища в нормальных условиях и в засушливые периоды (см. п. 4.10).

3. Определяется приток воды в водохранилище, который будет использован для обработки и анализа данных для условий работы водохранилища, за месячные, декадные и недельные интервалы времени (см. п. 4.8.3, 4.3).

4. Определяются требования к полезному объему водохранилища и рассчитывается отметка нормального подпорного уровня, необходимые для обеспечения годовой выработки электроэнергии (см. п. 4.8.4).

5. Рассчитывается установленная проектная производительность ГЭС с учетом мощности установки и средней годовой энергообеспеченности района (см. п. 4.8.4; Linsley, 1979, с. 472; James, 1971, с. 325—349) [1].

6. Определяется дополнительная выработка электроэнергии за год и соответствующая производительность ГЭС на основании анализа и обработки данных за многолетний период (см. п. 4.8.4).

7. На основании параметров гидроэнергетической установки, графика выработки электроэнергии и характеристик русла определяется необходимость в дополнительных регулирующих соору-

---

[1] Этот метод расчета не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

жениях в нижнем бьефе (Linsley, 1979, с. 472—474; James, 1971, с. 325—349).

3.2.4. Этапы расчетов для водохранилищ, создаваемых в целях водоснабжения

1. Определяются требования к обеспечению водой для коммунального и промышленного водоснабжения и орошения (обычно за месячные, декадные и недельные интервалы времени) (Linsley, 1979, с. 404—413; James, 1971, с. 285—324).

2. Определяется испарение с поверхности водохранилища в нормальных условиях и в засушливые периоды (см. п. 4.10).

3. Определяется приток воды в водохранилище за месячные, декадные и недельные интервалы, который используется для анализа и обработки на последующих этапах расчета (п. 4.8.3, 4.3).

4. Рассчитывается полезный объем водохранилища для удовлетворения потребностей в воде (см. п. 4.8).

3.2.5. Этапы расчетов для водохранилищ многоцелевого назначения

1. Устанавливаются цели создания водохранилища и запросы на воду, соответствующие каждому целевому назначению, а также их изменчивость и приоритетность водопользования (см. п. 4.9).

2. Определяется тип водосбросов: непосредственно из водохранилища или на участках ниже водохранилища с учетом расходов воды, поступающих через турбины (Linsley, 1979, с. 678).

3. Рассчитываются потребности, объемы и отметки уровней воды водохранилища, отвечающие каждой цели (см. п. 4.10; Linsley, 1979, с. 678).

4. Рассчитывается полный объем водохранилища и соответствующие отметки уровней для обеспечения многоцелевого использования водохранилища на основании сведений, полученных при расчете характеристик водохранилища для каждого отдельного целевого назначения (см. п. 4.8).

3.2.6. Этапы расчетов для водохозяйственных мероприятий смешанного типа[1]

1. Определяются максимальные расчетные расходы воды в соответствии с необходимой мерой защиты от паводков для водохранилищ, плотин, мероприятий по регулированию русел, отвода и переброски стока, планирования по затоплению пойменных участков и т. д. (см. п. 4.5).

2. Выбирается наилучшее сочетание мероприятий, включающее водохранилище, дамбы, каналы, отвод и переброску стока, для

---

[1] Подробная информация по этим вопросам приводится в многочисленных публикациях. (United Nations, 1964, 1969, 1974, 1978).

оптимального использования водных ресурсов всего бассейна с учетом всех необходимых критериев, гидрологических, экономических и социальных (Linsley, 1979, с. 665—680) [1].

3.3. Гидрологические расчеты при проектировании мероприятий, не связанных с сооружением водохранилищ

Ниже описывается последовательность гидрологических расчетов для отдельных типов водохозяйственных мероприятий по регулированию паводков без водохранилищ. Расчеты для объектов многоцелевого назначения выделены, как и расчеты для водохранилищ, в перечень дополнительных этапов. Например, последовательность расчетов при разработке мероприятий для регулирования паводков и контроля качества вод приводятся в п. 3.3.1 и 3.3.2 соответственно.

Более подробное описание отдельных методов, упомянутых ниже, можно найти в работе Джеймса и Ли (James, Lee, 1971).

3.3.1. Мероприятия по регулированию паводков

1. Рассчитываются кривые обеспеченности максимальных расходов для каждого из основных опасных участков (см. п. 4.4).

2. Для участков, не имеющих гидрологических постов, или при недостаточности данных наблюдений, проводится региональный анализ с использованием данных ближайших постов (см. п. 4.1).

3. Рассчитывается естественный сток на участке проектируемого водохранилища и на опасных участках нижнего бьефа (см. п. 4.2).

4. Определяется расчетный максимальный расход воды для проектируемого мероприятия (см. п. 4.5).

5. Рассчитывается превышение гребня проектируемых сооружений с учетом воздействия волн и ветра (см. п. 4.6).

6. Рассчитываются отметки поверхности воды по длине каналов или дамб обвалования и за их пределами (см. п. 4.7).

7. Оценивается влияние изменений в результате осуществления проектируемого мероприятия на речной сток, окружающую среду и т. д. (см. п. 4.10).

8. Определяется вероятность отказа за период эксплуатации объекта (Linsley, 1979, с. 157—158).

9. На основании зависимости уровень — паводочный расход на опасных участках вниз по течению и кривых обеспеченности максимальных расходов определяются кривая вероятности ущерба и средний годовой ущерб для каждого из основных опасных участков (WMO, 1974a, с. 5.70; James, 1971, с. 229—262) [1].

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

10. Рассматриваются альтернативные варианты мероприятий по регулированию паводков как со строительством сооружений, так и без него, и рассчитываются связанные с ними средние годовые затраты (Chow, 1964, с. 26.13—26.25; James, 1971, с. 229—262)[1].

11. Для каждого варианта строится модифицированная кривая вероятности ущерба от паводков. Рассчитывается ожидаемое снижение среднего годового ущерба (экономический эффект планируемого мероприятия) (см. п. 4.4; WMO, 1974a, с. 5.70; James, 1971, с. 229—262)[1].

12. Строится функциональная зависимость между средними годовыми затратами на планируемое мероприятие и экономическим эффектом от снижения ущерба в результате осуществления мероприятий по регулированию паводочного стока (см. подпункт 11) (Chow, 1964, с. 26.23—26.25; James, 1971, с. 229—262)[1].

13. Выбирается оптимальный вариант мероприятий по регулированию паводков на основании анализа экономических (экономический эффект), и других критериев (социальные, экологические и др.). По возможности расчет должен основываться не только на соотношении расход паводка — причиняемый им ущерб, но и на учете сезонных и более длительных колебаниях паводочного стока (Chow, 1964, с. 25. 118—25.120; James, 1971, с. 229—262)[1].

3.3.2. Мероприятия для контроля качества воды

1. Проводится региональный анализ для определения расположения существующих и потенциальных водопользователей, оказывающих влияние на качество вод или зависящих от него. Водопользователями могут быть:

а) система коммунально-бытовой канализации вместе с системой ливневой канализации;

б) промышленные предприятия;

в) сельскохозяйственные угодья;

г) скотоводческие хозяйства;

д) рыбное хозяйство;

е) зоны отдыха, связанные с водой;

ж) зоны отдыха, не связанные с водой.

2. Для каждого из существующих и потенциальных водопользователей определяются (Chow, 1964, с. 19—27; Thomman, 1972):

а) требования к качеству забираемой воды;

б) возможные методы очистки забираемой воды (технико-экономические показатели);

в) степень загрязнения сбрасываемых вод при различных технологиях использования воды и распределение загрязняющих веществ во времени;

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

г) возможные методы очистки сбрасываемых вод (технико-экономические показатели).

3. Выполняется гидрологический анализ для определения расчетных расходов воды, по которым оценивается способность речной системы разбавлять сточные воды (см. п. 4.4). Эти исследования связаны с анализом:

а) продолжительности межени и ледостава;

б) вероятности появления минимальных расходов определенной продолжительности;

в) напряженности условий (общий дефицит водообеспечения при некотором расходе определенной продолжительности);

г) времени появления минимальных расходов в пределах годового цикла;

4. Выполняется анализ условий разбавления сбрасываемых вод данной речной системой, а также расчет зон рассеяния и смешения сточных и речных вод при различных объемах сбрасываемых вод (см. п. 4.10).

5. Анализируются различные способы регулирования качества вод для выбора оптимального (например, с наименьшими затратами), обеспечивающего необходимое потребителям качество воды (James, 1971; Thomann, 1972) [1].

3.3.3. Мероприятия по орошению

1. Определяются потребности в воде различных сельскохозяйственных культур (Chow, 1964, с. 11—32; Doorenbos, 1979; Ayers, 1977; Israelson, 1962; Oliver, 1972).

2. Определяется норма орошения (количество воды на 1 га пашни в течение вегетационного периода для обеспечения оптимальных условий развития возделываемых культур) (WMO, 1974a, с. A.7; Doneen, 1971в; Withers, 1974).

3. Определяется необходимость забора воды на основании норм орошения (с учетом сезонной изменчивости), площади орошаемых земель, севооборота и производительности будущей оросительной системы (WMO, 1974a, с. A.7; Doneen, 1971в; Zimmerman, 1966) [1].

4. На основании многолетних данных наблюдений (или карт изолиний стока) рассчитывается среднее многолетнее значение речного стока, которое используется для определения количества забираемой воды (см. п. 4.2, 4.3).

5. Анализируется внутригодовое распределение стока. Определяются критические расходы воды и лимитирующие сезоны года (см. п. 4.3).

6. Выполняется анализ максимальных расходов воды для определения размеров сооружений по регулированию дождевых паводков, грязевых потоков, а также размеров сбросных отверстий,

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

которые обеспечивают защиту сооружений от разрушения и эрозии (см. п. 4.5; Houk, 1956).

7. Выполняется анализ изменений уровня воды с целью определения местоположения, типа и размеров водозаборных устройств для системы орошения (см. п. 4.3).

8. Выполняется анализ температурного и ледового режимов, преобладающих на данной территории, для последующего определения эксплуатационного режима гидравлических сооружений и норм обогрева шлюзовых затворов и решеток (см. п. 4.10).

9. Рассчитывается содержание наносов и их изменения по глубине, ширине и длине реки, а также по отношению к речному стоку (см. п. 4.10).

10. Изучается химический состав оросительных вод по сезонам года (при высоких расходах воды и в периоды межени) (Chow, 1964, с. 19-1; Ayers, 1976)[1].

11. Выполняются воднобалансовые расчеты на основании измерений притока и оттока поверхностных вод, испарения, режима грунтовых вод, динамики влагосодержания в зоне аэрации, метеорологических условий, состояния и роста растительности (см. п. 4.1).

12. Оцениваются объем стока для орошения, безвозвратные потери и потери на испарение. Анализируется возможность повторного использования оросительных вод для других нужд (WMO, 1974a, с. A.7; Doneen, 1971в)[1].

13. Оценивается воздействие оросительных мероприятий на окружающую среду (засоление почв, заболачивание, ухудшение качества вод, уменьшение речного стока и т. д.) (см. п. 4.10).

3.3.4. Мероприятия по осушению территорий

1. Проводится региональное исследование рек в районах предполагаемых мероприятий по осушению болот и заболоченных территорий для оценки их водоносности в период весеннего половодья и дождевых паводков (см. п. 4.7).

2. Осуществляется обследование территории планируемых осушительных работ и сбор гидрологических данных.

3. Обследуются речные водосборы с осушенными площадями, для того чтобы собрать следующие сведения (Chow, 1964, с. 21—88; Luthin, 1966):

а) подробное описание дренажных систем;

б) использование осушенных земель в настоящее время;

в) состояние отводящих каналов и рек;

г) характер хозяйственной деятельности на водосборах;

д) описание состояния территорий, прилегающих к дренажным системам, и их естественных ландшафтов.

4. Исследуется гидрологический режим рассматриваемой тер-

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

ритории с целью получения региональных оценок для гидрологического расчета осушительной системы (см. п. 4.1; WMO, 1974a, с. 5.64—5.72), а именно:

а) средний расход;

б) максимальный и минимальный расходы за разные сезоны;

в) местный сток.

5) Исследуется влияние мелиоративных работ на водный и тепловой режимы, водные ресурсы и обводненность осушаемых земель и соседних территорий, в том числе (WMO, 1974a, с. 5.88; Doneen, 1971a, 1973; Kienitz, 1979):

а) влагообмен в зоне аэрации;

б) уровенный режим;

в) режим стока;

г) испарение;

д) инфильтрация осадков и оросительных вод в мелиоративных системах;

е) влагосодержание в почве и подпочвенном слое;

ж) режим водопотребления различными сельскохозяйственными культурами;

з) качество воды.

6. Разрабатываются региональные рекомендации для целенаправленного регулирования водного, теплового и воздушного режимов, а также режимов питания в зонах активного водообмена и прежде всего в зоне корнеобразования в условиях мелиорирования земель (Chow, 1964; Doneen, 1971a, 1973).

7. Исследуется влияние мелиорации на природные ландшафты в различных физико-географических и климатических условиях для того, чтобы оценить характер их изменений, а также изменения биологической продуктивности (Chow, 1964; с. 21—27; Doneen, 1971a, 1973).

8. Организуется система соответствующих наблюдений для сбора гидрометеорологической информации на мелиорируемых землях для того, чтобы повысить эффективность мелиоративных мероприятий и продуктивность использования осушенных земель (Chow, 1964, с. 24-4; WMO, 1974a, с. 3.1; Doneen, 1971a, 1973).

3.3.5. Проектирование промышленного и коммунально-бытового водоснабжения

1. Прогнозируются возможные уровни водопотребления на промышленные и коммунально-бытовые нужды (Linsley, 1979, с. 406; James, 1971) [1].

2. Проводятся региональные изыскания для определения местоположения потенциальных источников водоснабжения (поверхностных и грунтовых вод) (см. п. 4.1, WMO,1974a, с. A.3).

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

3. Для каждого потенциального источника водоснабжения определяются:

а) объем и качество имеющейся воды для различных уровней надежности водоснабжения;

б) распределение во времени водных ресурсов в отношении как их количества, так и качества;

в) затраты при различных вариантах мероприятий по использованию водных ресурсов.

4. Осуществляется анализ потребностей в воде и возможности их удовлетворения для выбора оптимальной схемы (например, с точки зрения материальных затрат) водоснабжения (James, 1971).[1]

5. Определяются расчетные параметры устройств для отвода и забора воды (затворов на участках подпора, насосов, компенсационных водохранилищ) (Linsley, 1979, с. 455—461).[1]

6. Определяются расчетные параметры необходимых очистных сооружений (Linsley, 1979, с. 429—431; Thomann, 1972).[1]

7. Определяются расчетные параметры системы водоснабжения (Linsley, 1979, с. 297).[1]

8. Оценивается влияние планируемого мероприятия на речной сток для всего бассейна, качество вод, движение наносов и т. д. (Chow, 1964, с. 14-1—17-1, 19-1; Ortolano, 19).[1]

3.3.6. Навигационные мероприятия

1. Прогнозируются возможные уровни развития грузоперевозок на судах внутренней навигации в сравнении с другими транспортными средствами (Linsley, 1979, с. 486; James, 1971, с. 353—372).[1]

2. Определяются транзитные глубины и состояние русла, необходимые для грузовых судов определенного типа (см. п. 4.2, 4.4.).

3. Строятся кривые глубина — продолжительность для условий естественного стока (см. п. 4.4). Если естественные условия не обеспечивают достаточно надежных транзитных глубин в течение всего периода навигации, то рассматриваются различные варианты мероприятий по регулированию глубин, например мероприятия по регулированию русел, повышение стока в меженные периоды дополнительными попусками воды из водохранилищ и(или) сооружением специальных запруд с помощью навигационных плотин и дамб (канализация рек) (Linsley, 1979, с. 488; Fair, Leyer, 1968).

4. Выполняется гидрологический анализ (в вероятностном виде) степени улучшения условий навигации для каждого альтернативного варианта мероприятий по регулированию глубины и улучшению русла (см. п. 4.4).

5. Исследуются условия навигации при высоких уровнях воды (габариты судов и высота под мостовыми переходами, турбулент-

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

ность потоков и т. д.), определяется максимально допустимый уровень воды для навигации (Linsley, 1979, с. 489).

6. Оценивается влияние приливов, ветра и ледовых явлений на условия навигации (см. п. 4.6, 4.10).

7. Рассчитывается сток наносов, оценивается опасность заиления шлюзов (см. п. 4.10).

8. При создании искусственных водных путей определяются требования к расходам отводимой воды и характерным расходам, необходимым для проектирования отводящей системы (см. п. 4.5).

9. Рассчитываются характерные уровни воды для проектирования причалов (Wiegel, 1964, с. 442; Quinn, 1961).[1]

3.3.7. Организация зон отдыха и обеспечение условий существования животного мира и растительного мира

1. Устанавливается различие между проектируемыми зонами отдыха на берегах водоемов и мерами по защите природы (James, 1971, с. 395, 436).

2. Выбираются участки для мероприятий обоих типов (James, 1971, с. 396—423).

3. Выполняется географический, гидрологический и экологический анализ рассматриваемой территории (United Nations, 1964, с. 4; Chow, 1964, с. 26-4 и 26-13).

4. Исследуются потенциальные возможности использования территорий в рекреационных целях (James, 1971, с. 398; Clayson, 1966).[1]

5. Оцениваются последствия интенсивного использования территорий в рекреационных целях и возможности ограничений.

6. Выбираются участки для массового и индивидуального отдыха, выделяются участки для различных видов отдыха (James, 1971, с. 398; Clayson, 1966).[1]

7. Разрабатываются меры против использования земель для непредусмотренных целей в интересах охраны природы (United Nations, 1970, с. 72; Clayson, 1966).[1]

3.4. Гидрологические расчеты при долгосрочном планировании комплексного использования водных ресурсов рек

Комплексное использование водных ресурсов речных бассейнов в целом требует различных исследовательских работ, связанных как с природной, так и с социально-экологической средой обитания человека. Этот раздел касается главным образом гид-

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

рологических исследований, необходимых при подготовке плана комплексного управления водными ресурсами целых речных бассейнов. Хотя гидрологические исследования и имеют первостепенное значение для такого планирования, но успех намечаемых мероприятий зависит от критического анализа перспектив социально-экономического развития на территории речного бассейна.

Развитие использования водных ресурсов само по себе не может быть конечной целью, его следует рассматривать как вклад в перспективный план развития района, определяемый местными властями и правительством данной страны.

Существует столько же методов исследований и расчетов для разработки комплексных схем развития водных ресурсов речных бассейнов, сколько может быть вариантов водохозяйственных мероприятий. Примером этого может служить приведенная ниже последовательность расчетных подходов, составленная по материалам Организации Объединенных Наций (United Nations, 1970) и являющаяся ценным справочным материалом при гидрологических исследованиях и планировании мероприятий по комплексному использованию водных ресурсов в масштабах речных бассейнов.

1. Оценивается соответствие имеющихся метеорологических данных (например, сведения об осадках, испарении, эвапотранспирации, температуре воздуха) и гидрологических данных (сведения о стоке воды, гидрографы паводочного стока, характеристики подземного стока, качества воды и стока наносов) (см. п. 4.1, 4.2).

2. Выбираются контрольные участки речной системы с учетом расположения гидрологических постов, основных объектов водопотребления, действующих и планируемых противопаводочных сооружений. Исследуется местоположение источников грунтовых вод (United Nations, 1964, с. 3).

3. Определяется, какая дополнительная информация необходима, помимо имеющейся, для выполнения исследования и применения выбранных методов расчета (классический водный баланс, моделирование, оптимизация) (United Nations, с. 47).

4. Выбираются методы, эмпирические формулы и графические зависимости для получения дополнительной информации (удлинение данных по стоку, применение моделей осадки — сток, регрессионный анализ) (см. п. 4.1, 4.2).

5. Собираются дополнительные данные (United Nations, 1970, с. 47; Fair, Leyer, 1968).

6. Выполняется анализ и обработка данных для исследуемых проблем (United Nations, 1970; Fair, Leyer, 1968):

— коммунально-бытовое, промышленное и сельскохозяйственное водоснабжение;
— регулирование паводков;
— борьба с загрязнением вод;
— гидроэнергетика;
— навигация;
— создание зон отдыха на берегах водоемов;
— защита природы.

Таблица 3.1

Назначение водохозяйственных мероприятий, их цель и комплекс сооружений [1]

Назначение	Цель создания	Комплекс сооружений
Регулирование паводочного стока	Предотвращение разрушений в результате паводков и половодий или их уменьшение, защита окружающей среды и экономическое развитие	Плотины, водохранилища, дамбы, укрепления берегов, регулирование русла, отводящие каналы, насосные станции, системы предупреждения о паводках, деривация и другие работы по задержанию паводка
Гидроэнергетика	Выработка электроэнергии для развития экономики и повышения уровня жизни населения	Плотины, водохранилища, затворы, гидроэлектростанции
Коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение	Обеспечение водой для удовлетворения коммунально-бытовых и промышленных нужд	Плотины, водохранилища, скважины, водоводы, насосные установки, водозаборные сооружения, сооружения по очистке вод, опреснительные установки, распределительные системы
Орошение	Увеличение и стабилизация сельскохозяйственного производства	Плотины, водохранилища, скважины, оросительные каналы, насосные станции, мероприятия по борьбе с сорняками и очистные работы, распределительные системы

Осушение земель	Увеличение и стабилизация сельскохозяйственного производства, развитие городов, улучшение состояния здоровья населения	Канавы, дренажные трубы, насосные станции, шлюзы
Навигация	Товарные и пассажирские перевозки	Плотины, водохранилища, каналы, шлюзы, регулирование русел, причалы
Контроль качества воды	Защита вод от загрязнения или улучшение качества воды для городского, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, защита рыб и других представителей природной среды, развитие промыслового рыбоводства	Устройства для очистки загрязненных вод, водохранилища, коллекторные системы для сточных вод
Создание зон отдыха	Улучшение возможностей для отрыха и занятий спортом	Водохранилища, средства для организации отдыха, меры по борьбе с загрязнением окружающей среды
Улучшение условий в интересах рыбного хозяйства и охраны природы	Улучшение условий обитания рыб и других видов флоры и фауны, снижение или предотвращение ущерба для рыб и других предоставителей природной среды в результате хозяйственной деятельности, развитие промыслового рыболовства	Проходы для рыб, лестничные рыбоводы, экраны, водохранилища, меры по борьбе с загрязнением окружающей среды
Регулирование стока наносов	Уменьшение и регулирование стока наносов рек, защита водоемов от загрязнения	Очистка водоемов и рек от наносов, облицовочные работы, укрепление берегов, строительство специальных плотин

[1] По материалам «Справочника по прикладной гидрологии», составленного Вен Те Чоу (Ven Te Chow. Handbook of Applied Hydrology. — McGraw-Hill, 1964).

7. Оценивается изменчивость годового стока и характеристик внутригодового распределения стока (см. п. 4.3).

8. Определяется количество воды, которую можно забрать из подземных источников без нежелательных последствий (Linsley, 1979, с. 101; Bouver, 1978).

9. Оцениваются требования к минимальным расходам по выбранным контрольным участкам, т. е. определяются минимальные расходы воды, которые необходимо поддерживать в реке по эстетическим, ландшафтным, санитарным и биологическим соображениям (Chow, 1964, с. 19—27; Linsley, 1975).

10. Определяются запасы имеющихся водных ресурсов и анализируются резервы при различных вариантах регулирования паводочного стока (United Nations, 1964, с. 3; Крицкий, 1952; Linsley, 1979, 1975).

11. Рассчитываются характеристики максимального стока для выбранных участков (кривые обеспеченности максимальных расходов в естественных условиях и при регулировании стока, расчетные максимальные расходы, критерии для расчета трансформации стока по длине реки) (см. п. 4.2, 4.4, 4.5).

12. Разрабатываются варианты решений по регулированию паводков (создание водохранилищ, меры по задержанию паводочных вод, строительство дамб, противопаводочных укреплений, отводящих каналов, регулирование русла) (Linsley, 1979, с. 641; Klemes, 1973, с. 93; United Nations, 1964, с. 14; 1976).

13. Определяются характеристики меженного стока по контрольным участкам (кривые обеспеченности минимального стока в естественных условиях и при регулировании стока, расчетный минимальный расход) (см. п. 4.4).

14. Разрабатываются варианты мероприятий по контролю качества воды (Chow, 1964, с. 18—22; Eckenfelder, 1970).

15. Рассчитываются гидрологические характеристики, необходимые для исследований в целях гидроэнергетики (Chow, 1964, с. 26-6; WMO, 1974b, с. 7; Linsley, 1979, с. 467; Creager, 1958).[1]

16. Разрабатываются различные варианты мероприятий для удовлетворения требований гидроэнергетики (Linsley, 1979, с. 467; Chow, 1964, с. 26-4; Creager, 1958).[1]

17. Рассчитываются гидрологические характеристики для исследований условий навигации (глубины и ширины русел, скорости течений) (Chow, 1964, с. 26-2; WMO, 1974a, с. 11.35; Stratton, 1969).

18. Разрабатываются различные мероприятия по развитию навигации (Chow, 1964, с. 26-2; Linsley, 1979, с. 677; Stratton, 1969).[1]

19. Определяются гидрологические характеристики, необходимые для исследований по созданию зон отдыха (глубины и пло-

---

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

щади водной поверхности, качество воды) (James, 1971, с. 408; Chow, 1964, с. 26-2; Linsley, 1979, с. 677; Clawson, 1966).

20. Разрабатываются различные мероприятия по использованию водоемов в рекреационных целях (James, 1971, с. 408; Chow, 1964, с. 26-2; Linsley, 1979, с. 677: Clawson, 1966).[1]

21. Определяются гидрологические характеристики для мероприятий по созданию оптимальных условий существования рыбы и органической жизни (температура и качество воды) (James, 1971, с. 432; Linsley, 1979, с. 241; Chow, 1964, с. 26-2).

22. Разрабатываются различные мероприятия по улучшению условий существования рыбы и других представителей флоры и фауны (Chow, 1964, с. 26-2; James, 1971, с. 423; Linsley, 1979, с. 241).[1]

23. Анализируются все действующие и рассматриваются возможные в будущем соглашения между различными ведомствами по управлению водными ресурсами (Klemes, 1973, с. 1; Linsley, 1979, с. 660; United Nations, 1970, с. 33; 1969, с. 100; Environmental Canada, 1975).[1]

24. Оцениваются различные варианты водохозяйственных мероприятий и разрабатывается перспективный план комплексного развития водных ресурсов в речном бассейне, содержащий оценку последствий планируемых мероприятий на окружающую среду и гидрологический режим (см. п. 4.10).[1]

Список литературы

Ayers R. S., Wescot D. M. 1976. Water quality for agriculture. — FAO Irrigation and Drainage Paper, N 29. Rome, Fao. A-2.

Ayers R. S. 1977. Crop water requirements. — FAO Irrigation and Drainage Paper, N 24. Rome, FAO. A-2.

Bouver H. 1978. Groundwater hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Glawson M., Knetsch J. L. 1966. Economics of outdoor recreation. — Baltimore, Johns Hopkins University Press. B-22.

Creager W. P., Justin J. D. 1958. Hydroelectric handbook. — New York, Wiley. B-23[2].

Doneen L. D. 1971a. Drainage of heavy soils. — FAO Irrigation and Drainage Paper, N 6. Rome, FAO. A-2.

Doneen L. D. 1971b. Irrigation practice and water management. FAO Irrigation and Drainage Paper, N 1, Rome, FAO. A-2.

Doneen L. D. 1973. Drainage of salty soils. — FAO Irrigation and Drainage Paper, N 16, Rome, FAO. A-2[2].

Doorenbos J., Kassam A. N. a. o. 1979. Yield response to water. — FAO Irrigation and Drainage Paper, N 33. Rome, FAO. A-2.

Eckenfelder W. W., Ford D. L. 1970. Water pollution control. — Texas, Jenkins Publishing Company. B-21.

Environment Canada. 1975. Comprehensive river basin planning. — Ottawa, Department of Supply and Services. B-63.

Fair G. M., Geyer J. C., Ocun D. A. 1968. Water and wastewater engineering. — New York, Wiley. B-23.

[1] Этот метод не относится к инженерной гидрологии и поэтому в главе 4 не рассматривается.

[2] Распродана. Возможно, имеется в библиотеках.

Houk I. E. 1956. Irrigation engineering. — New York, Wiley. B-23 [1].
Israelson O. W., Hansen V. E. 1962. Irrigation practices and principles. 3d ed. — New York, Wiley. B-23.
James D. L., Lee R. R. 1971. Economics of water resources planning. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Klemes V. 1973. Application of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10 [1].
Kientiz G. 1979. Hydrological regime as influenced by drainage of wetlands. Technical Documents in Hydrology. — Paris, Unesco. A-7.
Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. 1952. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеоиздат. B-68.
Linsley R. K., Jr., Kohler M. A. Paulhus L. H. 1975. Hydrology for engineers. 2d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Linsley R. K., Franzini J. B. 1979. Water resources engineering 3d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Luthin J. N. (ed.). 1966. Drainage engineering. — New York, Wiley. B-65.
Oliver H. 1972. Irrigation and water resources engineering. — London, Edward Arnold. B-14.
Ortolano L. (ed.). No date. Analyzing the environmental impacts of water projects. — U. S. Army Institute for Water Resources Report 73—3. Virginia, National Technical Information Service. NTIS, N AD-766286. B-32.
Quinn A. D. 1961. Design and construction of ports and marine structures. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Stratton J. H., Douma J. H., Davis. 1969. Navigation systems. Section 31 in C. V. Davis and K. E. Sorensen (eds.). Handbook of applied hydraulics, 3d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Thomman R. V. 1972. Systems analysis and water quality management. — New York, McGraw-Hill. B-27.
United Nations. 1964. Manual of standrads and criteria for planning water resources projects. — UN Water Resources Series, N 26. New York, United Nations. A-8 [1].
United Nations. 1969. Planning water resources development. — UN/ECAFE Water Resources Series, N 37. New York, United Nations. A-8 [1].
United Nations. 1970. Integrated river basin development. — New York, United Nations. A-8.
United Nations. 1974. Manual pour l'establishment des bilans des ressources et des besoins en eau. — UN/ECE, N 79. New York, United Nations. A-8.
United Nations. 1976. Guidelines for flood prevention and management in developing countries. — UN Water Resources Series, N 5, ST/ESA/45. New York, United Nations. A-8.
United Nations. 1978. Water development and management. — Proceedings of the UN Water Conference, Mar del Plata, Argentina, 1977, 4 vols. New York, Pregamon Press. B-38 [2].
Wiegel R. L. 1964. Oceanographical engineering. — New Jersey, Prentice-Hall. B-39.
Withers B., Vipond S. 1974. Irrigation: design and practice. — London, B. T. Bastford, Ltd. B-5.
WMO. 1974a. Guide to hydrological practices. 3d ed. — WMO, N 168. Geneva. A-10 [3].
WMO. 1974b. Meteorological and hydrological data required in planning the development of water resources. — Operational Hydrology Report, N 5. WMO, N 419. Geneva. A-10.
Zimmerman J. D. 1966. Irrigation. — New York. Wiley. B-65.

---

[1] Распродана. Возможно, имеется в библиотеках.

[2] Продается по цене примерно 520 ам. долл. плюс 5 % на почтовые расходы.

[3] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

4. Методы гидрологических расчетов, используемые при водохозяйственном проектировании

4.1. Методы регионального анализа гидрологических и метеорологических данных

4.1.1. Введение

В п. 2.1 дано краткое описание различных приемов анализа гидрологических и метеорологических данных. Оценка какого-либо статистического параметра по конкретному ряду наблюдений, например среднее многолетнее значение годового стока, относится только к определенному участку реки. Региональный анализ применяется для переноса полученной в результате наблюдений информации на неизученные или слабоизученные участки. Данными, которые могут быть регионально обобщены, являются: средние годовые осадки, соотношения между интенсивностью, продолжительностью и вероятностью осадков, оценки параметров единичного гидрографа стока, средний годовой сток, кривые обеспеченности экстремальных расходов и т. п.

4.1.2. Однородность данных

Прежде чем приступить к региональному обобщению данных, необходимо оценить их временну́ю и пространственную однородность. Однородность данных во времени проверяется для того, чтобы установить направленные изменения (тренды) или внезапные изменения (выбросы) в рядах данных наблюдений. Среднее значение случайной переменной может увеличиваться или уменьшаться с течением времени из-за циклических колебаний климатических факторов, изменения системы землепользования и других причин, естественных или антропогенных (IAHS/WMO, 1974). Для выявления возможных тенденций в рядах наблюдений обычно применяется метод скользящих средних (Chow, 1964, с. 8-81—8-82). Нерепрезентативные значения в данных наблюдений выявляются при анализе, выполняемом методом двойной интегральной кривой (WMO, 1974, с. 5.3; Chow, 1964, с. 9-26—9-27; Unesco/WMO, 1977, с. 31).[1] Установленную таким образом неоднородность данных на-

---

[1] В СССР большее распространение для выявления нерепрезентативных значений в данных наблюдений получили статистические критерии оценки резко отклоняющихся значений: критерий Н. В. Смирнова (Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. — М.: Наука, 1969. — 511 с.) и критерии Диксона (Сархан А. Е., Гринберг Б. Т. Введение в теорию порядковых статистик. Пер. с англ. — М.: Статистика, 1970. — 414 с.). — *Прим. ред.*

блюдений необходимо подтвердить анализом обусловливающих физических причин.

Оценка пространственной однородности данных наблюдений осуществляется для того, чтобы установить, значимо ли визуально отмеченное различие в эмпирических оценках параметров рассматриваемой характеристики и может ли оно объясняться особенностями физико-географических и климатических условий данного района. Один из приемов, разработанных для оценки пространственной однородности гидрологических характеристик, заключается в применении распределения 1-го типа экстремальных значений (Chow, 1964, с. 8-37) [1]. С помощью другого приема совокупность данных наблюдений за какой-либо характеристикой речного стока разделяется на группы, сходные по гидрологическим и метеорологическим условиям (Chow, 1964, с. 8-37). Для выполнения анализа пространственной неоднородности данных наблюдений необходимо знать, как различные физико-географические условия могут влиять на значения рассматриваемой характеристики. Для установления надежных региональных соотношений на выделенных однородных участках должно быть достаточное количество пунктов наблюдений (WMO, 1972, п. III-3.3). Некоторые наиболее часто применяемые методы для оценки временной и пространственной однородности данных наблюдений, а также статистические методы, используемые в гидрологии, описаны в работе Евджевича (Yevjevich, 1972a).

И гидрологические, и метеорологические данные обычно в той или иной степени связаны в пространстве и во времени. Существование пространственной корреляции приводит к сужению доверительных интервалов, на которых основаны критерии оценки однородности, причем это сужение не учитывается в теоретических распределениях вероятностей выборочных погрешностей. Наоборот, наличие внутрирядной корреляции (например, в рядах речного стока) приводит к расширению доверительных интервалов, связанных с критериями оценки однородности (Рождественский, 1974, с. 184—226; Yevjevich, 1972b, с. 246—247).

4.1.3. Статистические параметры

При наличии длинных рядов гидрометеорологических наблюдений можно использовать методы статистического анализа и аналитических функций распределения вероятностей. Широкое распространение в практике гидрологических расчетов получили следующие распределения вероятностей: распределение Пирсона типа

---

[1] В СССР более распространенными приемами являются оценка однородности эмпирических параметров распределений, полученных в разных пунктах наблюдений, с помощью двухвыборочных критериев сравнения (Рождественский, 1974), а также оценка однородности совокупности эмпирических распределений (Алексеев Г. А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 363 с.). — *Прим. ред.*

III (биномиальный закон), трехпараметрическое гамма-распределение С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, логарифмически-нормальное распределение, распределение Гумбеля, экспоненциальное распределение, семейство кривых Джонсона и др. (Socolov, 1976, гл. 2; Klemes, 1973, с. 13—20). Параметры распределений (например, среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации) оценивают по данным наблюдений (Картвелишвили, 1967) и подвергают региональному анализу (HEC[1], 1972, гл. 4; Рождественский, 1974, с. 21—147; Гидрометеоиздат, 1972, с. 4—8; Гидрометеоиздат, 1973, с. 9—16, 29—32).

Из-за ограниченности гидрометрических данных эмпирические оценки параметров выбранного распределения вероятностей, как известно, имеют случайные погрешности, которые необходимо учитывать при картографировании параметров и при выводе уравнений множественной линейной регрессии для неизученных и малоизученных рек (Рождественский, 1977, с. 83—137; Heras, 1972).

4.1.4. Картографирование гидрометеорологических данных

Построение карт различных гидрометеорологических характеристик — удобный способ компактного представления информации. Кроме того, картографическое представление гидрометеорологической информации облегчает понимание ее неспециалистам. В «Атласе гидрологических карт» (Unesco/WMO, 1977) приведены примеры построения карт метеорологических величин, характеристик поверхностных и подземных вод.

При составлении карты необходимо сначала определить ее основную цель и назначение, а затем строить карту таким образом, чтобы нужная информация легко воспринималась. При подготовке карты какого-либо района с представлением нескольких характеристик их надо рассчитать за одинаковый период наблюдений, чтобы сравнение имело смысл. Картографирование гидрологических и метеорологических характеристик требует рассмотрения рельефа местности, геологического строения и атмосферных явлений. Кроме зональных, необходимо учитывать и местные факторы, такие, как замкнутые недренируемые понижения, густота речной сети, уклон водосбора, площадь дренирования, карстовые явления, условия подстилающей поверхности и т. д. Влияние местных факторов на характеристики речного стока имеет тенденцию к уменьшению с увеличением дренируемой площади. Если площадь водосбора превышает некоторое значение, то изменения характеристик речного стока в пространстве отражают главным образом географическую зональность и слабо зависят от местных факторов. Метеорологические элементы обычно менее зависят от зональных факторов и условий подстилающей поверхности, чем

---

[1] Сокращение HEC используется и далее по тексту для краткого указания ссылки на работы Гидрологического инженерного центра Военной группы инженеров США.

гидрологические характеристики и их параметры (Рождественский, 1974).

Построение карт изолиний гидрологических и метеорологических данных или каких-либо статистических параметров, оцененных по этим данным, является распространенным способом представления информации. Несмотря на то что проведение изолиний может показаться несложным, оно требует определенной тщательности, особенно при невысокой плотности точек измерения и (или) резком изменении геологических и климатических условий. При построении карт изолиний гидрометеорологических характеристик сглаженные кривые необходимо проводить с учетом эмпирических погрешностей данных измерений каждого пункта наблюдений. Недостаточно сглаженные кривые могут указывать на региональную изменчивость какой-либо характеристики, хотя на самом деле резкие перегибы изолинии обусловлены случайными флюктуациями измеряемой величины (WMO, 1974, с. 55, 5.34; Unesco/WMO, 1977, с. 198—199).

Метод представления информации по квадратам сетки обеспечивает возможность для накопления, обработки и поиска информации с помощью ЭВМ. Этот способ заключается в разделении исследуемой площади на одинаковые квадраты с шагом сетки, обычно равным 1 или 10 км. Затем для каждого квадрата определяют различные характеристики. Этот способ применяется для обработки на ЭВМ данных по осадкам, температуре, стоку и некоторых характеристик водосборов (WMO, 1972, п. III-2.1).

4.1.5. Регрессионный анализ

Для определения гидрологических переменных довольно часто можно использовать установленные связи с климатическими и гидрографическими характеристиками. Применимость для расчета гидрологической переменной полученного уравнения связи будет определяться погрешностью расчета по уравнению (обычно средним квадратическим отклонением оценки). Графическое представление этих, чаще всего многофакторных зависимостей довольно сложно. Поэтому для того чтобы описать связь между гидрологическими характеристиками и обусловливающими факторами, обычно применяется метод множественной линейной регрессии (Chow, 1964, п. 8—11; HEC, 1972, гл. 4; Рождественский, 1974, с. 318—347). При нелинейной зависимости между гидрологическими характеристиками и обусловливающими факторами ее выравнивают с помощью соответствующих преобразований. Во многих случаях оказывается достаточным логарифмическое преобразование анализируемых переменных.

Соотношения, устанавливаемые методом множественной линейной регрессии, могут использоваться для приведения коротких гидрологических рядов к более длинному расчетному периоду, пространственной интерполяции гидрологических характеристик, определения статистических параметров речного стока и установле-

ния связи между стоком и обусловливающими его факторами (Рождественский, 1974, с. 338—347; WMO, 1974, с. 5.53—5.55).

Трудности, возникающие при использовании метода множественной линейной регрессии, заключаются в оценках устойчивости полученных уравнений и надежности регрессионных коэффициентов. Опыт применения уравнений множественной линейной регрессии показывает, что использование большого числа так называемых независимых переменных приводит, как правило, к неустойчивости коэффициентов. Число независимых переменных в подавляющем большинстве случаев не должно быть больше трех—четырех, так как его дальнейшее увеличение делает систему уравнений неустойчивой при определении регрессионных коэффициентов, что может приводить к большим случайным погрешностям при вычислении этих коэффициентов. Выбирать независимые переменные и использовать уравнения, полученные методом множественной линейной регрессии, следует с большой тщательностью. Независимые переменные в окончательных уравнениях должны иметь известные физические связи с зависимой переменной. Вычисленные регрессионные коэффициенты должны иметь правильный знак, например, увеличение количества осадков будет вызывать увеличение стока. Однако необязательно изменение одной независимой переменной может сказаться на изменении зависимой переменной, потому что важную роль играет взаимная корреляция используемых переменных, которую следует учитывать. Кроме того, полученные уравнения не следует применять со значениями, выходящими за пределы изменения использованных в регрессионном анализе данных. Представляется полезным обсудить с другими специалистами достоверность установленных связей или проверить надежность построенных уравнений на каждой половине исходных рядов.

Численные расчеты для решения уравнений множественной линейной регрессии выполняются обычно на ЭВМ. Большинство программ автоматически отбирает наиболее эффективные независимые переменные на основании оценки их вклада в значение полного коэффициента множественной корреляции. Методы регрессионного анализа описаны в ряде работ (HEC, 1964, п. 8—11; HEC, 1972. гл. 4).

4.1.6. Воднобалансовые соотношения

Воднобалансовые соотношения можно обобщить для всей исследуемой территории. Выбор интервалов во времени и в пространстве для осреднения элементов, входящих в уравнение водного баланса, зависит от степени гидрометеорологической изученности исследуемого района, а также от точности и надежности методов расчета элементов водного баланса на водосборах с недостаточными данными наблюдений. Основная трудность, возникающая при расчетах воднобалансовых уравнений, заключается в оценке точности каждой из составляющих и всего уравнения в целом. Без

такой оценки применение этого метода в региональном анализе гидрологической информации не дает надежных результатов (Unesco/WMO, 1977, с. 35; Sokolov, 1974).

4.1.7. Применение регрессионного анализа при недостаточности данных наблюдений

Сведения о речном стоке на некоторых постах имеются за очень непродолжительные периоды наблюдений; эмпирические оценки параметров различных характеристик гидрологического режима, полученные по коротким рядам наблюдений, могут иметь большие случайные погрешности. Для уточнения оценок параметров можно использовать корреляционную связь данных наблюдений за короткий период с данными других постов, полученными за достаточно длинный период. Обычно корреляционная связь существует между данными наблюдений постов, расположенных в районах со сходными условиями формирования стока.

Если ряд наблюдений содержит несколько пропусков, то они могут быть восстановлены по уравнениям регрессии с данными наблюдений поста без пропусков. Однако восстановление большого числа пропущенных значений нежелательно, так как может приводить к уменьшению оценки вариации на посту с коротким периодом наблюдений. Построенные уравнения регрессионной связи могут использоваться для уточнения средних значений и средних квадратических отклонений различных характеристик гидрологического режима, определяемых на постах с недостаточно длинным периодом наблюдений (WMO, 1974, с. 5.53—5.55).

При региональном анализе характеристики, рассчитанные по коротким рядам наблюдений, должны иметь соответствующие весовые коэффициенты. Весовой коэффициент для каждой характеристики обычно принимается пропорциональным объему данных, по которым она рассчитана, или обратно пропорциональным средней квадратической погрешности расчета.

Список литературы

Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Гидрометеоиздат. 1972. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72. — Л.: Гидрометеоиздат. — 18 с. В-68.

Гидрометеоиздат. 1973. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 111 с. В-68.

Heras R. 1972. Manual de hidrologia. — Madrid, Escuela de Hidrologia, Instituto de Hidrologia. B-19 [1].

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, 1972. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 2. Hydrologic data management. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758905). B-32, B-52 [2].

[1] Распродана. Планируется новое издание (ориентировочная цена 100 ам. долл.)

[2] Основное издание на английском языке.

IAHS/WMO. 1974. Effects of man on the interface of the hydrological cycle with the physical environment. — Proceedings of the Paris Symposium. Amsterdam. IAHS Publication, 113. A-4 [1].
Картвелишвили Н. А. 1967. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 292 с. B-68.
Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational hydrology report, N 4. WMO, N 356, Geneva. A-10 [2].
Рождественский А. В. 1977. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 272 с. B-68.
Рождественский А. В., Чеботарев А. И. 1974. Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 423 с. B-68.
Sokolov A. A., Chapman T. G. 1974. Methods for water balance computations. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 17). A-7 [3].
Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. — 296 p. (Studies and reports in hydrology, 22). A-7.
Unesco/WMO. 1977. Hydrological maps. A contribution to the international hydrological decade. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 20). A-7 [3].
WMO. 1972. Casebook on hydrological network design practice. — WMO, N 324. Geneva. A-10 [2].
WMO. 1974. Guide to hydrological practice. 3d ed. — WMO, N 168. A-10 [4].
Yevjevich V. 1972a. Probability and statistics in hydrology. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.
Yevjevich V. 1972b. Stochastic processes in hydrology. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.

4.2. Определение естественного стока

4.2.1. Введение

Термин «естественный сток» имеет несколько значений. В строгом смысле для определения запасов или количества воды в бассейне это понятие может относиться к среднему суточному, среднему месячному и среднему годовому стоку, измеряемому на посту или проходящему через какое-либо сечение реки, если водосбор, формирующий этот сток, находится в неизменном, или естественном, состоянии. Так как это условие выполняется сравнительно редко, то менее строго понятие «естественный сток» относят к наблюдаемому стоку воды, который может быть использован для коммунально-бытового, промышленного или сельскохозяйственного водоснабжения или межбассейновых переброс стока. Это второе определение употребляется чаще и обычно имеется в виду, когда обсуждаются вопросы, касающиеся запасов воды для водоснабжения, законодательства водопользования, и при необходимых для решения этих вопросов исследованиях. Третье значение поня-

---

[1] Заказы направляйте в МАГН (Франция).
[2] Распродана, возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.
[3] Распродана. Возможно, имеется в библиотеках.
[4] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

тия «естественный сток» связано с регулированием паводков и относится к условиям стока до строительства регулирующего сооружения, а также к значениям стока, который мог бы сформироваться в результате выдающихся ливневых осадков до начала строительства каких-либо водохозяйственных сооружений: водохранилищ, дамб, каналов и т. п. Ниже описываются методы определения естественного стока, связанные с последними двумя значениями этого термина.

4.2.2. Сбор данных наблюдений

Прежде чем приступить к какому-либо исследованию по определению количества воды, необходимо собрать сведения об условиях водосбора, данные по стоку и использованию воды на хозяйственные нужды как выше, так и ниже по течению реки от места планируемого водохозяйственного мероприятия (Chow, 1964, п. 26; Linsley, 1972, гл. 21; Linsley, 1975, гл. 4; Bureau of Reclamation, 1977, гл. 1, § 10 WMO, 1958, § 5; HEC, 1977, гл. 3; Грушевский, 1969). Источниками для сбора сведений могут быть ежегодники, водный кадастр и публикации местных гидрологических учреждений, а также неопубликованные данные проектных организаций. Часто на участках, на которых планируются какие-либо водохозяйственные мероприятия, отсутствуют данные непосредственных наблюдений. В этом случае необходим перенос данных, собранных на соседних водосборах, на неизученные участки. Для этого необходимо изучение корреляционных связей речного стока с такими физико-географическими факторами, как форма и размеры водосбора, его высотные отметки и уклоны, а также с климатическими факторами, например, с температурой воздуха, количеством твердых и жидких осадков. Используемые методы регрессионного анализа рассмотрены в п. 4.1.

Часто возникает необходимость восстановить пропуски в наблюдениях, привести данные к расчетному периоду наблюдений, который включает экстремальные расходы максимального и минимального стока и является репрезентативным для оценки параметров. Для этих целей используются методы корреляционного статистического анализа (WMO, 1975, с. 5.5; Гидрометеоиздат, 1973, с. 338—348). Для составления водного баланса и при расчетах его составляющих необходимы сведения по учету водопотребления и водопользования, оценки изменений запасов воды в водоемах и потерь на испарение с водной поверхности.

В некоторых странах водопотребление нельзя сократить без предварительного согласия и соответствующего финансового расчета с землепользователями. Во многих районах мира существует законодательство, регулирующее водопользование и определяющее порядок использования поверхностных водных ресурсов (Chow, 1964, § 27; Linsley, 1972, гл. 6). В некоторых случаях регламентирующие правила распространяются на взаимодействие поверхностных и подземных вод. Цель данного обсуждения заключается не

в раскрытии всех сложностей этого законодательства, а лишь в констатации того, что при гидрологических расчетах необходимо знать о соответствующей юридической ответственности при рассмотрении вопросов, связанных с изменением режима речного стока. При расчете экономической эффективности проектируемых водохозяйственных мероприятий необходимо тщательно определить тот уровень, который называется естественным стоком, или предпроектным стоком. Необходимо доказать, что рассчитанная экономическая эффективность от попусков воды из водохранилища действительно обусловлена стоком воды, которого не существовало бы без создания водохранилища. Точно так же, если сбросы воды из водохранилища уменьшаются в периоды паводков и половодий (т. е. в периоды аккумуляции воды), то необходимое обоснование для определения экономической эффективности получается при сравнении с естественным стоком (Нежиховский, 1971; Грушевский, 1969; Железняк, 1965).

4.2.3. Связь между осадками и стоком

В некоторых районах земного шара данные наблюдений за речным стоком очень ограничены, а объем сведений об осадках более значителен. По имеющимся данным об осадках можно выполнить региональное обобщение сезонных и годовых осадков и построить карты осадков. Корреляционные связи месячных и годовых сумм осадков с речным стоком, устанавливаемые по имеющимся данным наблюдений за стоком, позволяют во многих случаях получить более надежную оценку максимальных значений стока по сравнению с оценкой только по данным наблюдений (WMO, 1974, гл. 5.3, 5.5). Обычно существует некоторая корреляционная связанность между стоком смежных лет или последовательных месяцев (временная корреляция), которая должна учитывать в оценках, получаемых по осадкам. Как правило, для оценки стока используются такие характеристики, как толщина снежного покрова и температура воздуха (WMO, 1974, гл. 6.4). Модели «осадки—сток» рассматриваются более подробно в п. 4.5 и в приложении к главе 4.

4.2.4. Расчет трансформации стока в водохранилище

Обычно при проектировании водохранилищ для водоснабжения, рекреации и производства гидроэлектроэнергии необходимы водобалансовые исследования (часто называемые расчетом трансформации стока в водохранилище) в критические периоды межени для количественной оценки последствий функционирования разработанной системы правил управления работой водохранилища, а также для уточнения оценки естественного стока при проектировании сооружений (Linsley, 1972, гл. 7; HEC, 1975, гл. 6; Klemes, 1973, гл. 3; Heras, 1976, с. 51—70). Во многих странах частными и государственными фирмами разработаны различные программы расчета, например программы HEC-3 (HEC, 1977) и HEC-5 (HEC,

1979) для анализа работы водохранилищ по специальным правилам их эксплуатации, для обеспечения запросов на воду. Некоторые из этих обобщенных моделей включают блоки для оценки экономической эффективности и анализа системы водохранилищ многоцелевого назначения. Такие исследования для проектируемого сооружения часто выполняются за месячные интервалы времени, но при гидроэнергетических расчетах могут потребоваться недельные и суточные интервалы времени в критические периоды межени. Подробный анализ можно проводить за отдельные периоды времени, например, за период от 2 до 20 лет с критически низким стоком или за полный период наблюдений, а также по искусственно моделируемым рядам. Однако основанием для оценки экономической эффективности должно быть улучшение, которое вносится в результате работы проектируемого сооружения в естественные или предпроектные условия (Шикломанов, 1979, с. 7—82, 264—285).

4.2.5. Расчет трансформации паводочного стока в руслах

В некоторых особых случаях проектирования мероприятий по регулированию паводочного стока основанием для расчета экономического эффекта являются максимальные уровни либо расходы, или система наблюденных либо моделируемых гидрографов, а не значения среднего месячного или среднего годового стока. Это объясняется тем, что причиняемый ущерб прямо пропорционален высоте стояния уровней воды в периоды паводков и половодий. Иногда в качестве параметров для оценки возможного ущерба или экономического эффекта в связи со снижением материального ущерба используется определенный сезон года и длительность паводочного периода. Для выполнения таких оценок предпроектного, или естественного, максимального паводочного стока на опасных участках, расположенных ниже сооружаемого объекта, используются различные методы, от самого простого осреднения за короткие интервалы времени и анализа добегания паводочной волны до сложных расчетов с применением уравнения неустановившегося одномерного или двумерного потоков. При проектировании водохранилищ за каждый интервал времени разница в притоке и сбросах из водохранилища (изменение в накоплении воды) рассчитывается по данным измерений и известным сбросам и оттоку воды (Кучмент, 1972). Если применение метода расчета линейной трансформации стока в руслах, подобного методу Маскингема (Muskingum) (Linsley, 1975, § 9—8), или метода Калинина и Милюкова (WMO, 1974, с. 5.63), обосновано, то изменения накоплений воды в водохранилище (выраженные в единицах расхода) можно определить для каждого опасного участка в нижнем бьефе и добавить к наблюдаемым или вычисленным расходам за соответствующие интервалы времени для определения максимальных расходов в естественных условиях (Chow, 1974, § 25—11; Linsley, 1975, гл. 9; Chow, 1974, с. 5—61—5.64; HEC, 1979). Затем максимальные расходы можно перевести в уровни или отметки местности и свя-

зать с размерами ущерба для определения его относительного значения при сравнении условий до и после осуществления проектируемых мероприятий. После проведения таких анализов для нескольких наблюдаемых и (или) предполагаемых случаев, охватывающих достаточно широкий диапазон, можно построить кривую редукции расхода для каждого показательного участка, для которого определяли кривые обеспеченности расходов или уровней в предпроектных и проектных условиях. Эти две переменные на кривой представляют максимальный расход в предпроектных и проектных условиях. Кривые редукции позволяют модифицировать кривые обеспеченности расходов или уровней для соответствующих предпроектных или проектных условий и оценивать средний многолетний годовой ущерб. Некоторые программы включают процедуры выполнения таких расчетов и оценок возможного ущерба (HEC, 1979; Кучмент, 1972; Шикломанов, 1979).

В тех случаях, когда характеристика русла и поймы не позволяет применить ни один из методов расчета линейной трансформации, следует использовать какой-либо метод расчета нелинейной трансформации. Они включают: а) модифицированный метод Пальса (Puls); б) расчет накопления воды, реализованный в модели SSARR (WMO, 1974, с. 5.63); в) предельный индекс накопления от модуля расхода (Chow, 1964, 25-II); г) «гидравлические» методы неустановившегося потока (Linsley, 1975, § 9—2; Розенберг, 1972). Первые три метода расчета нелинейной трансформации усложняются необходимостью определения местных расходов воды. Местный сток необходимо суммировать с рассчитанными расходами воды, поступающей из водохранилища, в створе каждого притока, прежде чем приступить к расчетам трансформации стока, так как время добегания и затухания зависит от суммарного расхода. Определить линейность или нелинейность трансформации стока в зависимости от различных расходных характеристик русла можно по наблюдаемым паводкам, а также по рассчитанным профилям водной поверхности при различных расходах (Linsley, 1975, с. 295—297).

4.2.6. Графические и регрессионные методы

Во многих странах для предварительных оценок естественного стока и исследований на стадиях регионального планирования применяются графические методы и регрессионный анализ (Шикломанов, 1979, с. 47—82), которые включают: а) интегральные и двойные интегральные кривые; разностные интегральные кривые; б) метод аналогий; в) множественную корреляцию стока со стокоформирующими факторами; г) физико-математическое моделирование речного стока.

Методы анализа на основе интегральных кривых рассматриваются в п. 4.1.2. На интегральных кривых годовых или сезонных расходов воды, построенных за весь период наблюдений, любая точка перегиба показывает год возможного изменения гидрологи-

ческого режима. Количественно это изменение определяется по отклонению построенной кривой от экстраполированного хода кривой до точки перегиба. Необходимо приобрести некоторый опыт работы с интегральными кривыми, который позволяет устанавливать явное изменение в характеристиках речного стока. Метод двойных интегральных кривых аналогичен методу интегральных кривых, но по этому методу последовательно просуммированные значения стока исследуемого бассейна сопоставляются с последовательными суммами, отложенными по оси абсцисс, такой же характеристики стока для другого бассейна с неизменным гидрологическим режимом (WMO, 1974, с. 5.48—5.49). Анализ с помощью разностных интегральных кривых аналогичен методу интегральных кривых и применяется для выявления изменений в гидрологическом режиме, происходящих в результате хозяйственных мероприятий в руслах рек.

По методу аналогии, или парной корреляции, устанавливается связь между стоком двух гидрологически сходных бассейнов, в одном из которых не происходило никаких нарушений или изменений физико-географических и гидрологических условий.

Метод множественной корреляции является развитием метода парной корреляции. При применении этого метода используются несколько бассейнов, чаще всего устанавливаются коррелятивные связи стока с различными характеристиками водосборов, такими, как годовые или сезонные осадки, площадь водосбора, процент урбанизированных территорий, залесенность, тип почв, озерность, уклон, толщина снежного покрова, температура воздуха и т. п. (см. п. 4.1.5 и работу Чоу (Chow, 1964, § 8—11)).

Методы физико-математического моделирования основаны на использовании основных закономерностей тепловлагопереноса, поверхностного и подземного стекания, эвапотранспирации, инфильтрации и т. п. Однако разработка надежных моделей весьма затруднительна из-за сложного характера гидрологического режима, не говоря о тех изменениях, которые вносятся хозяйственной деятельностью при строительстве водохранилищ, спрямлении русел, осушительной и оросительной сети (WMO, 1974, с. 5.94—5.95).

Список литературы

Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior. 1977. Design of small dambs. — Washington D. C., U. S. Govt. Printing Office. B-57 [1].

Chow Ven Te. (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Гидрометеоиздат. 1972. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72. — Л.: Гидрометеоиздат. — 18 с. В-68.

Грушевский М. С. 1969. Волны попусков и паводков в реках. — Л.: Гидрометеоиздат. — 336 с. В-68.

Heras R. 1976. Hidrologia y recursos hidraulicos. Direction general de obras hidraulicas. — Madrid, Centros de Estudios Hidrograficos (2 vols.). B-19 [2].

[1] Основное издание на английском языке.

[2] Цена двух томов 50 долл.

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1972. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 2. Hydrologic data management. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758905). B-32, B-52 [1].
Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1975. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 8. Reservoir yield. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NITS Order, N A007107). B-32, B-52 [1].
HEC, USACE. 1977. Hydrologic engineering methods for water resources management. Vol. 9. Reservoir system analysis for conservation. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NITS Order, N A052599). B-32, B-52 [1].
HEC. 1979. HEC-5, Simulation of flood control and conserwation systems, users manual. — California. B-52 [1].
Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10 [2].
Кучмент Л. С. 1972. Математическое моделирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 191 с. В-68.
Linsley Ray K., Franzini Joseph B. 1972. Water resources engineering. 2d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Linsley R. K., Jr., Kohler M. A., Paulhus L. H. 1975. Hydrology for engineers. 2d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27 [1].
Нежиховский Р. Е. 1971. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. — Л.: Гидрометеоиздат. — 474 с. В-68.
Розенберг Л. Д., Грушевский М. С. 1972. Возможности распластывания волн половодья в реках с деформирующимся руслом (на примере Аму-Дарьи). — Труды ГГИ, т. 190, с. 211—218. В-68.
Шикломанов И. А. 1979. Антропогенные изменения водности рек. — Л.: Гидрометеоиздат. — 302 с. В-68.
WMO. 1958. Techniques for surveying surface-water resources. — T. N., N 26. WMO, N 82. TR. 32. Geneva. A-10 [3].
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d ed. — WMO, N 168. A-10 [4].
Железняк И. А. 1965. Регулирование паводочного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 326 с. В-68.

4.3. Методы оценки изменчивости годового стока и характеристик гидрологического режима

4.3.1. Введение

Для описания среднего количества воды, которое может ожидаться в реке или потоке за какой-либо период времени, используется среднее значение расхода воды. Вследствие случайности формирующих факторов (осадки) расход имеет тенденцию к изменению во времени, но в пределах небольших отрезков времени (менее месяца) он сохраняет некоторое постоянное значение. Для рационального и надежного планирования водохозяйственных объектов важно знать степень изменчивости речного стока. Средний годовой расход определяет потенциальные запасы воды, а изменение стока внутри года или за многолетний период дает сведения,

---

[1] Основное издание на английском языке.
[2] Распродана, возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.
[3] Распродана, обращайтесь в библиотеки.
[4] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

которые используются для определения вероятности дефицитов воды в естественных условиях и объемов накопления воды, необходимых для их покрытия. В случае отсутствия или недостаточности данных наблюдений за стоком вблизи места проектирования следует использовать методы регионального анализа (см. п. 4.1).

4.3.2. Изменчивость речного стока

Изменчивость стока может быть охарактеризована тремя группами показателей: а) показатели, основанные на порядковых статистиках; б) показатели, полученные по разности выборочных значений; в) показатели, связанные со статистическими моментами. В гидрологических расчетах показатели первых двух групп обычно не применяются.

4.3.2.1. Изменчивость годового стока. Для характеристики изменчивости речного стока обычно используются среднее квадратическое отклонение, равное положительному значению корня квадратного из дисперсии, и коэффициент вариации.

Среднее квадратическое отклонение имеет ту же размерность, что и сток, поэтому для сравнения изменчивости годового стока рек с различной площадью водосбора следует использовать безразмерную величину — коэффициент вариации. Такую же возможность дает сравнение средних квадратических отклонений логарифмов значений стока.

Точность оценок среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации по ряду наблюдений за стоком длиной n лет может определяться методами, описанными в работе Евджевича (Yevjevich, 1972, гл. 9) и Рождественского (1977, гл. 4). Точность эмпирических оценок параметров и квантилей распределения вероятностей зависит от внутрирядной корреляции годового стока (коэффициент корреляции между стоком смежных лет).

4.3.2.2. Изменчивость характеристик гидрологического режима. Сток в течение года может быть представлен значениями стока за отдельные сезоны или периоды года, например за лето, какой-либо месяц или день. Сток по календарным месяцам обычно репрезентативно отражает внутригодовое распределение стока. Изменчивость среднего месячного стока рассчитывается таким же образом, как и среднего годового. При группировании отдельных месяцев может существовать большое количество оценок в зависимости от того, на какие группы разделен год. Характеристика изменчивости среднего суточного стока не находит широкого применения, хотя и используется в региональных исследованиях (Chow, 1964, с. 14—43). При определении потенциальных запасов воды в реке, отвечающих каким-либо специальным требованиям, более целесообразно применение распределения средних суточных расходов воды (см. п. 4.3.4).

4.3.3. Построение кривых распределения вероятностей речного стока

Аппроксимация эмпирических данных по стоку теоретическим распределением дает возможность судить о вероятности появления или превышения рассматриваемого значения стока. Расчет вероятностных, или обеспеченных, значений стока имеет большое значение для рационального планирования водохозяйственных мероприятий. Выбор соответствующего теоретического распределения вероятностей основан на практическом опыте (Brunet-Moret, 1969). Маркович (Marcovic, 1965) показал по данным наблюдений на 446 гидрологических станциях США, что распределения годового стока хорошо аппроксимируются гауссовым, логарифмически-нормальным и гамма-распределениями. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель (Блохинов, 1974, гл. 1; Рождественский, 1974, гл. 2) успешно применяли трехпараметрическое гамма-распределение и распределение Пирсона III типа для описания распределения вероятностей речного стока.

Несмотря на то что распределение Гаусса получило широкое распространение, его применение для аппроксимации распределений речного стока встречает некоторые теоретические затруднения из-за того, что оно допускает значения, меньшие нуля. Кроме того, подбираемые теоретические распределения для описания эмпирических распределений речного стока должны обладать асимметрией, так как рядам речного стока свойственна асимметричность распределения вероятностей. На практике предпочтение отдается распределениям типа логарифмически-нормального и гамма-распределениям.

Для установления соответствия теоретического распределения эмпирическим данным разработаны различные методы. К их числу относятся графический метод, метод моментов, квантилей, секстилей, метод наибольшего правдоподобия и метод построения гистограмм частот (Рождественский, 1974, с. 35—51, 264—277; NERC, 1975, гл. 1).

4.3.3.1. Графический метод. Графический метод подбора теоретического распределения заключается в построении на глаз сглаженной кривой по эмпирическим точкам, нанесенным на клетчатку вероятностей. Такая кривая является чисто эмпирической, и, следовательно, тип функции распределения вероятностей ее остается неизвестным. Экстраполяция построенной таким образом кривой в область экстремальных вероятностей может приводить к большим погрешностям при определении расчетных значений. При таком проведении сглаженных кривых может быть также занижено влияние отклоняющихся точек в верхней и нижней частях кривой. Графический метод является хорошим способом проверки соответствия одного из предполагаемых теоретических распределений эмпирическим данным. Для этих целей используется вероятностная клетчатка с линейным по оси ординат масштабом. Если построенные эмпирические точки располагаются по прямой линии или близко

к ней, то считается, что эмпирическое распределение соответствует выбранному теоретическому. Описание графического метода можно найти в работах Евджевича (Yevjevich, 1972, гл. 5), Андреянова (1975, с. 14), Климеса (Klemes, 1973, с. 16), Чоу (Chow, 1964, § 8—1), Соколова (Sokolov, 1976, гл. 2), Рождественского (1974, гл. 3) и Гераса (Heras, 1972).

4.3.3.2. Метод моментов. При использовании этого метода тип функции распределения вероятностей предполагается известным. Оценка параметров распределения осуществляется по многолетним рядам данных наблюдений. Двухпараметрические распределения требуют определения среднего арифметического значения ряда и среднего квадратического отклонения, для некоторых трехпараметрических распределений кроме указанных двух параметров требуется также оценка коэффициента асимметрии. Оценки параметров и выбранный тип функции распределения используются затем для определения значений стока расчетной обеспеченности. В ряде работ (Klemes, 1973, с. 15—20; Chow, 1964, § 8-1; Sokolov, 1976, гл. 2; Блохинов, 1974, гл. 2) рассматриваются вопросы подбора теоретических распределений к эмпирическим данным с использованием метода моментов. Методы определения случайных и систематических погрешностей оценок параметров распределений при различных объемах эмпирических данных рассматриваются в работах Рождественского (1977, гл. 3 и 4; 1974).

4.3.3.3. Метод наибольшего правдоподобия. Оценка параметров распределения вероятностей, выбранного для описания эмпирических данных, может быть выполнена также методом наибольшего правдоподобия. Несмотря на то что он дает наиболее эффективные оценки, его практическое применение довольно трудоемко (Chow, 1964, с. 8—31; Блохинов, 1974, гл. 3 и 4; Рождественский, 1974, с. 265—270; Гидрометеоиздат, 1972, с. 4—5).

4.3.3.4. Другие методы. Для подбора теоретического распределения к эмпирическим данным может быть использован также метод наименьших квадратов. Этот метод позволяет оценить также стандартные параметры (Klemes, 1973, с. 16; Chow, 1964, с. 8—31).

Метод квантилей, разработанный Г. А. Алексеевым, объединяет графический и аналитический методы. Описание метода квантилей дается в ряде работ (Klemes, 1973, с. 16; Sokolov, 1976, с. 59—62; Гидрометеоиздат, 1972, с. 59—62; Гидрометеоиздат, 1972, гл. 2). Метод секстилей применяется для оценки параметров кривых, отвечающих распределению типа Фишера — Типпета (WMO, 1969, гл. 6). Ван дер Маде для этих же целей использовал метод средневзвешенных значений (Van der Made, 1969, т. 1, с. 152—164).

4.3.4. Применение кривых вероятностей к изучению внутригодового распределения речного стока

Анализ годового стока не дает исчерпывающего ответа на вопросы, связанные с управлением водными ресурсами, потому что большая часть стока может проходить в какой-либо сезон. Основ-

ным показателем распределения стока внутри года является распределение средних месячных и средних суточных расходов. Они используются для определения изменений стока по сезонам внутри года.

4.3.4.1. Кривые распределения средних месячных расходов. Все описанные методы, применяемые для установления распределений вероятностей годового стока, можно использовать также для подбора распределений средних месячных расходов. Вполне вероятно, что эмпирические распределения средних месячных расходов будут иметь различные типы теоретических кривых распределения вероятностей. После того как установлены распределения расходов для каждого месяца года, они могут быть использованы для построения графиков расходов определенной обеспеченности, на которых точки равных вероятностей соединены между собой. По этим графикам можно осуществлять сравнение распределений за какой-либо год с распределениями средних месячных расходов (Klemes, 1973, с. 27—28).

4.3.4.2. Кривые распределения средних суточных расходов. Распределение средних суточных расходов характеризуется кривой продолжительности стояния расходов определенного значения. Для построения этой кривой суточные расходы за период наблюдений располагаются в убывающем порядке, и весь ряд от минимального до максимального значений разбивается на соответствующие интервалы, в каждом из которых подсчитывается число случаев попадания суточных расходов определенного значения. Затем строится кривая распределения по накопленной сумме частот в каждом интервале (Klemes, 1973, с. 29; Chow, 1964, с. 14—42 до 14—44).

Основное применение эта кривая находит при определении естественного стока для нужд гидроэнергетики, навигации, водоснабжения и сброса загрязнителей. Можно отметить, что кривые продолжительности суточных расходов являются необходимым дополнением при изучении многолетней и сезонной изменчивости речного стока.

4.3.5. Отсутствие данных наблюдений

В случае отсутствия или недостаточности данных наблюдений для оценки параметров распределения годового стока и характеристики гидрологического режима необходимо применять соответствующие методы аналогии с ближайшими гидрологически изученными участками. В этих случаях могут оказаться полезными результаты регионального анализа, выполненного для данного района, или методы, описанные в п. 4.1. Некоторые специальные методы анализа и расчета распределения расходов воды внутри года приводятся в ряде работ (Гидрометеоиздат, 1973, гл. 3; Klemes, 1973, с. 38).

Список литературы

Andrejanov V. G. 1975. Meteorological and hydrological data required in planning the development of water resources. — Operational Hydrology Report, N 5. WMO, N 419. Geneva. A-10.

Блохинов Е. Г. 1974. Распределение вероятностей величин речного стока. — М.: Наука. — 168 с. В-71.

Brunet-Moret Y. 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisees en hydrologie. — Paris, Cahiers de l'ORSTOM. (Serie Hydrologie vol. 6, n 3). B-37[1].

Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27[2].

Гидрометеоиздат, 1972. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72. — Л.: Гидрометеоиздат. — 18 с. В-68.

Гидрометеоиздат. 1973. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 111 с. В-68.

Heras R. 1972. Manual de hidrologia. — Madrid, Escuela de Hidrologia, Instituto de Hidrologia. B-19[3].

Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10[4].

Markovic R. D. 1965. Probability functions of best fit to distributions of annual precipitation and runoff. — Hydrology Paper, 8. Colorado, Colorado State University. B-8.

National Environment Research Council. 1975. Flood studies report. — London. B-29[5].

Рождественский А. В. 1977. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 272 с. В-68.

Рождественский А. В., Чеботарев А. И. 1974. Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат, — 423 с. В-68.

Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. — 296 p. (Studies and reports in hydrology, 22). A-7.

Van der Made, J. W. 1969. Assessment of a design discharge of a river. Floods and their computation. — Proceedings of the Leningrad Symposium, August 1967, vol. 1, p. 152—164. IAHS/Unesco/WMO. Unesco, Paris. (Studies and reports in hydrology, 3). A-4.

WMO. 1969. Estimation of maximum floods. T. N. 98. — WMO, N 233, T. P. 126, Geneva. A-10.

Yevjevich V. 1972. Probability and statistics in hydrology. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.

4.4. Определение кривых обеспеченности экстремальных расходов и уровней в естественных условиях и в условиях регулирования стока

4.4.1. Введение

Здесь рассматриваются методы построения кривых обеспеченности расходов в периоды паводочного и низкого стока в есте-

---

[1] В свободной продаже нет. Только по специальному заказу.

[2] Основная публикация на английском языке.

[3] Распродана. Планируется переиздание. Ориентировочная цена 100 ам. долл.

[4] Распродана, возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки. Основная публикация на английском языке.

[5] Продается по цене 40 ф. ст. плюс почтовые расходы.

ственных условиях и при регулировании стока. Обсуждаются данные фактических наблюдений, способы построения кривых обеспеченности различных характеристик речного стока для естественных условий и условий регулирования, а также кривых обеспеченности уровней воды в водохранилищах.

4.4.2. Многолетние ряды наблюдений

При статистическом анализе используются два вида данных наблюдений: ряды характерных в году величин стока и ряды обеспеченных характеристик стока. Ряды характерных величин стока состоят из фазово-однородных значений (например, наибольшее или наименьшее значение за год), которые являются особыми характеристиками стока для каждого года наблюдений (обычно гидрологического года). Характерной величиной может быть максимальный мгновенный расход за год или максимальный суточный расход за каждый январь, минимальный суточный расход за период летней межени и т. д. Ряды продолжительности какой-либо характеристики содержат число случаев, когда расход превышал рассматриваемое значение или был равен ему. Процедура выбора данных каждого вида описывается в Руководстве ВМО (WMO, 1974, с. 5.18—5.20). Для рядов низкого стока данные за весь период наблюдений выбираются по гидрологическим годам, чтобы избежать разрывов в периоды зимней межени (WMO, 1974, с. 5.65).

4.4.3. Однородность данных

При вероятностных расчетах и анализе величин речного стока предполагается, что они являются репрезентативными выборками случайных событий. В одних районах паводочный сток формируется в результате выпавших дождей или снеготаяния, в других — при совокупном действии этих двух факторов; существуют районы, где паводочный сток формируется циклоническими штормами или сильными тропическими ливнями. Учитывая возможные различия факторов, формирующих максимальные в году расходы, для получения более надежных результатов желательно рассматриваемые события разделить по формирующим факторам и анализировать отдельно, а полученные результаты объединить. Метод композиций распределений вероятностей рассматривается в работах Соколова (Sokolov, 1976, с. 31—32) и Рождественского (1974, с. 42—100).

Неоднородность стоковых рядов за период наблюдений может быть обусловлена хозяйственной деятельностью на водосборах и в руслах рек, а также естественными причинами, например лесными пожарами, землетрясениями и др. Для анализа однородности рядов наблюдений за экстремальными характеристиками речного стока необходимо применять статистические методы количественных оценок (Sokolov, 1976, с. 77—84; Рождественский,

1974, с. 184—225). Приведение рядов к однородным выборкам связано со значительным объемом работ.

4.4.4. Кривые обеспеченности расходов

Для построения кривых обеспеченности могут применяться два метода — графический и аналитический. Графическим методом можно аппроксимировать практически любую совокупность данных, тогда как аналитический подход основан на определении пригодности выбранного статистического распределения для аппроксимации рассматриваемой совокупности эмпирических данных. Аналитическую кривую распределения всегда необходимо сравнивать с эмпирическим распределением, чтобы убедиться, что выбранное теоретическое распределение приемлемо для описания распределения данной совокупности. Для условий регулирования стока аналитический метод обычно не применяется, так как распределения расходов при этом не соответствуют ни одному из стандартных теоретических распределений вероятности.

Графический метод заключается в определении эмпирической обеспеченности для упорядоченного ряда расходов, построении эмпирического распределения на соответствующей вероятностной клетчатке, спрямляющей предполагаемое теоретическое распределение. Подробное описание этого метода можно найти во многих работах (Chow, 1964, с. 8—28; HEC, 1975, с. 4-0.1—4-0.7; Kite, 1977, гл. 2; Sokolov, 1976, с. 28—31; Рождественский, 1974, с. 55—153).

Для аппроксимации кривых обеспеченности расходов в качестве теоретических распределений применяются распределения экстремальных величин I типа (обычно называемое распределением Гумбеля), логарифмическое нормальное, Пирсона III типа, логарифмическое Пирсона III типа, экспоненциальное и иногда распределение Гудрича и нормальное распределение Гаусса (Chow, 1964; Kite, 1977; WMO, 1974; Sokolov, 1976; Рождественский, 1974; NERC, 1975; Heras, 1976. См. также п. 4.3.2. настоящего Руководства).

Методы получения кривых обеспеченности для неизученных участков в большой степени зависят от условий местности, поэтому важно для консультаций привлекать специалистов местных водохозяйственных организаций. Некоторые методы общего регионального анализа обсуждаются в п. 4.1, а также в работах (Chow, 1964; HEC, 1972; Kite, 1977; Sokolov, 1976; Klemes, 1973; Рождественский, 1974).

4.4.5. Кривые обеспеченности максимальных расходов в естественных условиях

В некоторых странах для анализа кривых обеспеченности максимальных расходов воды в естественных условиях применяются стандартные методы. Совет по водным ресурсам США опублико-

вал в 1976 г. руководство, где описывается применение распределения Пирсона III типа для анализа максимальных расходов (USWRC, 1977). Эти методы реализованы в программах для ЭВМ (USGS, 1976; HEC, 1976в). Разработаны также программы по применению распределений нормального, лог-нормального, Гумбеля и Пирсона III типа.

Национальный совет по исследованию окружающей среды Великобритании рекомендует несколько типов распределений для аппроксимации максимальных расходов весеннего половодья и дождевых паводков (NERC, 1975). В этом отчете подробно рассматриваются методы обработки данных, методы статистического анализа и расчетов, проводится сравнение результатов, получаемых различными методами, а также приводятся рекомендации по применению стандартизованных процедур для анализа осадков и снеготаяния. Методы статистического анализа и расчета максимальных расходов, применяемые в СССР, описаны в инструкциях и руководстве по определению расчетных гидрологических характеристик (Гидрометеоиздат, 1972, 1973) и в работе Соколова (1966, с. 3—54).

При применении теоретических распределений, требующих определения моментов высоких порядков, например коэффициентов асимметрии и эксцесса, необходимо использовать средние районные оценки или средневзвешенные значения этих коэффициентов, потому это эмпирические оценки, полученные по ограниченному ряду наблюдений, могут иметь значительные погрешности вычислений.

4.4.6. Кривые обеспеченности максимальных расходов в условиях регулирования стока

В тех районах, где сток существенно изменен в результате хозяйственной деятельности, кривые обеспеченности максимальных расходов следует определять графическим методом из-за невозможности подобрать во многих случаях нужное теоретическое распределение по аналитическому методу.

Обычно для анализа максимальных расходов при регулировании стока проектируемыми водохозяйственными мероприятиями требуется моделирование условий работы будущего сооружения. Методы построения кривых обеспеченности в условиях регулирования стока приводятся в работе Гидрологического инженерного центра США (HEC, 1975, гл. 7). Вычислительные программы, используемые для моделирования работы систем водохозяйственных объектов, рассматриваются в ряде работ (HEC, 1976, 1977).

Небольшие водозаборы из рек или бассейнов подземных вод, связанных с реками, а также внутрибассейновые переброски стока малых масштабов, которые слабо влияют на значение годовых расходов, но могут весьма заметно сказываться на меженных расходах.

Кривые обеспеченности накопления воды в водохранилище можно рассчитать на основании информации по низкому стоку, которая позволяет оценить поступление воды в условиях существующего и планируемого водохранилища (Гидрометеоиздат, 1972, с. 18-20—18-25).

4.4.7. Кривые обеспеченности минимального стока в естественных условиях и в условиях регулирования стока

Кривые обеспеченности минимального стока редко отвечают какому-либо теоретическому распределению вероятностей. Влияние физико-географических условий и климатических факторов часто приводит к необычной форме этих кривых, поэтому для определения кривой обеспеченности минимальных расходов обычно рекомендуется графический метод. Из-за частого появления нулевых значений расходов при использовании теоретических распределений для аппроксимации эмпирических данных может потребоваться специальная обработка исходной информации, особенно в случаях использования распределений, связанных с логарифмическими преобразованиями. В литературе освещаются различные вопросы статистического анализа и обработки данных по меженным расходам (WMO, 1974; Рождественский, 1974; Гидрометеоиздат, 1972, 1973).

Хозяйственное освоение речного водосбора может существенно затрагивать соотношения обеспеченных расходов в меженные периоды. Например, если при расчетах максимальных расходов относительно небольшим водозабором можно пренебречь, то такое же количество забираемой воды может значительно снизить, а иногда и полностью исчерпать сток реки в меженные периоды. Одним из наиболее важных вопросов в исследованиях низкого стока является оценка динамики изменений, связанных с хозяйственным освоением бассейна.

4.4.8. Определение кривых обеспеченности уровней воды рек и водохранилищ

Кривые обеспеченности уровней воды водохранилища (после наполнения или в период аккумуляции) определяются притоком, размерами водохранилища и графиком его сработки. Теоретические кривые распределения вероятностей, обычно рекомендуемые для аналитической аппроксимации эмпирических рядов по стоку, для аппроксимации кривых распределения уровней воды водохранилища не применяются и, как правило, используются графические методы (HEC, 1975, гл. 6; Sokolov, 1976, гл. 6).

Кривые обеспеченности максимальных уровней воды в реке также часто не поддаются аналитическому описанию и должны аппроксимироваться графическим методом. Особое внимание следует обращать на согласованность кривых распределения верх-

него и нижнего бьефов, так как связи уровней и расходов весьма чувствительны к условиям поступления и сброса воды. При отсутствии данных об уровнях на участке строительства рекомендуется определить кривые обеспеченности максимальных расходов и связь уровней с расходами, а затем на основании этих расчетов можно построить кривую обеспеченности уровней.

Список литературы

Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27 [1].

Гидрометеоиздат. 1972. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435—72. — Л.: Гидрометеоиздат. — 18 с. В-68.

Гидрометеоиздат. 1973. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат. — 111 с. В-68.

Heras R. 1976. Hidrologia y recursos hidraulicos. Direccion General de Obras Hidraulicas. — Madrid, Centros Estudios Hidrograficos (2 vols). B-19 [2].

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1972. Hydrological engineering methods for water resources development. Vol. 2. Hydrologic data management. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NITS Order, N AD-758905). B-32, B-52.

HEC. 1975. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 3. Hydrologic froquency analysis. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NITS Order, N A017433). B-32, B-52.

HEC. 1976a. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 7. Flood control by reservoirs. — U. S. Contribution to the Internationaf Hydrological Decade. California (NITS Order N A052598). B-32, B-52.

HEC. 1976b. Flood flow frequency analysis, users manual for computer program 723—X6—L7550. — California. B-52.

HEC. 1977. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 9. Reservoir system analysis for conservation. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NITS Order, N AO52599).

IAHS/Unesco. 1969. Floods and their computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, August 1967 (in English, in French). Vols 1, 2. — IAHS publication, n 88, 89. Unesco, Paris (Studies and reports in hydrology, 3). A-4 [3].

Kite G. W. 1977. Frequency and risk analysis. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.

Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10 [4].

National Environment Research Council. 1975. Flood studies report. — London. B-29 [5].

Рождественский А. В., Чеботарев А. И. 1974. Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 423 с. В-68.

Соколов А. А. 1966. Методика расчета максимальных расходов талых вод при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных. — Труды ГГИ, вып. 134, с. 3—54. В-68.

Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. — 269 p. (Studies and reports inhydrology, 22). A-7 [1].

---

[1] Основная из публикаций на английском языке.

[2] Цена двух томов 50 долл.

[3] Заказы направляйте в МАГН (Франция).

[4] Распродана с октября 1980 г. Возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.

[5] Продается по цене 40 брит. фунтов плюс почтовые расходы.

U. S. Geological survey. 1979. Annual flood frequency analysis using water resources council guidelines. Vol. 4. Chapter 1. Section C of Watstore Manual. Computer Program J407. — Virginia. B-56 [1].
U. S. Water Resources Council. 1977. Guidelines for determining flood flow frequency. — Washington D. C. (WRC Bull, n 17A). B-57 [2].
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d ed. WMO, N 168, Geneva. A-10 [2].

4.5. Определение расчетных максимальных расходов

4.5.1. Введение

Расчетный максимальный расход может быть представлен гидрографом дождевого паводка или весеннего половодья, или максимальным расходом воды за паводок или половодье. Расчетный максимальный расход является основной расчетной характеристикой для выбора окончательного решения при планировании и проектировании водохозяйственных мероприятий, а также при определении условий работы проектируемого сооружения. Расчетный максимальный расход может быть расходом с определенной вероятностью повторения или максимально возможным расходом, для которого период повторения не определяется. Здесь основное внимание обращается на методы определения максимального расчетного расхода воды, которые включают методы расчета вероятностей по фактическим данным наблюдений и методы с использованием искусственно моделируемых расчетных ливней.

4.5.2. Общие положения

Степень надежности проектируемого сооружения, которая во многом зависит от расчетного максимального расхода, связана также с принятием решений на основании оценки возможных последствий от превышения расчетного максимального расхода. Если разрушение сооружения будет угрожать жизни населения или приводить к большому материальному ущербу, то требуется высокая степень надежности сооружения от разрушения при наиболее суровых условиях прохождения дождевых паводков или весенних половодий, возможность которых на участке проектирования обусловлена различными причинами. Если последствия от разрушения менее опасны, то выбор степени надежности должен основываться на анализе экономической эффективности, при котором суммарные затраты (т. е. затраты на сооружение плюс затраты на повреждения) будут наименьшими. Методы для определения оптимальных расчетных вероятностей в СССР, США и Франции описаны в работе Соколова (Sokolov, 1976, гл. 1).

[1] Заказы направляйте в Вирджинское отделение ГРСША.
[2] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

Критерии, которые используются в СССР для выбора вероятности расчетного максимального расхода, приводятся в табл. 4.5-1. Категория (или класс) сооружения определяется в зависимости от его размера и опасности разрушения для районов, расположенных ниже по течению. Например, плотина, возводимая вблизи от густо населенного района или крупного промышленного центра, должна быть отнесена к сооружениям 1-го класса. В первой главе работы Соколова (1976) приводятся порядок определения класса сооружения и перечень подобных критериев, используемых в других странах.

Таблица 4.5-1

Критерии для расчета гидротехнических сооружений

Класс сооружений	Расчетная ежегодная вероятность превышения максимального расхода, %	Число случаев превышения за 100-летний период, %
I	0,01	1
II	0,1	10
III	0,5	39
IV	1,0	63

В табл. 4.5-2 приведены критерии для расчета гидротехнических сооружений, принятые в Великобритании (Institution of Civil Engineers, 1978, с. 6). В работе Ван дер Маде (Van der Made, 1969) критерии расчетных максимальных расходов паводочного и половодного стока основаны на экстраполяции кривой обеспеченности и допустимом риске, связанном с периодом эксплуатации проектируемого сооружения.

При критериях, приведенных в табл. 4.5-1, период повторения расчетного максимального расхода колеблется от 100 (1 % превышения) до 10 000 лет. Из-за невысокой точности определения вероятностей максимальных расходов с периодом повторения более 100 лет в ряде стран для практических расчетов применяются максимальные расходы, формирующиеся при искусственно моделируемых ливнях. Например, если разрушение сооружения будет приводить к катастрофическим последствиям (сооружение 1-го класса по табл. 4.5-1), то расчетный максимальный расход определяется по максимальному возможному ливню, который представляет собой верхний предел осадков (или жидких осадков и снеготаяния), которые возможны в рассматриваемом бассейне при особом сочетании метеорологических условий. В работе ВМО (WMO, 1974, с. А.16—А.17) можно найти дополнительные пояснения по определению максимально возможных расходов.

4.5.3. Максимальные расходы расчетной обеспеченности

Для определения максимального расхода расчетной вероятности превышения можно воспользоваться одним из следующих методов:

а) построение кривых распределения вероятностей максимальных расходов весеннего половодья или дождевых паводков по данным фактических наблюдений;

б) применение эмпирических формул;

в) расчет максимального расхода на основании данных по моделированию искусственных ливней расчетной обеспеченности.

Методы построения кривых распределения вероятностей расходов по данным наблюдений описаны в п. 4.4. Расчетные гидрографы паводков и половодий могут быть определены по расчетным максимальным расходам и объемам паводочного стока и стока весеннего половодья с использованием в качестве модели наблюденных гидрографов максимального стока. Примеры таких расчетов можно найти в работах (Sokolov, 1976, п. 5.2; HEC, 1975, гл. 5).

Во Франции (ICOLD, 1973) разработаны методы расчета кривых обеспеченности максимальных расходов на постах, имеющих короткий период наблюдений, с использованием данных об осадках с длинным периодом наблюдений. Этот метод известен как метод Градекса (Gradex); он подробно описан также в работе А. А. Соколова (1976, п. 4.4.7).

В некоторых странах широко применяются эмпирические формулы для расчета максимальных расходов в случае недостаточности данных наблюдений. В СССР, например, большое распространение получили редукционные формулы, которые показывают изменение модуля максимального расхода (с единицы площади водосбора) от площади водосбора или времени добегания в бассейне. Эти формулы получены для рек с площадью водосбора более 50 км². По данным ЮНЕСКО (Unesco, 1976) и Франкоу (Francou, 1967) можно построить огибающие кривые или редукционные уравнения. Кроме указанных параметров в редукционные формулы обычно входят: средний уклон водосбора, суточные осадки, характеристики почв и другие параметры, которые определяются по изученным рекам-аналогам (Sokolov, 1976; Гидрометеоиздат, 1973). Для водосборов площадью менее 50 км² наибольшее распространение получил рациональный метод (Sokolov, 1976; Гидрометеоиздат, 1973). Подробное описание эмпирических формул, в том числе для расчета объемов дождевого стока и максимальных расходов весеннего снеготаяния, приведено в главе 4 работы Соколова, Ранца и Роше (Sokolov, 1976). Родье дает описание исследования, выполненного для Западной Африки по обработке паводков с 10-летним периодом наблюдений на малых тропических водосборах.

В ряде стран в основе построения гидрографов паводков расчетной обеспеченности лежит метод расчетных искусственно моделируемых ливней. Он применяется в тех случаях, когда данных наблюдений за стоком недостаточно для выполнения обычного вероятностного анализа или когда на расходы паводка значительное влияние оказывает использование земель на водосборах или гидротехнические мероприятия. При этом предполагается, что ве-

роятность превышения расчетного максимального расхода равняется вероятности превышения моделируемого ливня. Такое предположение может быть не вполне обоснованным в случаях переувлажнения почвогрунтов бассейна и неравномерного распределения осадков по площади водосбора. Там, где это возможно, целесообразно установить связь вероятностей превышения искусственных ливней, по которым определяется вероятность превышения расчетного максимального расхода, с кривыми распределения вероятностей, полученными на основе статистического анализа.

Метод расчетных искусственных ливней основан на критерии регионального распределения вероятностей осадков. Этот критерий определяется по предварительно рассчитанным соотношениям распределений вероятностей слоев и продолжительностей осадков в точке при статистическом анализе данных наблюдений (Garcez, 1974). Затем строят карты изолиний осадков, соответствующих выбранным обеспеченностям и продолжительностям. Такие карты подготовлены Национальной службой погоды в США и приведены в справочнике Чоу (Chow, 1964, гл. 9). Расчетные характеристики осадков на территории СССР описаны в работах Смирновой (1969), а также Соколова и др. (Sokolov, 1976).

Переход от осадков в точке к осадкам по площади водосбора осуществляется по общим соотношениям, установленным между точечными и площадными осадками. Такие соотношения выводятся на основе изучения распределения вероятностей средних наблюденных осадков по ряду станций и сравнением осадков в точке с осадками по площади при различных расчетных вероятностях. Связи, установленные подобным образом, смотри в литературных источниках (Chow, 1964, гл. 9; Sokolov, 1976, п. 4.10). После того как получены слой и продолжительность осадков для расчетных ливней, необходимо определить распределение осадков во времени. Для этого можно использовать аналитическое или эмпирическое распределение, полученное по данным наблюдений (Hupp, 1967). Переход от ливневых осадков к стоку рассматривается в п. 4.5.5.

4.5.4. Максимально возможный расход

Максимально возможный расход — это расход, который мог бы наблюдаться при наиболее неблагоприятном сочетании предельных метеорологических и гидрологических условий, причинно обусловленных для данного района. Он используется во многих странах в качестве расчетного максимального расхода для сооружений, разрушение которых угрожает жизни населения или связано с большим материальным ущербом. Для того чтобы рассчитать максимально возможный расход, прежде всего определяется максимально возможный ливень, а затем выполняется соответствующий анализ связи осадков со стоком.

Максимально возможные осадки оцениваются на основании транспозиции и максимизации наблюденных осадков или исполь-

зования моделирования ливней. В некоторых работах (WMO, 1973; 1969; ECAFE, 1967) дается описание теории и методов, применяемых в метеорологии для определения максимально возможных осадков. Этот вопрос рассматривается также и в других работах (HEC, 1975, п. 4.10; Sokolov, 1976, A5.10; WMO, 1974, A.5.6; Chow, 1964, гл. 9).

4.5.5. Переход от расчетных дождевых осадков к стоку

Для перевода осадков в сток разработано большое количество методов, начиная от простых эмпирических формул, использующих коэффициенты стока, до математических моделей, в которых делаются попытки подробного описания различных составляющих гидрологического цикла (Кучмент, 1972; 1980). Сравнительный анализ методов перехода от осадков к стоку приводится в ряде работ (WMO, 1969, с. 137—181; Sokolov, 1976, гл. 5). Наиболее распространенным методом является метод единичного гидрографа. Ниже будут рассмотрены основные элементы этого метода.

Метод единичного гидрографа требует определения таких параметров, как потери (или инфильтрация), функция перехода от осадков к стоку (т. е. единичный гидрограф) и базисный сток. При наличии снеготаяния определяют дополнительные параметры. Кроме того, обычно в бассейне необходимо выделить участки, адекватно характеризующие процесс стекания, и гидрографы формирования паводка в соответствующих створах, а также определить ограничивающие условия.

4.5.5.1. Потери. Основной проблемой при определении расчетных расходов можно считать оценку потери, которая главным образом зависит от условий почвогрунтов и должна быть соразмерна со значением расчетного ливня. Для ливней расчетных обеспеченностей потери необходимо оценить таким образом, чтобы вычисленные расходы паводков находились в соответствии с расходами, полученными по кривым обеспеченности. Потери, соответствующие максимально возможному ливню, должны определяться при наиболее неблагоприятном сочетании условий, которые могут иметь место при максимально возможных осадках. Рекомендации по оценке потерь при определении расчетного паводка даются в работе (HEC, 1975, гл. 5).

4.5.5.2. Снеготаяние. Во многих районах земного шара снег аккумулируется зимой и тает весной. При расчетах весеннего половодья большую роль играют снегозапасы на водосборе к началу периода таяния снежного покрова. Вероятностные оценки слоя воды, эквивалентного толщине снежного покрова в отдельной точке или по бассейну в целом, могут быть выполнены точно так же, как для слоя осадков или стока. Их можно использовать для определения слоя снегозапасов, соответствующих любой расчетной обеспеченности, или для оценки максимально возможного снеготаяния. В докладе ВМО (WMO, 1969, гл. 3) обсуждаются методы оценки верхних пределов снегозапасов на водосборе.

Для расчетов снеготаяния обычно применяются два метода: метод градус — сутки и метод теплового баланса. Для использования первого метода необходимы сведения о температуре воздуха и коэффициенте таяния, применение второго метода требует дополнительных сведений, включающих температуру точки росы, данные о солнечной радиации и скорости ветра. Метод теплового баланса физически более обоснован, чем метод градус — сутки, поэтому им следует пользоваться при наличии достаточного объема данных для нахождения соответствующих расчетных метеорологических параметров (WMO, 1969, гл. 3; Sokolov, 1976, п. 4.8; HEC, 1973, гл. 3; Gray, 1970, IX; Chow, 1964, гл. 10).

Осадки, выпадающие в период снеготаяния, рассматриваются как твердые осадки и добавляются к снегозапасам, если температура воздуха ниже 1—2 °С. При более высокой температуре осадки считаются жидкими, поглощаемыми снежным покровом до наступления насыщения или начала таяния. Вода от таяния снега суммируется с любым избытком жидких осадков, выпавших в соответствующий интервал времени. При расчете снеготаяния по методу теплового баланса оценивается тепло, принесенное выпавшими осадками.

4.5.5.3. Прямое стекание. Сток рассчитывается за фиксированные интервалы времени, выбранные таким образом, чтобы получить приемлемое описание формы гидрографа. Обычно временной интервал, используемый в расчетах стока, составляет от $^1/_5$ до $^1/_3$ времени водообразования на водосборе. Плювиограмма избытка осадков (суммарное количество осадков минус потери) преобразуется в гидрограф прямого стока с использованием единичного гидрографа. Допущения, принятые при использовании метода единичного гидрографа и способов определения единичных гидрографов как при наличии данных наблюдений, так и на неизученных водосборах, освещены в многочисленных публикациях (HEC, 1973; Chow, 1964, гл. 14; Sokolov, 1976, п. 5.5. 4; Gray, 1970, VIII. 4; WMO, 1969, п. 4.3). Единичный гидрограф, полученный на основании небольшого паводка, необходимо модифицировать для использования с большими расчетными ливнями (Sokolov, 1976).

4.5.5.4. Базисный сток. Сток, определяемый с помощью единичного гидрографа, представляет собой непосредственный отклик водосбора на выпавшие осадки. Для получения суммарного стока к нему необходимо добавлять базисный сток, т. е. сток, сформированный осадками, выпавшими за предшествующий промежуток времени. Для многих водотоков базисный сток составляет небольшую долю (обычно менее 10 %) от суммарного стока за период весеннего половодья. Поэтому в определении расчетного максимального расхода нахождение базисного стока часто не является существенным. Иногда оценку базисного стока проводят на основании огибающих кривых, построенных по данным прошедших паводков (Chow, 1964, гл. 14; Sokolov, 1976, п. 5.5.2.; Gray, 1970, VIII. 4). В работе Ванкона (Voncon, 1977) описан ме-

тод, который может применяться для оценки базисного стока с использованием математического моделирования.

4.5.5.5. Трансформация и слияние речных потоков. В некоторых случаях бывает необходимо разделить водосбор на отдельные подбассейны и рассчитать для каждого выделенного подбассейна сток или приток в соответствующее водохранилище, а затем объединить полученный гидрограф с другими гидрографами стока в расчетном створе, расположенном ниже по течению. Движение волны паводка или половодья вниз по течению математически описывается уравнениями неустановившегося течения — уравнениями Сен-Венана. Трансформацию паводочной волны можно рассчитать различными методами, которые в общем случае подразделяются на две группы: а) методы, основанные на решении уравнения неразрывности, приближающиеся в некотором смысле к решению уравнения движения; б) методы, которые дают решение полного вида системы двух уравнений. Первую группу методов иногда относят к «гидрологическим», а вторую — к «гидравлическим».

В настоящее время (1980 г.) для расчета прохождения волны паводка по речному руслу гидрологические методы используются чаще, чем гидравлические (Chow, 1964, гл. 25; Gray, 1970, VIII.6.2; Klemes, 1973, п. 4.2.3.2). Большинство гидрологических методов требует предварительного определения полуэмпирических параметров, которые в ряде случаев можно определить только по связям с расходами воды. В расчетах трансформации речного потока может оказаться полезным простой метод расчета по связям наполнения русла с расходами воды, если такие связи определены для устойчивых русел во всем диапазоне колебаний расходов.

Иногда традиционные методы расчета трансформации водных потоков могут оказаться неприемлемыми. Например, при выходе воды на широкую аллювиальную пойму поток становится двумерным. В аридных районах, как известно, в водотоках большие потери приходятся на период прохождения паводочной волны. Подобные явления, как правило, с трудом поддаются моделированию. В п. 4.7 приводится более подробная информация о расчетах паводков.

4.5.5.6. Трансформация стока в водохранилище. Для определения сброса воды из водохранилища необходим график сработки. Он разрабатывается в зависимости от гидрографа стока, принятого уровня начала сработки и специальных правил работы. Для водохранилища устанавливается расчетный максимальный расход воды через водослив, по которому определяется максимальный уровень подпора. По этому уровню рассчитывается отметка гребня плотины. Расчетный максимальный расход через водослив устанавливается на основании максимально возможного расхода или расхода меньшего значения в зависимости от последствий превышения расчетного уровня или других соображений (HEC, 1976, п. 6.03; Бахтияров, с. 159—200).

Расчетный максимальный расход через водослив для водохранилища, имеющего нерегулируемый водослив или водосбросные отверстия, определяется просто при наличии графика наполнения водохранилища. Необходимое соотношение между наполнением водохранилища и сбросами из него получается при объединении сведений о связях объемов аккумулируемой и сбрасываемой воды при различных уровнях. Методы расчета сработки водохранилища описаны во многих работах по гидрологии и гидравлике (Chow, 1964, гл. 25; Gray, 1970, VIII.6.3). Расчет водохранилищ с регулируемыми водосбросными отверстиями может выполняться таким же образом, но связи наполнение — сброс являются параметрическими, причем размеры водосливов входят дополнительным параметром.

4.5.5.7. Применение вычислительной техники. Программы расчета на ЭВМ, разработанные в основном для моделирования процесса осадки — сток, в последнее время получили широкое распространение. В США создано несколько моделей HEC-1 для расчета репрезентативного единичного гидрографа (HEC, 1978), а также модель «осадки — сток» для моделирования гидрографов дождевых паводков и весеннего половодья Геологической службы США (Dawdy, 1972) и модель SWMM для расчета ливневого стока (Huber, 1977). Эти модели разработаны преимущественно для естественных водосборов и основаны на использовании единичного гидрографа для перехода от осадков к стоку. Модель HEC-1 применима также для моделирования снеготаяния. Модель SWMM предназначена в основном для относительно небольших урбанизированных бассейнов. В ней используется приближение типа кинематической волны для преобразования осадков в сток. В этой модели заложен как количественный, так и качественный анализ. Модель TR-20 ориентирована на применение для сельскохозяйственных водосборов. Разработанная во Франции и в Канаде модель под названием «модель с пространственно распределенными параметрами» описана в работе (Girard, 1972). Краткое описание некоторых моделей такого типа и некоторых других приводится в сборнике программ (Bowers, Chu, 1977).

Имеется также вычислительная программа, с помощью которой рассчитывается кривая мощности при сбросе воды через водослив при определенном проектном напоре и определяется расчетный расход через водослив, лимитирующий отметку максимального горизонта воды в верхнем бьефе и сработку водохранилища. Программа применяется как для тонкостенных водосливов с синусоидальным вырезом, так и для водосливов с широким порогом. Она может также выдавать график сработки водохранилищ через водосливы с затворами или неконтролируемыми водовыпусками и определять расходы через трубопроводы и шлюзы.

Таблица 4.5-2

Расчетные характеристики максимальных расходов воды и волнения для водохранилищ в зависимости от категории плотин

Категория плотины	Исходные условия для водохранилища	Расчетный максимальный расход			Поправка на скорость ветра и волновую нагрузку
		Стандартная величина	Минимальная величина, если допускается превышение	Альтернативная величина при экономическом обосновании	
А. Плотина, разрушение которой угрожает крупным населенным пунктам	Сброс среднего за многолетний период суточного расхода	Максимально возможный расход (МВР)	0,5 МВР или расход повторяемостью 1 раз в 10 000 лет (принимается больший)	Не допускается	*Зимний период:* максимальная часовая скорость ветра повторяемостью 1 раз в 10 лет *Летний период:* максимальная среднегодовая скорость ветра за многолетний период Допустимая поправка на волнение не менее 0,6 м
Б. Плотина, разрушение которой 1) угрожает небольшим населенным пунктам 2) приводит к крупному материальному ущербу	Только полное (т. е. без сброса)	0,5 МВР или расход повторяемостью 1 раз в 10 000 лет (принимается больший)	0,3 МВР или расход повторяемостью 1 раз в 1 000 лет (принимается больший)	Расход, вероятность которого выбирается по минимальным затратам на строительство водослива и ущербу от повреждения; приток не менее минимального стандарта, но допускается превышение этого минимума	

В. Плотина, разрушение которой будет создавать незначительный риск для населения и приводить к незначительным повреждениям	Только полное (т. е. без сброса)	0,3 МВР или расход повторяемостью 1 раз в 1 000 лет (принимается больший)	0,2 МВР или расход повторямостью 1 раз в 150 лет (принимается больший)		Максимальная среднегодовая скорость ветра Допустимая нагрузка от волнения не менее 0,4 м
Г. Особые случаи, при которых нельзя предвидеть угрозу жизни населения и которые могут приводить к весьма незначительному материальному ущербу	Сброс среднего за многолетний период суточного расхода	0,2 МВР или расход повторяемостью 1 раз в 150 лет	Не допускается	Не допускается	Максимальная среднегодовая скорость ветра Допустимая нагрузка от волнения не менее 0,3 м

Примечание. В тех случаях, когда требуют условия регулирования работы водохранилища, позволяют емкости его и при наличии диспетчерского графика, разработанного при более низких уровнях на протяжении всего года, могут приниматься уровни ниже стандартных и для плотин, если это специально оговаривается в письменных инструкциях или записках.

При определении указанных в таблице долей МВР предполагается, что гидрограф МВР рассчитан, и все его ординаты умножаются на 0,5; 0,3 и 0,2 соответственно.

(Источник: По работе Института гражданских инженеров, с. 6 (Institute of Civil Engineers, London, 1978)).

Список литературы

Бахтияров Ю. А. 1961. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеоиздат. — 430 с. В-68.

Bowers C. E., Chu C. S. 1977. Computer programs in water resources. St. Paul, University of Minnesota. (Water Resour. Res. Center Bul. n 97). B-59.

Chow Ven Te (ed.) 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27 [1].

Dawdy D. R., Lichty R. W., Bergmann J. M. 1972. A rainfallrunoff simulation model for estimation of flood peaks for small drainage basins. — U. S. Geological Survey Prof. Paper 506-B. Colorado, U. S. Geological Suvey. B-56 [2].

Economic Comission for Asia and the Far East. 1967. Assessment of the magnitude and frequency of flood flows, Water Resources Series, N 30. New York, United Nations. A-8 [3].

Francou J., Rodier R. 1967. Essai de classification des crues maximales observees dans de monde. — Paris, Cahiers ORSTOM, (Serie hydrologie, vol. 4, n 3). B-37.

Garcez L. N. 1974. Hidrologia. (in Portuguese). Brasil, editora Edgard Blucher. B-13.

Гидрометеоиздат. 1973. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат — 111 с. В-68.

Girard G., Morin G., Charbonneau R. 1972. Modele de précipitations — débits à discretisation spatiale. Paris. Cahiers ORSTOM. (Serie hydrologie, vol. 9, n 4). B-37.

Gray D. M. (ed.) 1970. Handbook on the principles of hydrology. — New York, Water Information Center, Inc. B-61.

Huber W. C. a. o. 1977. Storm water management model. Level 1. Preliminary screening procedures. EPA project, n R-802411. — Washington D. C., Environmental Protection Agency. — 286 p. (NTIS Order, N PB-259 916/AS). B-32.

Huff F. A. 1967. The distribution of rainfall in heavy storms. — Water resources research, 3 (4), p. 1007—1019. Colorado, Water Resources Publications. B-62 [4].

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1966. Spillway rating and flood routing, users manual for computer program 22—J2—L210. California. B-52.

HEC. 1973. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 4. Hydrograph analysis. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 774261). B-32, B-52.

HEC. 1975. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 5. Hypothetical floods. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A017434). B-32, B-52.

HEC. 1976. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 7. Flood control by reservoirs. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052598). B-32, B-52.

HEC. 1978. HEC-1, Flood hydrograph package, users manual. California. B-52.

Institution of Civil Engineers. 1978. Floods and reservoir safety: an engineering guide. — London, Th. Telford Ltd. B-64.

International Commission on Large Dams. 1973. Groupe de travail du comite francais des grands barrages. — Estimation du crue maximal probable, rapport du onzieme congres des grands barrages. Vol. 11, p. 423. Madrid (Commission internationale des Grands barrages). A 6 [4].

---

[1] Из основных публикаций на английском языке.

[2] Заказы направляйте в Денвер, США. Из основных изданий на английском языке.

[3] Из основных публикаций на английском языке. Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

[4] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO N 356. Geneva. A-10[1].
Кучмент Л. С. 1972. Математическое моделирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 191 с. В-68.
Кучмент Л. С. 1980. Модели формирования речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 143. В-68.
Rodier J., Auvray C. 1965. Estimation des debits de crues decennalvs pour les bassins versants de superficie interieure à 200 km2 en Afrique Occidentale. — Paris, ORSTOM. B-37.
Смирнова Е. А. 1969. Расчетные характеристики дождевых осадков на территории СССР. — В кн.: Международный симпозиум по паводкам и их расчетам, Ленинград, август 1967. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат, с. 105—114. А-4[2].
Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. 296 p. (Studies and reports in hydrology, 21). A-7[3].
Unesco. 1976. World catalogue of very large floods. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 21). A-7[3].
Vancon J. P., 1977. Val, modele mathematique hydrogeologique en regime permanent et transitoire adapte aux petits ordinateurs, dans resume des principaux resultats scientifiques et techniques du service geologique national pour 1977. — Service Geologique National, Supplement au Bulletin du BRGM. Paris. B-6.
Ван дер Маде. 1969. Оценка вероятности расчетного расхода воды — В кн.: Международный симпозиум по паводкам и их расчетам, Ленинград, август 1967. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат, с. 155—170. А-4.
Vuillaume G. 1974. L'abattement des precipitations journalieres en Afrique intertropicale: variabilite et precision de calcul. — Paris, Cahiers ORSTOM (Serie hydrologie, vol. 11, n. 3) B-37.
WMO. 1969. Estimation of maximum floods. T. N. 98, WMO, N 233, T. R. 126). Geneva. A-10[3].
WMO. 1973. Manual for estimation of probable maximum precipitation. — Operational Hydrology Report, N 1. WMO, N 332. Geneva. A-10[3].
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d ed. — WMO, N 168. Geneva. A-10[3].

4.6. Расчет превышения гребня сооружения при ветровом и волновом воздействиях

4.6.1. Введение

Здесь затрагиваются вопросы, связанные с расчетами превышения гребней плотин, перемычек и дамб. Приводится определение понятия «превышение гребня плотины», описание причин, обусловливающих необходимость расчета этой величины при проектировании, и даются ссылки на литературные источники. В основном определяются требования, которым должно удовлетворять расчетное превышение гребня от ветрового воздействия. Более подробное описание расчетов такого типа приводится в ряде работ, например, (IAEA, 1980).

---

[1] Распродана с октября 1980. Возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.
[2] Заказы направляйте в МАГН (Франция).
[3] Из основных публикаций на английском языке.

4.6.2. Определение понятия превышения гребня сооружения над уровнем воды

Превышение гребня — это расстояние по вертикали между поверхностью воды и гребнем сооружения (дамбы, плотины, перемычки), которое принимается для обеспечения работы сооружения без переливания воды в период прохождения расчетного максимального расхода. В частности, особенно важно понятие «минимальное превышение», т. е. то превышение, при котором поверхность воды находится на максимальной расчетной отметке. Для плотины за уровень отсчета принимается максимальная отметка поверхности воды при сбросе расчетного максимального расхода. В случае же набережной вдоль русла реки уровень отсчета определяется продольным профилем реки при прохождении расчетного максимального расхода. Помимо расчетного максимального уровня при определении отметки гребня плотины или перемычки необходимо учитывать следующие факторы: а) ветровое воздействие; б) сейши (колебательное движение); в) короткие волны; г) осадку сооружения.

4.6.3. Назначение

Превышение гребня сооружения служит мерой предотвращения возможного переливания воды через сооружение при неблагоприятном сочетании сил, стремящихся поднять уровень выше максимального значения при сбросе воды. Перелив воды через гребень сооружения необходимо предотвратить, так как он может вызвать разрушение плотины. Факторами, воздействующими независимо или в сочетании, которые могут вызывать такой относительный подъем поверхности воды выше нормального расчетного уровня воды, являются продолжительный сильный ветер, длинный разгон, лед в водосливных отверстиях и паводки, превышающие расчетный максимальный расход через водосливы или поперечное сечение русла.

4.6.4. Каналы и плотины

Превышение гребня должно обеспечивать надежную защиту от перелива воды и при недоучете таких факторов, которые могут приводить к увеличению расходов воды в русле, например урбанизация, осадка сооружения, заиление русла, накопление мусора, изменения шероховатости, уклонов, откосов берегов, ветровых «нагонов» и «накатов» воды. Каждый из перечисленных факторов требует специального рассмотрения и дополнительного увеличения отметки гребня сооружения, чтобы предотвратить повышение поверхности воды при высоких скоростях в каналах или русле, при слиянии двух потоков с большими скоростями течения, при накапливании мусора у устоев моста, при возникновении гидравлического прыжка в потоке и т. п. Для расчета превышения

не существует какой-либо общей формулы, которая бы учитывала все перечисленные явления. Минимально допустимое превышение устанавливается на основании оценки фактора риска и последствий от разрушения плотины, скорости, глубины и объема потока в месте перелива. Обычно допустимое минимальное превышение для прямоугольных железобетонных участков составляет 0,3 м, а для земляных дамб 1,5 м. Если урез потока при расчетном максимальном паводке проходит ниже поверхности земли, то превышение на 0,5 м, как правило, бывает достаточным. Показатель степени безопасности, обеспечиваемой принятыми требованиями на превышение отметки сооружения, должен определяться как увеличение расчетного максимального расхода, который будет удерживаться в зоне превышения, выраженного в процентах, (United States Army Corps of Engineers, 1970, § 12a). В очень широких каналах или на сравнительно длинных прямых участках, неблагоприятно ориентированных относительно преобладающего направления ветра, а также в каналах, проложенных в районах с дождевыми паводками, ветер может вызывать разрушительное волнение и нагоны на откос. В таких случаях для определения превышения должен проводиться анализ, обычно выполняемый при проектировании насыпных дамб и плотин (Chow, 1964, гл. 21, с. 71; Bureau of Reclamation, 1964, § 142; Rouse, 1950, гл. 11; WMO, 1974, с. А. 32).

4.6.5. Большие озера и береговые дамбы

Ветровое волнение является основным фактором, который должен учитываться при определении превышения над уровнем воды в проектах дамб, сооружаемых в береговой части крупных озер. На берегах больших озер с благоприятными условиями для навигации, отдыха и водоснабжения, как правило, концентрируются населенные пункты и сооружения, которые нуждаются в защите от ветроволнового воздействия. Высота волн зависит от таких факторов, как скорость ветра, его разгон, длина нагона и глубина воды (WMO, 1974, с. А. 32). Кроме того, имеются другие факторы, оказывающие влияние на высоту волн и последующую высоту наката — это уклон и шероховатость лицевого откоса плотины или подпорной стенки (см. п. 4.6.8). Аналитические методы для оценки размеров такого волнения можно найти в работах (Davis, 1969, § 4, с. 17—22; USACERG, 1977, т. II, гл. 7; WMO, 1974, с. А. 32—А.34). Сейши являются колебательными перемещениями всего объема воды озера, гавани или залива. Они вызываются возмущениями в атмосферном давлении, однако имеются случаи образования сейш при нормальном и низком давлении в результате циклонической и ураганной деятельности. Периодические возмущения, период которых совпадает с периодами колебания самого объема воды, будут вызывать резонанс, что может приводить к сравнительно большим вертикальным перемещениям

воды. Это явление обычно встречается на длинных озерах типа Женевского озера в Швейцарии или любого озера из группы Великих озер на границе США и Канады.

4.6.6. Насыпные дамбы

Превышение гребня дамб часто относят к особым отметкам уровня воды таким, как нормальный уровень верхнего бьефа, максимальный уровень попуска расчетного максимального расхода или к некоторым промежуточным уровням отсчета (WMO, 1974, § A.8.1; Кондратьев, 1960, с. 5—10, 38—40). Обычно при расчете превышения гребня учитывают следующее: 1) высоту подъема воды, вызванного ветровым воздействием, называемого также нагоном; 2) высоту волн, образующихся от воздействия ветра; 3) накат волн на откос дамбы; 4) минимальную величину дополнительного превышения на непредвиденные обстоятельства.

Окончательный выбор допустимого превышения проводится на основании совместного анализа влияния перечисленных выше факторов с учетом типа дамбы, ее высоты, последствий от прорыва и риска для населенных пунктов, расположенных ниже плотины (Bureau of Reclamation, 1977, с. 271—275).

4.6.7. Ветровой нагон

Ветер, проходя над поверхностью воды, создает вертикальное давление воздушных масс на водную поверхность, которое вызывает течение воды в направлении ветра. Из-за неразрывности водной массы в нижних слоях возникает обратное течение, которое приводит к градиенту гидростатистического давления, наведенного в результате нагона воды на подветренный береговой участок или на дамбу. Ветровой нагон, таким образом, является скоплением водных масс вдоль береговой линии под действием силы ветра (WMO, 1974, A.32). Величина нагона является функцией длины свободного разгона, глубины воды и скорости ветра в направлении, перпендикулярном к створу плотины. Продолжительность действия ветра с высокой скоростью, вызывающее подъем уровня воды, составляет обычно 6 ч и более. Измерения скорости ветра, сделанные на береговых участках, следует привести к условиям поверхности озера. В зависимости от длины свободного разгона поправки при приведении могут составлять от 10 до 30 % увеличения скорости ветра (Davis, 1969, с. 4—18). Длина свободного пробега часто заменяется «эффективной» длиной, определяемой как взвешенная величина составляющих свободного пробега по приращениям 10° в диапазоне 45° по обе стороны от перпендикулярного направления к дамбе (U. S. Army Corps of Engineers, 1976, с. 11—14; USACERG, 1977, т. I, гл. 3.4). Методы расчета ветровых нагонов приводятся также в некоторых других работах

(WMO, 1974, с. A.32—A.34; Dunn Christiansen, 1975; Flather, 1975; Timmerman, 1975). Ветровой нагон можно также определять согласно рекомендациям ВНИИГ (1977, с. 166).

4.6.8. Высота волны

Под высотой волны понимается расстояние по вертикали между гребнем и впадиной волны перед моментом ее разрушения. Амплитуда колебания волн, образующихся под действием ветра различной скорости, имеет широкий диапазон. Для обозначения средней высоты из $^1/_3$ самых высоких волн, сформированных ветром определенной скорости и направления, используется понятие «существенная высота волны» (H_s). В каждой серии примерно 13 % волн будут превышать H_s, а самая низкая волна в серии будет примерно в 2—3 раза ниже H_s. Расчетные методы описаны во многих пособиях (Davis, 1969, с. 4—20; WMO, 1974, с. A33).

Высоту и период волн необходимо рассчитывать для следующих зон водной массы:

зона глубокой воды — с глубиной H, большей половины глубины воды на длине средней волны, при которой дно не оказывает влияния на характеристики волнения;

зона умеренной воды — с глубиной H, между $^1/_2$ глубины воды на длине средней волны и критической высоты волны, при которой дно оказывает влияние на развитие волнения и его основные характеристики;

зона прибоя — с глубиной в пределах от высоты критической волны до высоты волны, на которой волны начинают разбиваться и окончательно разрушаются;

зоны уреза воды — с глубиной, меньшей, чем конечная высота волны, на которой поток воды от разрушенных волн время от времени омывает берег.

Расчеты волн в каждый из названных выше зон при постоянном или переменном ветре могут выполняться согласно рекомендациям, опубликованным Гидрометеоиздатом (1977, с. 174—196).

В случае сжатия водного потока, при отношении B/D меньше 0,25 (B — ширина сжатия по нормали к оси потока, D — длина эквивалентного разгона), высота и длина волны должны быть скорректированы (Flather, 1976, с. 308—309). Метод оценки вероятностных характеристик волн в случае переменных уровней воды разработан в СССР (Кондратьев, 1972).

4.6.9. Накат волны

Под накатом волны понимается расстояние по вертикали, на которое волна набегает на наклонный откос после разрушения вблизи плотины или непосредственно на ней. Это расстояние прямо пропорционально высоте волны, ее скорости, уклону откоса плотины и шероховатости поверхности откоса и обратно пропорционально отношению высоты к длине волны. Накат обычно может быть равен высоте волны или превышать ее в 2,5 раза для гладких наклонных поверхностей и составлять примерно половину указанных пределов для поверхностей с грубой каменной отмосткой (Davis, 1969, с. 4—21).

4.6.10. Расчетный уровень воды

Расчетным уровнем воды является уровень водной поверхности (поверхность водоема или профиль водной поверхности), к которому прибавляется «превышение гребня» при определении окончательной проектной отметки гребня плотины, дамбы или канала. Этот расчетный уровень, или «уровень отсчета», может соответствовать такому предполагаемому паводку, как максимально возможный паводок, или паводок повторяемостью 1 раз в 100 лет или 1 раз в 10 000 лет.

Расчетный уровень может определяться на основе концепции «проектного ливня» или статистического анализа данных наблюдений с длинным периодом (не менее 25 лет), полученных для открытого русла с учетом ветровых флюктуаций уровня и колебаний среднегодового уровня (ВНИИГ, 1977, с. 166—168).

Вероятность расчетного уровня воды, принимаемая для каждого конкретного проекта, зависит от типа и категории сооружаемой плотины или дамбы (ВНИИГ, 1977, с. 165, табл. 90(36)).

4.6.11. Расчетные характеристики ветра

При определении элементов ветрового волнения и нагона для различных категорий сооружений могут приниматься расчетные скорости ветра различной вероятности, которые в свою очередь зависят от вероятности расчетного уровня воды (ВНИИГ, 1977, с. 168, табл. 92(37)). Расчет кривой распределения вероятностей скорости ветра и полей ветра с учетом их пространственного распределения обсуждаются в работе ВНИИГ (1977, с. 168—174).

4.6.12. Поправки на непредвиденные обстоятельства

Обычно для учета неизвестных переменных и погрешностей в оценках различных параметров добавляется поправка от 0,3 до 1,5 м в зависимости от превышения над уровнем отсчета, высоты плотины или дамбы, типа сооружения и риска от разрушения плотины.

В некоторых странах большие надежды возлагаются на многомерный вероятностный анализ. Очевидно, что ветровое и волновое воздействие учитывать более важно при сверхвысоких уровнях, чем при низких или средних уровнях. Величины, которые используются в многомерном анализе — распределение вероятностей уровней озер, ветровые нагоны, сейши и высоты волн, — могут быть взаимосвязаны. Различные сочетания обусловливающих факторов могут формировать определенный уровень, причем совместное распределение вероятностей поддается расчету и используется при определении расчетного уровня для плотины. Однако этот метод осложняется трудностью определения формирующих факторов.

Список литературы

Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior. 1977. Design of small dams. — Washington D. C., U. S. Government Printing Office. B-57.

Chow Ven Te (ed.). 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Davis C. V., Sorensen K. E. 1969. Handbook of applied hydraulics. 3d ed. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Duun Christensen J. T. 1975. The representation of the surface pressure field in a two-dimensional hydrodynamic numeric model of the North Sea, the Skagerrak and the Kattegat. — Hamburg, Deutsche Hydrographische Institute, 28. B-10 [1].

Flather R. A., Davis A. M. 1976. Note on a preliminary scheme for storm surge prediction using numerical models. — Quarterly J. Royal Meteorological Society. Berkshire, England, Royal Meteorological Society. B-44.

International Atomic Energy Agency. 1980. Safety guide on determination of design flood for nuclear power plants on coastal sites (SG-S10B). — Vienna. A-5.

Кондратьев Н. Е. 1960. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. — Л.: Гидрометеоиздат. — 64 с. В-68.

Кондратьев Н. Е. 1972. Расчет вероятностных характеристик ветрового волнения при переменном уровне воды. — Труды ГГИ, вып. 190, с. 130—140. В-68.

Rouse H. (ed.) 1950. Engineering hydraulics. — New York, Wiley. B-23 [2].

Timmerman H. 1975. On the importance of atmospheric pressure gradients for the generation of external surges in the North Sea. — Hamburg, Deutsche Hydrographische Institute 28. B-10 [1].

U. S. Army Coastal Engineering Research Center. 1977. Shore protection manual, 3 volumes, third edition. — Washington D. C., U. S. Superintendent of Documents. B-57. [2].

U. S. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers. 1970. Hydraulic design of flood control channels.— Engineering Manual 1110—2—1601. Virginia B-51. [2].

U. S. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers. 1976. Wave runup and wind setup on reservoir embankments. — Engineer Technical Letter. N 1110—2—221. Virginia. B-51 [2].

ВНИИГ. 1977. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов). — Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденева. — 314 с. В-69.

WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d. ed. — WMO. N 168. Geneva. A-10 [3].

[1] Оттисков нет. Имеются журналы.

[2] Из основных публикаций на английском языке.

[3] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

4.7. Определение профилей водной поверхности

4.7.1. Введение

Для того чтобы определить профиль водной поверхности, необходимо рассчитать отметки поверхности воды в нескольких точках по течению реки или потока. При планировании и разработке водохозяйственных проектов часто бывает необходимо оценить влияние создаваемых сооружений на профили водной поверхности (HEC, 1971, п. 2.04). При определении отметок поверхности воды из-за большого разнообразия условий движения воды в руслах использование какого-либо универсального метода не приводит к эффективным результатам, поэтому для каждого конкретного случая важно выбрать соответствующий метод расчета.

4.7.2. Одномерное установившееся течение

Целый ряд проблем, в том числе проблемы движения воды в реках, каналах и других проводящих системах, т. е. определение проектных отметок водной поверхности для набережных, контрольных русел и т. п., может быть решен при использовании методов, основанных на теории одномерного установившегося течения. Профили водной поверхности в призматических руслах могут определяться различными методами прямого интегрирования, например с помощью функции Брисса (Bresse) или функции Бахметьева для переменного расхода (Chow, 1959, гл. 10; Henderson, 1966, гл. 5). Чаще всего для определения профилей установившегося водного потока используется метод «стандартного шага» (Chow, 1959, гл. 10; Rouse, 1950, гл. 9; Sokolov, 1976, гл. 6; Henderson, 1966, гл. 5). Пример вычисления профилей водной поверхности в поперечных сечениях сложных русел с применением небольшого электронного калькулятора или логарифмической линейки дается в работе (HEC, 1975, гл. 6). Использованный в приведенном примере метод довольно сложный и содержит большое число повторяющихся операций, поэтому его лучше выполнять на электронной вычислительной машине. В настоящее время уже разработано несколько вычислительных программ, подобных программе HEC-2 (HEC, 1971, 1972). Эти программы содержат несколько расчетных методов и существенно различаются своими дополнительными возможностями. Так, в некоторые из них включен расчет профилей водного потока под мостовыми переходами, автоматическая калибровка, другие содержат графический вывод результатов на дисплей и взаимосвязанное использование. В работе Эйхерта (Eichert, 1970) сравниваются несколько вычислительных программ такого типа. Эффективный графический метод определения профилей водной поверхности описан в работе Коувена (Kouwen, 1977).

4.7.3. Одномерное неустановившееся движение воды

Теория одномерного неустановившегося движения воды в открытом русле была разработана более 100 лет назад (Chow, 1959, ч. V; HEC, 1975, гл. 7; Mahmood, 1975, гл. 2; Henderson, 1966, гл. 8; Kouwen, 1977). Применение этой сложной теории на практике связано с обработкой большого объема исходной информации и требует использования вычислительной техники. До начала активного применения ЭВМ для обработки гидрографов паводочного стока и стока весеннего половодья разрабатывались методы с различными приближениями, которые широко используются и сейчас (Chow, 1964, п. 25-II).

4.7.3.1. Гидрологические методы. Гидрологические методы обработки данных, о которых говорилось в п. 4.5, могут использоваться для определения расходов в створах, для которых по максимальным расходам рассчитываются отметки водной поверхности. Этот прием простой, относительно недорогой и поэтому получил широкое распространение (Chow, 1964, п. 25-II). Для высокодинамических потоков, например волны от гидроэнергетических установок, гидрологические методы расчетов недостаточно пригодны. Их также нежелательно использовать в расчетах потоков с обратным течением.

4.7.3.2. Методы, частично использующие уравнения неустановившегося движения воды (уравнение Сен-Венана). Различные приближенные методы расчета неустановившегося движения воды получаются при упрощении основных уравнений. Примером такого приема являются методы, получившие название «аналогия диффузии» и «кинематическая волна». При использовании таких упрощений следует проявлять определенную осторожность, чтобы избежать возможных ошибок. Для расчета профилей водной поверхности до настоящего времени еще не разработаны надежные вычислительные программы, обобщающие теорию неустановившегося течения. Однако приближение кинематической волны обобщено в вычислительной программе и успешно применялось для расчета профиля поверхностного потока (Mahmood, 1975, гл. 5; Henderson, 1966, гл. 9).

4.7.3.3. Методы, основанные на полных уравнениях неустановившегося движения воды. Самые общие методы расчета профилей водной поверхности для неустановившихся потоков воды в открытых руслах основаны на полном уравнении, которое описывает теорию одномерного неустановившегося течения в открытом русле. Обобщение теории достигается за счет сложности вычислительных процедур, поэтому для этих методов необходимо применять быстродействующие вычислительные машины. При такого рода проблемах, решаемых с применением полных уравнений, являются высокодинамичные потоки (например, паводок, возникающий при разрушении плотины), потоки с обратным течением и поток дождевого паводка. Решение полных уравнений дает на выходе временно́й ход процесса как расходов воды, так и отметок

водной поверхности на участке исследования. Перечисленные ниже методы отличаются главным образом математической схематизацией, принятой для решения уравнений. Детальное описание этих схем можно найти у Махмуда (Mahmood, 1975, гл. 3 и 4), Хендерсона (Henderson, 1966, гл. 8), Дельфта (Delft, 1970) и Ведерникова (1977).

а) **Метод характеристик.** Дает хорошие решения для потоков, близких к критическим и сверхкритическим, теоретически имеет высокую точность. Метод не получил широкого распространения в разработанных вычислительных программах. Его следует использовать для решения ряда вопросов, связанных со сверхкритическими потоками в призматических руслах.

б) **Явные схемы.** Разработаны для широкого применения общие вычислительные программы, реализующие схему точного решения (HEC, 1977). Так как программа содержит большой объем вычислительных операций, то с целью экономии машинного времени период, в течение которого моделируется изменение профиля водной поверхности, может быть сокращен.

в) **Схемы неявных решений.** Вычислительные программы, реализующие эти схемы, описаны в работах Фрида (Fread, 1973, 1978), Абботта (Abbott, 1973) и Васильева (1965). Они должны быть, по всей вероятности, более экономичны, чем схема точного решения, для моделирования движения потока на длительные интервалы времени и большие участки (несколько сотен километров и более).

г) **Метод конечных элементов.** В гидрологическом инженерном центре США сравнительно недавно разработана программа, реализующая метод конечных элементов (HEC, 1978). Программы такого типа содержат много рабочих характеристик, аналогичных схемам неявных решений.

4.7.4. Двумерное установившееся и неустановившееся движение

Расчеты формы водной поверхности и ее изменения во времени для потоков с двумерной геометрией еще не доведены до вычислительных процедур общего применения. Несмотря на то что гидродинамическая теория известна, изучение поведения стратегий различных решений все еще продолжается. Как указывает Махмуд (Mahmood, 1975, гл. 17 и 18), если специалист достаточно опытен, он может выполнить анализ частных решений.

Список литературы

Abbot M. B., Rodenhuis G. S., Verwey. 1973. Mathematical modelling of wave propogation using design systems. — Proceedings of the XVth Congress, vol. 5, paper 4.2, p. 123—126, 3 ref. Istanbul, IAHR. A-3 [1].

[1] Только фотокопии.

Chow Ven Te (ed.) 1959. Open channel hydraulics. — New York, McGraw-Hill. B-27 [1].
Chow Ven Te. 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27 [1].
Delft. 1970. International course in hydrologic and sanitary engineering. — Report Series, N 12. Netherlands, Delft. B-20.
Eichert B. S. 1970. Survey of programs for water surface profiles. — J. Hyd. Div., ASCE, vol. 96, n HY2. B-52, B-3.
Fread D. F. 1973. Technique for implicit dynamic routing in rivers with major tributaries. — Water Resources Research, 9(4). Washington D. C., American Geophysical Union. B-3 [2].
Fread D. F. 1978. NWS operational dynamic wave model. Verification of mathematical and physical models in hydrologic engineering. — Proceedings of the XXVI annual hydraulics division speciality conference. Maryland, ASCE. p. 455—464. B-3.
Hydrologic Engineering Center, U. A. Army Corps of Engineers. 1971. Hydrologic Engineering methods for water resources development. Vol. 1. Requirements and general procedures. — U. S. contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758904.). B-32, B-52.
HEC. 1975. Hydrologic engineering methods for water resource development. Vol. 6, Water surface profiles. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A017435). B-32, B-52 [1].
HEC. 1977. Gradually varied unsteady flow profiles, users manual. — California. B-52.
HEC. 1978. Water quality for river-reservoir systems, users manual. — WORRS, California. B-52.
HEC. 1979. HEC-2, Water surface profiles, users manual. — California. B-52.
Henderson F. M. 1966. Open channel flow. — New York, The Macmillan Company. B-25 [1].
Kouwen N. Harrington R. A., Solomon S. I. 1977. Principles of graphical gradually varied flow model. — J. Hyd. Div., vol. 103, HY5. New York, American Sociaty Civil Engineers. B-3 [3].
Mahmood K., Yevjevich V. 1975. Unsteady flow in open channels. — Colorado, Water Resources Publications. B-62.
Rouse H. (ed.) 1950. Engineering hydraulics. — New York, Wiley. B-23 [1].
Sokolov A. A., Rantz S. E., Roche M. 1976. Floodflow computation. Methods compiled from world experience. — Paris, Unesco. — 296 p. (Studies and reports in hydrology, 22). A-7.
Васильев О. Ф., Темноева Т. А., Шургин С. М. 1965. Численный метод расчета неустановившихся течений в открытых руслах. B-71.
Ведерников В. В. 1977. Волны попуска реальной жидкости. — В кн.: Неустановившееся движение водного потока в открытом русле. — М.: Изд. АН СССР, с. B-71.

4.8. Гидрологические расчеты при определении объема водохранилища

4.8.1. Введение

Основная цель создания водохранилищ заключается в таком перераспределении речного стока, которое наилучшим образом отвечает определенным экономическим и социальным нуждам. Общая проблема проектирования водохранилищ относится поэтому

---

[1] Из основных публикаций на английском языке.
[2] Оттисков нет. Имеются экземпляры журналов по цене 10 ам. долл.
[3] Только фотокопии по цене 7,30 ам. долл.

к сфере управления водными ресурсами и решается приемами и методами системного анализа, который позволяет оценивать гидрологическое, экономическое, социальное воздействие создаваемого водохранилища и его влияние на окружающую среду.

В объеме типового водохранилища многоцелевого назначения обычно можно выделить следующие составляющие: резервный объем для контроля паводочного стока, рабочий объем, объем воды, используемой для нужд гидроэнергетики, объем для накопления наносов и неиспользуемый объем. Водохранилище, предназначенное для какой-либо одной цели, рассматривается как частный случай водохранилища многоцелевого использования. Хотя составляющие полного объема водохранилища физически неразделимы, принято выделять объемы аккумулируемой воды в зависимости от целей ее использования. Для каждого случая расчет необходимого объема воды ведется с использованием различных гидрологических данных.

При расчете объемов воды, необходимой для различных нужд, могут использоваться данные фактических наблюдений за речным стоком и данные, полученные с помощью математических моделей, имитирующих приток воды в водохранилище. Выбор способа расчета определяется в основном наличием сведений о речном стоке.

Графики сработки водохранилища, которые обсуждаются в п. 4.9, самым тесным образом связаны с расчетами накопления воды, обсуждаемыми в этой главе. Рассмотрение общих вопросов проблемы расчетов накопления воды в водохранилищах дается в работах (Davis, 1969; Heras, 1976; Eichert, 1979).

4.8.2. Противопаводочный объем водохранилища

Расчет противопаводочного объема водохранилища выполняется на основании гидрологического анализа с учетом критериев обоснования выбора проектного решения. Хотя эти критерии выходят за рамки настоящей работы, укажем, что основными принципами обоснования проектных решений являются следующие: проект должен быть экономически оправданным (на основании соотношения экономической эффективности и затрат); должен иметь большую практическую значимость, чтобы увеличивать чистую экономическую прибыль; проектируемое сооружение не должно увеличивать опасность при прохождении любых паводочных расходов, даже таких, которые значительно превышают проектное значение (U.S. Department of the Army, 1975a и 1975b; Крицкий, 1950; UN, 1955, с. 53—58; James, 1971, с. 261; Davis, 1969, с. 11—30).

При описании гидрологического обоснования в специальной литературе меры защиты от создаваемого водохранилища (которые основываются на критерии обоснования выбора проектных решений) обычно предполагаются известными. На практике, однако, прежде чем установить меры защиты, выполняется тща-

тельное их исследование и сопоставление альтернативных проектов с критерием обоснования выбора решений. Так называемые «меры защиты» следует выбирать не только на основании условий участка, расположенного непосредственно ниже водохранилища, но учитывать также влияние проектируемых водохранилищ на все нижерасположенные районы.

Методы гидрологического обоснования при расчетах резервного объема водохранилища для контроля паводочного стока можно разделить на четыре основные группы.

1. Детальные исследования с обработкой данных наблюдений (в предположении неограниченного объема для регулирования паводков), с тем чтобы определить, какой резервный объем может потребоваться для контроля максимального наблюденного паводка или половодья (HEC, 1971). График зависимости резервного объема водохранилища от расходов различной обеспеченности будет показывать, например, требуемый объем водохранилища для безопасного пропуска паводка или половодья с вероятностью появления 1 раз в 100 лет, т. е. расхода 1 %-ной обеспеченности.

2. Детальные исследования с обработкой данных за весь период наблюдений о максимальных расходах весеннего половодья и паводков при фиксированном резервном противопаводочном объеме. Такие расчеты позволяют определить расход воды при регулировании (и возможные ущербы от паводков) по всему бассейну. Объем резервной призмы водохранилища, полученный в результате выполненных расчетов, будет определять различные меры защиты в различных точках нижнего бьефа. Кроме того, сумма ожидаемого годового ущерба может быть использована при выборе оптимального резервного противопаводочного объема, который устанавливается по критерию максимизации чистой экономической прибыли (Eichert, 1976; James, 1971, с. 258—267).

3. Детальная обработка нескольких выдающихся наблюденных или моделированных паводков и сопоставление этих паводков для расчета ожидаемого годового ущерба при предполагаемых резервных противопаводочных объемах водохранилища (HEC, 1976, гл. 4; 1979, с. 9).

4. Метод проектного паводка (или сбалансированного паводка) использует построение типового гидрографа расчетного максимального паводка (например, повторяемостью 1 раз в 100 лет). В сбалансированном паводке должны быть определены все статистические параметры, такие как значение максимального расхода повторяемостью 1 раз в 100 лет, объемы одно-, трех-, десяти- и 30-суточного стока (HEC, 1971, с. 3—02; 1975a, гл. 3). Затем выполняется обработка данных с использованием гидрографа сбалансированного паводка в качестве гидрографа притока. Более подробно этот расчет обсуждается в работах Гидрологического инженерного центра (HEC, 1971, с. 3—02) и Климеса (Klemes, 1973).

Помимо перечисленных, разработаны методы сокращенного расчета, не связанные с детальной обработкой данных наблюдений. Эти методы не являются достаточно надежными, так как в них не учитывается влияние расходов нижнего бьефа на попуски из водохранилища, а также условия работы сооружений нижнего бьефа, которые должны входить составной частью в правила сработки водохранилища. Если предполагается, что водохранилища для регулирования паводочного стока и стока весеннего половодья имеют водосливы без затворов для сброса воды, то детальная обработка данных (основанная на условиях пропуска паводочных расходов в нижнем бьефе), которая обычно требуется (см. примеры — рис. 2 приложения I в работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1976) или рис. 2 (HEC, 1979)), может быть значительно упрощена, и попуски воды из водохранилища могут рассматриваться как функция одной переменной — объема водохранилища. В этом случае для обработки данных может использоваться модифицированный метод Пальса, описание которого можно найти в работах (HEC, 1976, гл. 3; Chow, 1964, с. 25—38).

При наличии времени и выделенных средств расчет проектируемых водохранилищ следует выполнять методами 1 и 2-й групп. Если исследуемый бассейн очень большой по площади, отнесение к центру водосбора ограниченных данных наблюдений может привести к большим погрешностям результатов статистического анализа. В этом случае другие данные, например сведения о равновероятных ливнях по отдельным участкам бассейна, следует рассматривать или вместо выдающихся паводков, указанных в методах 3-й группы, должен определяться слой выдающихся осадков, равномерно распределенный по площади бассейна. При использовании в расчетах методов 3-й группы необходимо учитывать следующие обстоятельства: резервный противопаводочный объем может получиться слишком большим по сравнению с пропускной способностью русла нижнего бьефа, из-за чего резервная призма может не полностью срабатываться к началу следующего паводка.

Если водохранилище предназначается и для регулирования паводочного стока и накопления воды для других целей, исследования должны выполняться с учетом сезонного изменения объемов. Во многих случаях приуроченность ливней, формирующих максимальные расходы, и требования к сбросам накопленной воды таковы, что больших успехов можно добиться, варьируя резервными объемами для регулирования паводков внутри года.

Методы 3-й категории оказываются полезными в случае ограниченных времени и средств для выполнения тщательного анализа всех данных наблюдений по речному стоку и выдающимся паводкам по всему бассейну.

Методы 4-й категории используются только для предварительного анализа отдельных водохранилищ в случае ограниченных средств и разработки мер защиты для участка, непосредственно примыкающего к плотине.

Так как подробная и тщательная обработка данных наблюдений о максимальных расходах играет важную роль в определении резервных объемов для регулирования паводочного стока, то для уменьшения затрат на исследования и оценки различных альтернативных решений может оказаться весьма полезным использование вычислительных программ. При расчете неконтролируемых водосливов для сброса паводочного стока могут применяться программы типа HEC-1 и HEC-5 (HEC, 1978, 1979). Для расчета сбросов максимальных расходов воды через водосливы с затворами, когда попуски из водохранилища зависят от требований к расходам воды центров, расположенных в нижнем бьефе, могут использоваться программы типа HEC-5. При расчетах каскада регулирующих водохранилищ обойтись без ЭВМ практически невозможно.

4.8.3. Полезный объем водохранилища

Здесь будут обсуждаться требования к полезному объему водохранилища, предназначаемого для всех целей использования воды (исключая гидроэнергетику, требования которой рассматриваются в п. 4.8.4).

В виде запросов на попуски воды из водохранилища могут быть представлены требования следующих потребителей: водоснабжение, ирригация, гидроэнергетика, контроль загрязнения, повышение низких расходов воды, рыболовство, природа и рекреация (попуски воды для водного спорта, например, байдарок и плотов). Расчеты для удовлетворения перечисленных требований основываются на методах гидрологических расчетов с учетом критериев выбора проектных решений. Основными критериями выбора таких решений являются следующие условия: проектируемые водохранилища должны быть экономически оправданными, должны удовлетворять запросы большого числа потребителей, чтобы увеличивать чистую экономическую прибыль, обеспечивая гарантию надежного водоснабжения.

Вопрос обеспечения гарантии надежного снабжения водой весьма субъективный, поэтому предпринимаются различные попытки уточнить эти критерии. По-видимому, наиболее часто используется условие, что водохранилище должно обеспечивать надежный (или постоянный) расход воды в течение наиболее засушливого периода, зафиксированного наблюдениями за речным стоком. Более подробные сведения по этому вопросу приведены в работах Гидрологического инженерного центра (HEC, 1975b, п. 5.06) и Дэвиса (Davis, 1969). Другие критерии основаны на допустимом дефиците воды, т. е. для отдельных целей использования водохранилища, например, для улучшения качества воды или ирригации, недостаток воды допускается один-два раза в 100 лет. В некоторых критериях допустимый дефицит оценивается и по вероятности появления периода с недостатком воды и по продолжительности такого периода (HEC, 1975b, п. 5.07). Кроме надежности

водоснабжения и экономичности в расчетах полезного объема водохранилища необходимо учитывать колебания отметки зеркала воды (в интересах охраны зон отдыха), влияние на окружающую среду, рыбоводство и природу.

Расчет полезного объема водохранилищ, создаваемых для водоснабжения и ирригации, выполняется в несколько этапов (HEC, 1971, с. 4—15; 1977a, гл. 2):

а) выяснение критериев допустимого дефицита воды для каждой области использования проектируемого водохранилища (HEC, 1975b, с. 5.18);

б) выбор временно́го интервала для обработки данных наблюдений (месяц, неделя, сутки или час) (HEC, 1975b, п. 5.01);

в) определение притока воды в водохранилище на основе данных наблюдений и статистического анализа (HEC, 1975b, гл. 4, с. 3.01);

г) оценка ежемесячных потерь на эвапотранспирацию и расчет испарения по месяцам в условиях работы водохранилища (HEC, 1975b, п. 3.02; Лопатин, 1965, с. 39—47; Sokolov, 1974);

д) определение запросов на воду по сезонам и за год потребителей воды для каждой области использования водохранилища (HEC, 1975b, с. 3.11);

е) составление графика работы с учетом требований контроля паводочного стока и накопления воды, а также возможного заиления водохранилища;

ж) определение объемов накопления воды (соотношение поступление — сброс), которое удовлетворяет критериям п. «а», отвечает запросам на воду по сезонам, определяемым в п. «д», учитывая поступления воды (п. «в»), потери (п. «г») и график работы водохранилища (п. «е»). Этот расчет выполняется обычно методом итераций, так как полезный объем водохранилища должен быть выбран прежде, чем может быть выполнена последовательная обработка данных, а само водохранилище сработано на всю призму полезного объема до самых низких отметок, используемых в расчетах (HEC, 1975b, гл. 6);

з) испытание и корректировка решения, чтобы убедиться, что в целом проектируемое водохранилище отвечает всем критериям, принятым для каждой области его использования.

В исследованиях, выполняемых при проектировании водохранилищ, всегда используются данные наблюдений за речным стоком ближайших гидрологических постов. В тех случаях, когда данных наблюдений нет, недостающие сведения о стоке воды получаются по связям с осадками, математическим моделям или статистическими методами (HEC, 1975b, с. 3.01; Davis, 1969, с. 4—15).

Весьма перспективным представляется использование искусственно моделируемых рядов по речному стоку для получения более надежных сведений о возможном группировании лет различной водности, так как при моделировании появляется возможность рассмотреть более продолжительные последовательности, чем по

данным о речном стоке за период инструментальных наблюдений (Fiering, 1967). Несмотря на то, что основные философские, теоретические и методические вопросы моделирования рядов разработаны, требуются дополнительные проработки специальных методов прежде, чем этот способ увеличения гидрологической информации можно будет применять для любых условий (Davis, 1969, с. 4—17; HEC, 1975b, гл. 4).

За прошедшее десятилетие опубликовано большое количество работ, посвященных методам моделирования искусственных рядов по речному стоку. В большинстве случаев для аппроксимации вероятных колебаний речного стока используются модели с короткой памятью. Сравнительно недавно для аппроксимации долговременной инерционности, которая отмечается для многих наблюденных рядов по речному стоку, были введены модели с длинной памятью. Подробный обзор применения моделей с короткой памятью, особенно моделей марковских цепей, для моделирования искусственных стоковых рядов можно найти у Файеринга (Fiering, 1971) и Сванидзе (1977).

Методы, применяемые для определения соотношения наполнение—расход воды при выборе участков под створы плотин, можно разделить на две группы: 1) упрощенный анализ и 2) детальный последовательный анализ. Более простые методы обычно дают удовлетворительные результаты при предварительных расчетах. На стадиях планирования и проектирования обычно используются детальные методы (HEC, 1975b, п. 2.01).

Разработано также большое количество упрощенных методов, которые используются для предварительных исследований. Однако в этих методах из-за экономии времени и денег понижается точность. Наиболее часто применяется упрощенный метод, основанный на анализе интегральной кривой, называемый также методом Риппла (HEC, 1975b, п. 6.01; Davis, 1969, с. 4—11; WMO, 1974). По этому методу относительный дефицит воды непосредственно не определяется, но при дополнении другими расчетами можно построить кривую водоотдачи при различных вероятностях дефицита воды. Детальное описание расчета водоотдачи можно найти в работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1975b, п. 6.12). Метод чередования максимальных расходов является упрощенным неграфическим способом, в некоторой степени подобным методу Риппла (Fiering, 1967, с. 38—42).

Детальные методы расчетов водохранилищ разделяются на два вида: расчеты на основе воспроизведения работы водохранилищ и расчеты по моделям, реализованным в вычислительных программах. В расчетах первого вида общими детальными методами выполняется исследование работы водохранилища на основе имитации физической последовательности элементов системы. Обычно делается попытка воспроизвести с большой точностью временну́ю и пространственную изменчивость речного стока и аккумуляции воды в системе река — водохранилище. Это связано со сравнительно сложным типом балансовых расчетов, в которых

учитывается по возможности большее число сочетаний различных величин приращений и спадов поступающего речного стока. Цель расчетов другого вида заключается в разработке математической модели, которая может использоваться для анализа физической системы без воспроизведения точной последовательности чередования событий.

Основное ограничение в анализах временны́х последовательностей заключается в том, что в модели описания вероятных колебаний речного стока закладываются оценки параметров, полученные по фактическим рядам наблюдений, которые могут иметь большие погрешности из-за ограниченного периода наблюдений.

Еще недавно разработка диспетчерских графиков существующих и проектируемых водохранилищ, а также каскада водохранилищ почти исключительно основывалась на результатах анализа фактических рядов наблюдений за речным стоком, а на стадии предварительных исследований при проектировании использовались только упрощенные методы расчетов и анализа. Однако развитие идей исчерпывающего анализа и расчетов при планировании, все возрастающие требования к повышению эффективности использования водных ресурсов и рост конкуренции водопользователей в проектах многоцелевого назначения указывают на необходимость детального последовательного анализа и расчетов на всех стадиях планирования и проектирования. При проектировании системы водохранилищ даже на стадии предварительных исследований индивидуальных проектов упрощенные методы не дают удовлетворительных результатов, так как не позволяют выполнить расчет работы гидрологически объединенной системы. Для того чтобы получить оптимальный экономический эффект в проектах использования водных ресурсов, уже на этапах планирования проектировщик и гидролог должны вместе разрабатывать план работы будущего водохранилища, который обеспечит эффективное управление и экономное использование всей имеющейся воды. Большую помощь в детальной последовательной обработке данных оказывают вычислительные машины. Описание некоторых программ для гидрологических расчетов можно найти в работах (HEC, 1979; Eichert, 1976 и 1979; Hveding, 1976).

Примеры анализа временных рядов по речному стоку приводятся в работах (HEC, 1975b, п. 6.03; Davis, 1969, п. 4—12; WMO, 1974, с. A.11).

Если два или более водохранилища объединяются в систему, то должны разрабатываться дополнительные правила работы системы, причем упрощенные методы расчетов не могут применяться для составления таких правил. Описание способов расчета, применяемых для разработки графиков работы системы водохранилищ-накопителей, дается в работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1977a, п. 2.8 и гл. 3).

В связи с тем что расчеты водохранилищ связаны с анализом и обработкой большого объема данных, применение вычислительных машин весьма желательно. Разработаны различные про-

граммы для выполнения на ЭВМ расчетов подобного типа. Так, в модели HEC-3 (HEC, 1974) выполняются расчеты полезного объема водохранилища с сезонным регулированием, а в модели HEC-5 (HEC, 1979) расчеты водохранилища для регулирования стока и аккумуляции воды с использованием данных о расходах воды с интервалами от 1 ч до 1 мес.

4.8.4. Объем водохранилища для удовлетворения нужд гидроэнергетики

Большая часть методов, применяемых в расчетах полезного объема водохранилищ, аккумулирующих воду для различных целей (см. последовательность анализа данных в п. 4.8.3), пригодна также для расчетов объема водохранилищ, создаваемых для выработки электроэнергии. Кроме того, существует еще несколько дополнительных этапов, которые должны учитываться при анализе и расчетах водохранилищ ГЭС (HEC, 1975b, с. 5.15—5.18). Основной величиной, которая определяется при гидрологических расчетах, является объем аккумулируемой воды, обеспечивающей выработку определенного количества энергии, или распределение во времени требований на электроэнергию и определение объемов аккумуляции, необходимых для удовлетворения этих требований. Поэтому в дополнение к указанной выше последовательности расчетов должны рассматриваться и учитываться также следующие этапы (сведения по первым трем пунктам представляются энергетиками):

1) график энергонагрузки для района, в котором учтены перспективы требований к электроэнергии (HEC, 1971, с. 5—09);

2) особые требования на электроэнергию, которым должен удовлетворять проект (обычно распределение по месяцам), или в некоторых случаях требования энергосистемы и минимальная выработка электроэнергии для данного водохранилища (HEC, 1971, с. 5—10);

3) характеристика энергоустановки, которая должна учитываться при проектировании (отношение среднегодовой выработки и средней за период эксплуатации выработки к максимально возможной);

4) отметка нижней поверхности призмы водохранилища, выделяемой для нужд гидроэнергетики, которая соответствует нижнему пределу выработки электроэнергии, отвечает требованиям рыборазведения, охраны окружающей природы, рекреации и отложению наносов (см. п. 4.8.5, 4.8.6 настоящего Руководства) и обеспечивает достаточный напор для выработки энергии во всем диапазоне колебаний уровней;

5) среднегодовая выработка электроэнергии, средняя выработка за многолетний период и соответствующие производительные электроустановки.

Основное различие в гидрологических расчетах водохранилищ для гидроэнергетики и для других целей использования воды

заключается в том, что в расчетах водохранилищ для ГЭС количество воды, нужное в определенный период времени, является функцией двух независимых переменных — требований на электроэнергию и эффективного напора. Более того, необходимый объем воды является прямой функцией энергопотребления и обратной функцией эффективного напора.

Уравнение связи между напором, расходом и количеством выработанной электроэнергии приводится в работах Гидрологического инженерного центра (HEC, 1971, с. 5—12) и Дэвиса (Davis, 1969, с. 24—7). При расчетах суммарного оттока воды для проектируемого водохранилища необходимо учитывать просачивание воды через плотину, потери воды в турбинах, трубопроводах и на шлюзование. Отметка нижнего бьефа водохранилища (HEC, 1971, с. 5—15) также очень важна в исследованиях, выполняемых для гидроэнергетики: так, потери напора в пределах 1 м могут приводить к большим экономическим потерям. Следовательно, необходимы детальные исследования естественных условий и изменений, вносимых водохранилищем. Большие колебания в объемах сбрасываемой воды, которые связаны с флюктуациями в энергопотреблении, могут вызывать сильное разрушение берегов, поэтому требуется изучение условий нижнего бьефа для сооружения регулирующих и берегоукрепляющих дамб с оценкой их влияния на отметки сработки водохранилища.

При работе гидроэлектростанции в системе (HEC, 1971, п. 5.08) требуются дополнительные исследования и диспетчерский график работы (HEC, 1977a, п. 2.8). Выполняемые для них расчеты кратко обсуждаются в работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1971, п. 6.04) и подробно у Плешкова (1975).

Для моделирования выработки электроэнергии проектируемыми водохранилищами создано несколько вычислительных программ. В большей части разработанных моделей расчеты выполняются по календарным месяцам, например в модели HEC-3 (HEC, 1974). В Норвегии и в некоторых других странах в моделях по расчетам водохранилищ используются преимущественно недельные интервалы времени (Hveding, 1976). Если водохранилище не имеет значительного объема сработки для целей гидроэнергетики, то в расчетах полезно использовать сведения о колебаниях суточных расходов. В модели HYDUR (HEC, 1980b) реализованы методы расчета, основанные на продолжительности суточных расходов.

В технической литературе можно встретить описание различных моделей, учитывающих специфические особенности водосборов или отдельных участков, для которых они создавались, и из-за этого не пригодных для расчетов водохранилищ, создаваемых в других условиях.

Модель SSARR (U. S. Army Corps of Engineers, 1975), хотя и предназначалась для системы с особыми условиями, но затем была генерализована и широко применялась для планирования и исследований работы гидроэлектроустановок в качестве модели для расчетов регулирования стока, а также для прогнозов стока с

речных водосборов. Эта модель может также применяться в сочетании с другими моделями, разработанными в области гидроэнергетических расчетов.

Модель HEC-5 применяется для расчетов производительности гидроэлектростанции за короткие интервалы времени и условий работы водохранилища при регулировании стока. Описание этой модели можно найти в работах Эйхерта (Eichert, 1979) и Гидрологического инженерного центра (HEC, 1979, 1980a). В модели HEC-5 предусмотрена возможность использовать любую длину временно́го шага (от одного часа до одного месяца) и смешанные временны́е интервалы. Так, в беспаводочные периоды могут выполняться расчеты с недельными и месячными интервалами, а в периоды паводков — с часовыми интервалами или интервалами в несколько часов.

4.8.5. Объем, резервируемый для отложения наносов

При расчетах объема аккумулируемой воды, отметок уровня наполнения водохранилища (или нормального подпорного уровня), уровня призмы для регулирования паводков или половодья и гребня плотины необходимо учитывать общую оценку объема и распределения отложений наносов, которые будут накапливаться в водохранилище за весь период его эксплуатации. На предварительном этапе проектирования дается общая оценка объема наносов. Далее выполняется анализ отложений, которые будут происходить как в призме для контроля паводков, так и в полезном объеме водохранилища. На завершающей стадии гидрологического исследования требуется оценка распределения наносов в водохранилище, на основании которой строятся новые кривые связи уровень — площадь — объем для водохранилища на определенные моменты периода его эксплуатации (например, середина и конец предполагаемого периода использования водохранилища). (HEC, 1977b, гл. 5; Davis, 1969, начиная со с. 4-3).

Для определения суммарного объема отложения наносов необходимы сведения о поступлении (расходах) наносов, скорости осаждения наносов в водохранилище и плотности отложившихся твердых осадков (Davis, 1969, с. 4-6). Приток наносов, состоящих из взвешенных и влекомых частиц, может сильно варьировать в зависимости от методов измерения и расчета. Данные фактических измерений влекомых наносов обычно трудно собрать. Так как влекомые наносы составляют лишь небольшую часть суммарного стока наносов, то значение их оценивается на основании соответствующих рекомендаций и выражается в процентном отношении от взвешенных наносов (Davis, 1969, с. 4-3). Для горных потоков доля влекомых наносов в суммарном стоке наносов может быть значительной. Для таких потоков она рассчитывается по эмпирическим формулам, приведенным в работах (Vanoni, 1975, с. 190—230; Караушев, 1977; Гидрометеоиздат, 1973). Для оценки взвешенных наносов применяются следующие методы (см. также HEC, 1977b, приложение 3):

1) использование среднего многолетнего расхода наносов;

2) расчет по методу кривых связи расходов речных вод и их продолжительности с расходами наносов;

3) оценка по модулю стока;

4) оценка эрозии.

Сравнительный анализ перечисленных методов и рекомендаций, в каких случаях какой метод следует использовать, приводится в работе Дэвиса (Davis, 1969, с. 4-3 — 4-8). Расчету по методу связи расходов наносов с расходами речного стока, по-видимому, следует отдавать предпочтение, если такие связи получены по данным за достаточно репрезентативные периоды наблюдений. Пример применения этого метода дается в работе Дэвиса (Davis, 1969, с. 4—6).

Если данных наблюдений по наносам не имеется, то сток наносов можно оценить по выносу наносов с единицы площади водосбора. Необходимые пояснения и примеры таких расчетов приводятся в ряде работ (Davis, 1969, с. 4-4; HEC, 1977b, с. 4-12; Лопатин, 1965).

Для расчета наносозадерживающей способности водохранилища можно воспользоваться одним из методов, приведенных в работах Гидрологического инженерного центра (HEC, 1977b, п. 5.03), Дэвиса (Davis, 1969, с. 4-4 — 4-6), Чоу (Chow, 1964, с. 17—21), Лопатина (1965, с. 337) и Караушева (1977). В приложении 4 работы (HEC, 1977b) дается описание полезного приема для построения кривой наносозадерживающей способности водохранилища по данным наблюдений.

Плотность отложений наносов может определяться по способу, описанному в работе Дэвиса (Davis, 1969, с. 4—7), или по методам, предлагаемым в работе Лопатина (1965, с. 314—327).

Объем наносов, которые могут отложиться в призме водохранилища, выделяемой для регулирования паводочного стока, можно оценить по продолжительности периода эксплуатации водохранилища и относительной глубине этой призмы (HEC, 1977b, п. 5.05).

Традиционные приемы анализа распределения отложений наносов в пределах водохранилища основаны на эмпирических методах, которые связаны с большими упрощениями физической природы процесса. В работе (HEC, 1977b, п. 5.06 и приложение 5) обсуждаются основные недостатки существующих эмпирических методов. Вычислительная программа, описание которой приведено в той же работе, реализует более аналитический метод расчета распределения отложений наносов, разработанный для глубоких водохранилищ. Для определения размыва и отложения наносов и в реках и в водохранилищах и особенно для расчета отложения наносов в водохранилищах очень полезной является модель HEC-6, описание которой можно найти в работах (HEC, 1977b, приложение 7; 1977c).

4.8.6. Мертвый объем водохранилища

Неиспользуемый, или мертвый, объем должен предусматриваться при проектировании водохранилищ как одноцелевого, так и многоцелевого назначения. Он предназначается для обеспечения: 1) минимального объема воды в зонах отдыха, 2) минимального напора воды для выработки электроэнергии, 3) резервного объема для будущего отложения наносов, 4) минимального объема воды для поддержания условий существования рыб и живой природы, 5) минимальных глубин для навигации, 6) минимального объема воды по условиям ее качества (Плешков, 1975). Как правило, водохранилище не срабатывается ниже отметки мертвого объема, независимо от того, для какой цели этот объем предусматривается; однако уровень воды неиспользуемой призмы может меняться от сезона к сезону.

Методы для определения мертвого объема водохранилища слабо освещены в технической литературе и приводятся главным образом в проектной документации. Иногда на предварительных этапах проектирования объем неиспользуемой призмы водохранилища принимается равным или большим того объема, который отводится для будущих отложений наносов, причем профиль отложений наносов предполагается плоским. Если при таком предположении не обеспечиваются удовлетворительные условия для рекреации, существования рыб, живой природы и т. п., то для этих целей предусматривается дополнительный объем воды. Любые дополнительные затраты, к которым приведет увеличение неиспользуемого объема водохранилища, должны быть обоснованы соответствующими требованиями, под которые они предусматриваются. На завершающих этапах проектирования требования к объему неиспользуемой воды уточняются на основании детального исследования профилей отложения наносов в различные периоды эксплуатации водохранилища (см. п. 4.8.5).

Список литературы

Chow Ven Te (ed.) 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Davis C. V., Sorensen K. E. 1969. Handbook of applied hydraulics. 3d ed. — New York. McGraw-Hill. B-27 [1].

Eichert B. S. 1979. Resorvoir storage determination by computer simulation of flood control and conservation systems. — Paper presented at International Symposium on specific aspects of hydrological computations for water projects, Leningrad, 3—7 September 1979. B-52.

Eichert B. S., Davis D. W. 1976. Sizing flood control reservoir systems by sustems analysis, presented at XII international commission on large dams congress in Mexico City, March, 1976. California, Hydrologic Engineering Center. — U. S. Army Corps of Engineers. B-52.

Fiering M. B. 1967. Streamflow synthesis. — Massachusetts, Harvard University Press. B-18 [2].

[1] Из основных публикаций на английском языке.

[2] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

Fiering M. B., Jackson B. 1971. Synthetic streamflow. — Water resources monograph, N 1. Washington D. C., American Geophysical Union. B-2.
Гидрометеоиздат. 1973. Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании. — Л.: Гидрометеоиздат. — 55 с. В-68.
Heras R. 1976. Hidrologia y recursos hidraulics. Direccion General de Obras Hidraulicas. — Madrid, Centros de Estudios Hidrograficos (2 vols). B-19 [1].
Hveding V. et. al. 1976. Optimun operation and development of predominantly hydro power systems. — Oslo, Norconsult A/S. B-33.
Hydrologic Engineering Center. U. S. Army Corps of Engineers. 1971. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 1. Requirements and general procedures. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758904). B-32, B-52.
HEC. 1974. HEC-3, Reservoir system analysis for conservation, users manual. — California. B-52.
HEC. 1975a. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 3. Hydrologic frequency analysis. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A017433). B-32, B-52.
HEC. 1975b. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 8. Reservoir yield. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A007107). B-32, B-52 [2].
HES. 1976. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 7. Flood control by reservoirs. — U. S. Contribuion to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052598). B-32, B-52.
HEC. 1976a. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 9. Reservoir system analysis for conservation. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052599). B-32, B-52.
HEC. 1977b. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 12. Sediment transport. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052600). B-32, B-52 [2].
HEC. 1977c. HEC-6, Scour and deposition in rivers and reservoirs, users manual. — California. B-52.
HEC. 1978. HEC-1, Flood hydrograph package, users manual. — California. B-52.
HEC. 1979. HEC-5. Simulation of flood control and conservation systems, users manual. — California. B-52.
HEC. 1980a. Application of the HEC-5 hydropower routines, training document 12. — California. B-52.
HEC. 1980b. HYDUR, Hydropower analysis using streamflow duration procedure, users manual. — California. B-52.
James D. L., Lee R. R. 1971. Economics of water resources planning. — New York, McGraw-Hill. B-27.
Караушев А. В. 1977. Теория и методы расчетов наносов. — Л.: Гидрометеоиздат. — 272 с. В-68.
Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. 1950. Гидрологические основы речной гидротехники. — М.: Изд. АН СССР. — 392 с. В-71.
Klemes V. 1973. Applications of hydrology to water resources management. — Operational Hydrology Report, N 4. WMO, N 356. Geneva. A-10 [3].
Лопатин Г. В. 1965. Водный баланс и заиление мелких водоемов в Центральных черноземных областях РСФСР. — М.: АН СССР. В-71.
Плешков Я. Ф. 1975. Регулирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 558 с. В-68.
Sokolov A. A. Chapman T. G. 1974. Methods for water balance computations. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology, 17). A-7 [4].
Сванидзе Г. Г. 1977. Математическое моделирование гидрологических рядов. — Л.: Гидрометеоиздат. — 296 с. В-68.

---

[1] Цена двух томов 50 долл.
[2] Основная из публикаций на английском языке.
[3] Распродана с октября 1980 г. Возможно переиздание. Обращайтесь в библиотеки.
[4] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

United Nations. 1955. Multiple-purpose river basin development, manual of river basin planning, Part 1, Flood control series, N 7. New York A-8 [1].
U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division. 1975. Program description and users manual for SSARR model (Steamflow Synthesis and Reservoir Regulation). — Oregon. B-53.
U. S. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers. 1975a. ER 1105—2—351, Evaluation of beneficial contribution to national economic development for flood plain management plans. — Virginia. B-51.
USDA. 1975b. ER 1105—2—200, Planning process, Multiobjective planning framework. — Virginia. B-51.
Vanoni V. (ed.). 1975. Sedimentation engineering. — J. Hyd. Div., 96(11). New York, American Sociaty Civil Engineers (manuals and reports on Engr practice, n 54.) B-3.
WMO. 1974. Cuide to hydrological practices 3rd ed. — WMO, N 168. Geneva. A-10 [2].

4.9. Гидрологические расчеты при построении диспетчерских графиков водохранилищ

4.9.1. Введение

Диспетчерский график, или правила управления работой водохранилища, разрабатывается для того, чтобы определить, какой объем воды должен накапливаться или сбрасываться в определенный момент времени при любом состоянии системы водных ресурсов. Распределение воды для удовлетворения различных запросов потребителей и для обеспечения нормальной работы водохранилищ, а также перераспределение ее во времени требует разработки определенных решений. Такие решения основываются на анализе физического состояния системы и экономических предпосылок. Для их разработки привлекаются методы моделирования и оптимизации. Исходными гидрологическими данными могут быть данные фактических наблюдений за различными характеристиками речного стока, искусственно моделируемые последовательности (например по моделям осадки-сток), оценки статистических параметров, полученные с использованием методов теории вероятностей и другие сведения.

В п. 4.8 было дано описание гидрологических расчетов при определении объема водохранилища для удовлетворения различных требований. При выполнении таких расчетов необходимо учитывать диспетчерские графики водохранилищ. Как на практике осуществляются расчеты объема водохранилища для удовлетворения различных нужд с учетом диспетчерского графика и является темой настоящего рассмотрения. Ни в одной из работ этот вопрос исчерпывающе не раскрыт, поэтому в тексте делаются ссылки на источники, в которых освещаются различные аспекты расчетов, выполняемых при разработке правил управления работой водохранилища.

---

[1] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.
[2] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.

В разделе «Методы расчета оперативных планов» Джеймс (James, 1971) ставит шесть вопросов по управлению работой водохранилища, для которых разработка диспетчерского графика необходима. Первые два вопроса связаны с проблемой накопления воды, поступающей в водохранилище:

1. Следует ли проходящий паводок собирать в водохранилище с целью предотвращения разрушений в нижнем бьефе или его нужно пропускать, чтобы сохранить в резерв противопаводочный объем?

2. Нужно ли заполнять противопаводочный резерв для того, чтобы обеспечить водоснабжение в будущем или его следует сохранить для защиты от паводка?

Резервный противопаводочный объем водохранилища часто определяют по кривой распределения наполнений, меняющихся от сезона к сезону. Эта кривая строится на основе анализа данных наблюдений за паводочным стоком. Решение заполнять или освобождать противопаводочный объем должно приниматься в зависимости от свободного объема, имеющегося к этому моменту, вероятности наполнения и последствий повышенных попусков воды. Правила управления работой водохранилища, регулирующего паводочный сток, описаны в п. 4.9.3 «Анализ одиночного водохранилища» и в п. 4.9.7 «Определение сбросов воды из водохранилища в периоды критических паводков», в которых также рассматривается роль прогнозов речного стока в проблеме расчетов сбросов воды. На второй вопрос ответ дает назначение противопаводочного объема и полезного объема водохранилища, в котором вода должна накапливаться только до верхнего уровня призмы полезного объема (James, 1971).

Следующие вопросы, поставленные в работе Джеймса, касаются целей накопления воды:

3. Следует ли собранную воду расходовать на нужды в настоящее время или сохранять ее для будущего потребления?

4. Какой объем воды должен срабатываться каждым водохранилищем, если водохранилища объединены в систему? Кривая графика наполнения водохранилища строится на основании сезонно изменяющихся уровней. Если существует избыток воды, то вода сбрасывается для удовлетворения всех запросов. Если уровень наполнения водохранилища достигает или опускается ниже критической отметки на кривой графика, то удовлетворяются только самые существенные запросы и не в полном объеме. В п. 4.9.3 обсуждаются вопросы сработки одиночного водохранилища, а в п. 4.9.4 рассматриваются правила работы водохранилища в системе.

5. Пятый вопрос заключается в том, как распределить сбрасываемую из водохранилища воду между различными водопользователями. Как правило, все запросы удовлетворяются при достаточном количестве воды. При ограниченном водоснабжении вода должна распределяться по приоритету, определяемому юридическими и правовыми нормами. На количество воды, которое срабатывается из водохранилища для различного потребления, иногда

оказывает влияние ее качество, особенно температура воды, которая влияет на условия существования рыбы.

6. Шестой вопрос касается возможности выбора местоположения водозабора. Температура воды, поступающей из водохранилища, может иметь значение для некоторых водопользователей. А так как многие водохранилища сооружаются с водосливами и водопусками, расположенными на разных уровнях, то появляется возможность выбрать водозабор в зависимости от температуры воды. Иными словами, проектируемые водохранилища могут работать по определенным правилам, определяемым качеством воды так же, как и ее количеством.

Ниже мы знакомимся с методами анализа и расчетов одиночного водохранилища и системы водохранилищ, кратким описанием некоторых обобщенных моделей для расчета и оптимизации управления водохранилищами. И, наконец, с различными моделями для прогноза речного стока и расчета сбросов воды из водохранилища в условиях аварийных паводков. Основные принципы и методы расчетов регулирования речного стока приводятся в работах Картвелишвили (1970) и Чокина (1977).

4.9.2. Методы общего анализа

Общие этапы анализа для исследования работы водохранилища, описанные в этом пункте, приведены также в работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1977, гл. 2). В представленном ниже порядке должны осуществляться расчеты для одиночного водохранилища и для системы водохранилищ как одноцелевого, так и многоцелевого назначения.

1. Идентификация системы. Для того чтобы поставить задачу, необходимо установить географические, гидрологические и физические условия системы водохранилищ и распределение требований на воду.

2. Определение цели исследования. Установить цели, которым должна будет удовлетворять планируемая работа системы. Входит ли в задачи создаваемой системы удовлетворение особых требований на воду, выработка электроэнергии, улучшение условий работы существующей системы или какое-либо сочетание этих задач?

3. Определение критериев оценки. Что будет служить основой для выбора проектного решения? Хотите ли Вы уменьшить дефициты воды, увеличить экономический эффект, минимизировать сработку водохранилища, одинаково хорошо удовлетворять все требования и т. п.?

4. Сбор необходимых данных о системе. *Гидрологические* — расходы воды в реке, потери на испарение, фильтрацию и др.

Характеристика всех компонент, входящих в проектируемый комплекс сооружений, — связи уровней с объемами и площадями зеркала водохранилища, пропускные способности водосливов и водовыпусков, параметры энергоустановки, производительность водозаборов и др.

Требования к системе. Требования к расходам воды в нижнем бьефе, требования водоснабжения, гидроэнергетики и т. п.

Критерии работы водохранилища. Какое водохранилище (или система водохранилищ) будет использоваться для удовлетворения каких нужд? Какие требования имеют приоритет в условиях дефицита воды? Каковы значения максимального расхода и изменения граничных параметров водохранилища? Что является критерием, определяющим в настоящий момент работу составляющих системы, что можно изменить и что установлено юридическими нормами?

5. Математическое представление системы. Модель может быть представлена в виде распечатки на ЭВМ текста программы или колоды перфокарт, если используется одна стандартная модель для имитации системы, или в виде новой модели, которая учитывает особые требования проектируемой системы.

6. Надежность модели, имитирующей работу системы. Оценка надежности и адекватности используемой модели обычно осуществляется по данным фактических наблюдений.

7. Испытание модели. Для исследования различных случаев работы системы необходимо составить план работы, который может встретиться на практике, и их испытание на основе принятой имитации системы.

8. Оценка результатов. На основании критериев оценки для принятия проектного решения осуществляется сравнение полученных при испытании модели результатов с целями исследования, чтобы определить адекватность компонент, входящих в комплекс сооружения, условиям его работы.

Расчеты по моделированию работы водохранилища многоцелевого использования могут выполняться на основании многолетних данных наблюдений или отдельных периодов с критическим стоком. Для моделирования работы водохранилища в режиме регулирования паводочного стока обычно используются данные о паводках, разделенных сравнительно небольшими интервалами времени. После того как подготовлен график наполнения водохранилища, расчеты по регулированию паводка начинаются в предположении нормального подпорного уровня, даже если уровень водохранилища сработан до более низкой отметки. При использовании в качестве исходных данных разделенных во времени паводков расчеты должны выполняться для полностью свободной противопаводочной призмы. Хотя в отдельных случаях, последующий паводок может появиться до того, как противопаводочная призма будет освобождена, что может приводить к более критическим условиям, чем при использовании разделенных во времени паводков.

В большинстве случаев при расчетах по исследованию работы водохранилища в режиме наполнения достаточно использовать данные о стоке с месячным интервалом времени. Причем для получения большого числа различных графиков обработка данных

даже с месячным интервалом требует значительных затрат. Для разработки окончательного плана наполнения водохранилища, или для сравнения отобранных альтернатив, можно использовать более длинные ряды данных с более короткими временны́ми интервалами, чтобы учесть весь диапазон изменения гидрологических условий.

4.9.3. Анализ одиночного водохранилища

Для одиночного водохранилища диспетчерские графики могут составляться как для отдельного потребителя, например гидроэнергетики, так и с учетом интересов нескольких водопользователей и защитой от паводков и половодий нескольких районов, расположенных ниже водохранилища. На стадии планирования и начальных этапов проектирования водохранилища могут применяться упрощенные методы типа интегральной и двойной интегральной кривых стока. На завершающих стадиях проектирования и при разработке диспетчерских графиков часто требуются более детальная обработка временны́х последовательностей. В качестве общего правила, кроме того, следует соблюдать условие: для повышения точности в расчетах необходимо использовать данные с более короткими интервалами времени.

Разработка диспетчерского графика для управления работой одиночного водохранилища является наиболее простой задачей, потому что нет необходимости учитывать конфликтные требования водопотребления для различных целей. Диспетчерские планы работы обычно составляются для обеспечения ожидаемого водопотребления в некоторых критических условиях, наблюдавшихся за многолетний период, чтобы гарантировать водоотдачу в любых менее жестких условиях. Для расчета накопления воды используются также данные с наиболее неблагоприятным сочетанием условий за период наблюдений, но могут использоваться и моделированные ряды расходов воды. В работе Файеринга (Fiering, 1971) сделан обзор по применению искусственного моделирования стоковых рядов для различных практических приложений. Применение метода Монте-Карло для моделирования временны́х рядов описывается в работах Сванидзе (1964) и Резниковского (1969). В Гидрологическом инженерном центре разработана программа для ЭВМ HEC-4 «Моделирование среднемесячных расходов воды» (HEC, 1971), с помощью которой выполняется анализ среднемесячных расходов воды по нескольким взаимно коррелированным постам, восстанавливаются пропуски в рядах наблюдений и моделируются искусственные ряды среднемесячных расходов воды. Преимущество использования в расчетах искусственно моделируемых стоковых рядов заключается в том, что появляется возможность успешно разрабатывать меры по минимизации влияния чрезвычайных условий, которые могут появиться в будущем (HEC, 1975). В расчетах по регулированию паводков оценка адекватности работы водохранилища и водосливов осуществляется по

выдающемуся историческому или максимальному расчетному расходу воды. Методы определения максимального расчетного расхода воды представлены в п. 4.5.

Составление диспетчерских графиков для водохранилища многоцелевого использования обычно требует детального анализа исходных данных, чтобы избежать конфликтных ситуаций между водопотреблением для различных целей. Выбор временно́го интервала для анализируемых данных зависит от изменчивости притока и потребления. Обычно для расчетов графика работы водохранилища, используемого для контроля паводочного стока и в целях гидроэнергетики, требуются данные за короткие интервалы времени (одни сутки и менее). Анализ данных за короткие интервалы времени, как правило, выполняется для экстремальных условий работы водохранилища, сведения о которых получены на основании анализа данных за более длинные интервалы времени.

При выполнении такого анализа должны устанавливаться приоритеты водопотребления, которые затем используются при моделировании работы водохранилища. Использование различных сочетаний приоритетов водопотребления при моделировании позволяет получить оценку влияния изменений приоритетности на работу водохранилища. По результатам выполненного моделирования окончательная приоритетность водопользователей устанавливается на основании такой работы водохранилища, которая обеспечивает максимальную экономическую выгоду. Во многих случаях некоторые приоритеты очевидны. Вопрос заключается в том, как соблюдать приоритетность в различных случаях работы водохранилища. Регулирование паводка или половодья обычно имеет самый высокий приоритет, поэтому в период паводочного стока выбирается режим работы водохранилища, обеспечивающий наилучшие условия для контроля паводка.

В объеме многоцелевого водохранилища принято выделять резервную противопаводочную призму, полезный объем и неиспользуемый, или мертвый, объем (см. п. 4.8). Кроме того, предусматривается дополнительный объем форсировки водохранилища, который размещается выше резервной противопаводочной призмы, обеспечивающий накопление паводочных вод, которые не может пропустить водослив. Главная цель детальных расчетов — наилучшим образом определить составляющие объема и правила для управления их сработкой и наполнением для всех целей использования воды.

Назначение и управление работой резервного противопаводочного объема в водохранилище многоцелевого использования находятся в противоречии с интересами полезного объема водохранилища по двум причинам. Для регулирования паводков или половодий выделяется определенный объем, в котором могла бы накапливаться вода для целей водоснабжения, и кроме того при работе водохранилища в режиме контроля паводка может потребоваться уменьшение полезных попусков для нужд гидроэнергетики и других целей. Составление диспетчерских планов для регу-

лирования паводков обычно требует рассмотрения сведений об исторических и расчетных максимальных расходах воды, чтобы оценить возможности водохранилища и его влияние на нижерасположенные центры. При составлении диспетчерских планов не могут быть использованы данные о паводочном стоке, точно установленном для каждого календарного года, потому что таких данных в природе не существует. Поэтому исследования базируются на вероятностном пределе максимальных расходов, определяемом возможно более точно на основании данных наблюдений за прошлые годы и переносимом на будущий период эксплуатации водохранилища (Чокин, 1977).

В работе (HEC, 1976) определены основные принципы управления работой водохранилища, регулирующего паводочный сток, и описаны расчетные методы для определения режима управления. Вопросы, которые рассмотрены в работе, касаются определения величин попусков из водохранилища, регулирования расчетного максимального расхода, расчета водовыпусков и водосливов для регулирования паводков, построения диспетчерских графиков и управления работой водохранилища многоцелевого использования. Методы расчета критериев выбора режима регулирования паводков обсуждаются в работе (U.S. Department of Army, 1959).

Основные задачи регулирования паводков и половодий сводятся к следующему:

1) не подвергать плотину опасности разрушения;

2) не увеличивать паводочный сток и сток весеннего половодья на нижерасположенных участках;

3) не собирать излишки воды в резервной противопаводочной призме;

4) освобождать противопаводочный объем по возможности быстрее.

Разработка плана управления работой водохранилища, отвечающего всем перечисленным задачам, зависит от резервного противопаводочного объема. В работе (U.S. Department of Army, 1959) обсуждаются три основных способа, применяемых на практике для составления планов управления работой водохранилища. По методу А рассчитывается максимальное использование имеющегося противопаводочного объема в течение каждого паводка или половодья. По методу В определяется режим работы водохранилища, основанный на контроле расчетного максимального расхода. В методе С объединяются два первых способа, т. е. водохранилище работает в режиме максимального использования резервного противопаводочного объема, когда это допустимо, и переходит на более жесткий график, установленный для критических периодов.

Очевидно, что режим работы по общему регулированию паводочного стока, определяемый по методу А, будет обеспечивать максимальную выгоду от резервного противопаводочного объема. Если для регулирования паводка отводится значительный объем, то накопление в нем паводочного стока до тех пор, пока существенно понизятся расходы воды на участках нижнего бьефа, было

бы наилучшим планом управления. Однако необходимо предусмотреть меры гарантии, что несколько последующих более мелких паводков не потребуют большего резервного противопаводочного объема, чем одиночный паводок.

В случаях, когда объем противопаводочной призмы небольшой или совсем не предусматривается, план управления на период паводков обычно разрабатывается на основе расчетного максимального расхода (метод В). Для водохранилищ без соответствующего резервного противопаводочного объема должен составляться такой план работы, который обеспечивает защиту плотины и не приводит к увеличению расходов воды в периоды пропуска паводков бо́льших, чем в естественных условиях. В главе 3 работы Гидрологического инженерного центра описывается планирование работы водохранилища для пропуска расчетного максимального расхода, а в главе 6 приводится расчет работы водосливов (HEC, 1976).

Для расчета работы водохранилищ с частичным регулированием паводка обычно применяется компромиссное приближение по методу С. На основании анализа исторических и расчетных максимальных расходов устанавливается, какой объем может быть использован и какой должен быть оставлен для контроля расчетного паводка. В начале паводка или половодья работа водохранилища осуществляется по контролю паводочного стока до тех пор, пока объем накопленной воды не превысит особого уровня, после чего управление работой водохранилища начинает строиться на предположении, что проходящий паводок является расчетным максимальным паводком. Начиная с этого момента, сброс воды рассчитывается по уровню подпора и притоку воды в водохранилище. Причем график попусков воды должен обеспечить контроль максимального расчетного расхода и поддержание расходов в нижнем бьефе такими же или ниже по сравнению с теми, какими они были в период паводков в естественных условиях.

Полезный объем водохранилища может обеспечивать некоторую защиту от паводков и половодья, но главное его назначение — обеспечить подачу воды в периоды, когда потребление превышает приток воды, а также поддерживать напор воды для выработки электроэнергии. Верхние и нижние пределы изменения призмы полезного объема могут иметь сезонную вариацию. Верхняя граница может быть увеличена, если требуется меньший резервный объем для контроля паводка. Минимальный горизонт подпора может меняться: в период рекреации уровень может поддерживаться на более высоких отметках, а затем срабатывается для увеличения водоподачи под другие нужды. Если накопление воды осуществляется для нескольких целей, то должны устанавливаться приоритеты водопотребления с тем, чтобы гарантировать удовлетворение запросов самого высокого приоритета. В полезном объеме водохранилища можно выделить буферную зону. После сработки водохранилища до этой зоны водоподача осуществляется только на нужды самого высокого приоритета или просто уменьшается водоподача на удовлетворение всех запросов.

Что касается регулирования паводка с использованием полезного объема, то объем, выделяемый для накопления воды, определяет определенный режим работы, при котором осуществляется наполнение водохранилища для будущей сработки, а попуски воды делаются только для удовлетворения предусмотренных проектом запросов. Если полезный объем водохранилища рассчитывался с учетом критерия безопасных сбросов, то в период прохождения паводка могут быть удовлетворены все запросы на воду, а диспетчерский график разрабатывается с учетом данных многолетних наблюдений, сведений о водопотреблении и потерь на испарение. Примеры расчетов диспетчерских графиков по месяцам приводятся в работе Джеймса (James, 1971) в главе 12 «Водоснабжение» и в главе 13 «Гидроэнергетика».

В работе (HEC, 1975) очень подробно обсуждаются приемы, применяемые для определения связи между объемом водохранилища и сбросами из него. Рассматриваются упрощенные методы, анализ с помощью интегральных разностных кривых и детальный анализ временны́х рядов. Представлены также методы расчета и построения диспетчерских графиков. Для одиночного водохранилища такой график разрабатывается с учетом работы энергоустановки в период максимальной сработки водохранилища.

В пределах полезного объема водохранилища иногда выделяется резерв для регулирования паводков, более высоких чем наблюденный за многолетний период, или для других непредвиденных обстоятельств. Буферным уровнем при этом может быть огибающая кривая, построенная на концепции безопасных сбросов (HEC, 1975), или его может представлять отметка, при достижении которой требуется изменение режима управления водохранилищем. Поэтому в водохранилищах с незначительным полезным объемом или водоподачей возникает проблема, как установить буферный уровень.

При моделировании должны быть заданы требования на воду в порядке приоритетности, уровень или уровни допустимого сокращения водоподачи для потребителей с более низкими приоритетами. На основании этих сведений осуществляется моделирование работы водохранилища для различных критических периодов с низким стоком. Разделение полезного объема водохранилища на отдельные составляющие можно осуществить при сравнении различных диспетчерских планов таким образом, чтобы требования самого высокого приоритета удовлетворять всегда, а на менее приоритетные запросы подавать воду только в периоды, когда водохранилище наполнено выше буферного уровня.

В работе Лукса (Loucks, 1976, п. 5—6) дано описание модели разделения полезного объема водохранилища на основании ожидаемой чистой прибыли от различного использования воды. Эти же результаты могут быть получены по диспетчерским графикам, построенным для зон допустимых сбросов. Разработана вычислительная программа, реализующая рассмотренные концепции.

В п. 25-III работы Чоу (Chow, 1964) «Регулирование речного

стока водохранилищами», приведена классификация и описание регулирования речного стока водохранилищами одно- и многоцелевого использования. Примеры диспетчерских графиков системы водохранилищ многоцелевого назначения приводятся в части 5 этого пункта.

4.9.4. Анализ системы водохранилищ

Из шести приведенных выше вопросов по управлению работой водохранилищ только один непосредственно относится к работе водохранилищ в системе: Какое количество воды нужно сбрасывать из каждого водохранилища? Остальные пять вопросов относятся к индивидуальной работе каждого водохранилища. (Хотя попуски воды для поддержания температурного режима и качества воды могут относиться и к проблемам системы водохранилищ).

Под системой водохранилищ подразумевается наличие двух или более водохранилищ, работающих для единой цели. Примерами таких систем могут служить несколько водохранилищ, используемых для удовлетворения общего требования гидроэнергетики, или несколько противопаводочных водохранилищ, обеспечивающих защиту от паводков одних и тех же районов, расположенных ниже по течению. Все системы могут иметь комбинированное расположение водохранилищ: последовательное и параллельное.

В системе двух последовательных водохранилищ для удовлетворения нужд районов, расположенных ниже по реке, делаются попуски воды из нижнего водохранилища, в то время как верхнее водохранилище обеспечивает удовлетворение местных нужд и поддерживает оба водохранилища в состоянии определенного равновесия (обычно на уровне одинакового наполнения). Исключение составляет случай, когда верхнее водохранилище используется в целях гидроэнергетики. Идеальным использованием такой системы водохранилищ может быть сработка верхнего водохранилища только для выработки электроэнергии, а нижнего для перераспределения поступающей воды в соответствии с требованиями нижерасположенных водопользователей.

При параллельной работе системы водохранилищ для водообеспечения нижерасположенного района любое сочетание попусков, которые в сумме обеспечат требуемую водоподачу, будет приемлемым. Вопрос заключается в том, какой объем воды сбрасывать из каждого? Самое простое решение заключается в поддержании водохранилищ в состоянии одинакового наполнения (сбалансированный объем). Для этого необходимо учитывать вероятность притока воды к отдельным водохранилищам. При работе и в режиме регулирования паводочного стока и в режиме накопления воды то водохранилище, вероятность притока к которому выше, должно быстрее и чаще срабатываться, чем водохранилище с меньшей вероятностью наполнения.

При учете других целей использования водохранилищ выбор решения становится более трудным. Если одно из водохранилищ

создавалось для рекреации, то в течение рекреационного сезона попуски воды из него должны быть приблизительно равными притоку воды, чтобы поддерживать уровень наполнения на отметке, требуемой для зон отдыха. В водохранилищах, используемых для гидроэнергетики, в идеальном случае попуски воды лишь изредка должны быть большими, чем требуются для выработки энергии.

Надежная оценка работы нескольких водохранилищ в системе многоцелевого назначения требует детальной обработки большого объема данных. Поэтому только имитационное моделирование всех требований к системе и входящих в ее состав сооружений может отразить в целом работу системы для удовлетворения всех поставленных целей. Если же имеется возможность повысить эффективность работы системы, то могут применяться методы оптимизации.

В работе (HEC, 1977) рассмотрены методы анализа работы систем водохранилищ, используемых для водоснабжения, гидроэнергетики, рекреации и навигации. В этой работе дано также описание общей процедуры для выполнения анализа работы системы, основанной на имитационных моделях (вычислительных программах), с приведением примеров для иллюстрации выполняемых расчетов.

4.9.5. Имитационные модели

Имитационные модели для исследования работы водохранилища должны воспроизводить все существенные характеристики системы водохранилищ и давать возможность для управления ими в диапазоне изменений, удовлетворяющих целям проекта. В исследованиях, которые связаны в основном с вопросами аккумуляции воды, часто можно исключить из основной части анализа вопросы работы системы в условиях регулирования паводков, так как в ней используются данные с более длинными интервалами времени. Моделирование условий аккумуляции воды осуществляется обычно по данным с недельными и месячными интервалами, с некоторыми отступлениями от этого правила для исследований вопросов выработки электроэнергии, которые могут потребовать анализа данных с суточными и часовыми интервалами. Моделирование работы системы в условиях регулирования паводка требует, как правило, суточных и часовых данных. В работе Хафшмидта (Hufschmidt, 1966) приводятся сведения о том, как организовать имитационное исследование.

Разработано большое количество различных моделей. Некоторые из них были обобщены, должным образом документированы и могут использоваться на ЭВМ различных систем.

Двумя такими моделями являются модели, разработанные в Гидрологическом инженерном центре, HEC-3 (HEC, 1974) и HEC-5 (HEC, 1979). Обе программы осуществляют расчет попусков из всех водохранилищ с учетом особенностей их сооружения, запросов на воду и сохранения состояния сбалансированного равновесия.

Программа HEC-3 предназначена для расчета помесячной работы многоцелевой системы водохранилищ в режиме аккумуляции воды. Программа HEC-5 выполняет расчет работы системы водохранилищ и в режиме аккумуляции и в режиме регулирования паводочного стока, используя различные приращения временно́го интервала от одного часа до одного месяца, причем позволяет изменять временно́й шаг в процессе расчетов. Обе программы могут осуществлять анализ экономичности работы системы водохранилищ. Правда, в настоящее время возможности программы HEC-5 по анализу экономической эффективности ограничены. Такой анализ выполняется только для системы водохранилищ, используемой в целях регулирования паводков и гидроэнергетики.

Техасский Департамент водных ресурсов имеет серию обобщенных вычислительных программ, в которых реализованы различные возможности для исследования работы водохранилищ (Texas Department of Water Resources, 1978). Созданная в Техасском Департаменте программа RESDR-1 имитирует месячную работу одиночного водохранилища, используя концепцию гарантированной водоотдачи, и осуществляет обработку данных о количестве и качестве воды. Программа SIMYLD-2 является моделью системы водохранилищ и осуществляет исследования месячной работы в режиме аккумуляции воды с учетом требований к системе.

Моделирование температурного режима и качества воды осуществляется для удовлетворения требований к качеству воды в системе водохранилищ. Модель температурной стратификации в водохранилище, разработанная в Гидрологическом инженерном центре (HEC, 1972), имитирует распределение температуры по горизонтальным слоям для отдельных месяцев. Более сложной моделью, имитирующей экологию воды рек и водохранилищ, является модель качества воды для систем речных водохранилищ, разработанная также в Гидрологическом инженерном центре (HEC, 1978). Моделирование качества воды обсуждается в п. 4.10 этого Руководства.

Существует большое количество различных моделей описанных типов, но именно указанные в тексте организации обеспечивают лучшей документацией и оказывают большую помощь для освоения своих программ, чем другие разработчики моделей.

4.9.6. Оптимизационные модели

Проблемы исследования водных реурсов привлекают большое внимание особенно в академических организациях (Loucks, 1976; Hall, 1970; Haimes, 1975, Кучмент, 1972; Шикломанов, 1979), так как разработка моделей оптимизации часто затрудняется сложностью систем водных ресурсов, их большими размерами, проблемой исчерпывающей идентификации входящих в систему сооружений. Как правило, модели оптимизации для каждой системы адаптировались заново и лишь сравнительно недавно разработано несколько моделей оптимизации, которые допускают переделку

при умеренных затратах и хорошо документированы (Техасский Департамент водных ресурсов, 1978). Обзор различных моделей, разработанных для анализа систем водных ресурсов, дается в работе (Schanfelberger, 1971). Модели, которые там рассматриваются, основаны на месячных и годовых интервалах времени и, следовательно, они не применимы для большинства систем по регулированию паводков. Во многих случаях оптимизация заключается в увеличении выработки электроэнергии при ограничении других требований к системе. Служба мелиорации США разработала модель динамичного программирования для максимизации выработки электроэнергии при заданных ограничениях в водопотреблении (Becker, 1974). Несколько примеров использования динамического программирования и стохастической гидрологии для определения оптимальных условий работы систем были представлены в 1971 г. на Международном симпозиуме по математическому моделированию в гидрологии по теме 8 «Оптимальная работа систем по использованию водных ресурсов» (Unesco, 1974).

В ряде стран поощряется разработка моделей, которые включают возможности оптимизации. Программа AL-1Y (Texas Department of Water Resource, 1978) является обобщенной гидрологической моделью, содержащей блок оптимизационного поиска условий работы системы водохранилищ по минимуму затрат. Она может использоваться также для выбора решения с минимальными затратами при разработке проектов слияния рек, прокладки каналов и спрямления речных участков. Анализируемая физическая система представляется в виде плана узлов и связей.

Сравнительно простая обобщенная модель, используемая в Норвегии в гидроэнергетических расчетах, оптимизирует работу нескольких водохранилищ. Она основана на условии экономичности выработки электроэнергии в пределах ограничений, принимаемых для других целей использования водохранилищ, таких как рекреация, сплав леса, рыбоводство и др. Дефициты электроэнергии оцениваются таким образом, чтобы свести к минимуму общие экономические потери, учитывая затраты на выработку электроэнергии. Эта модель используется и для планирования систем водохранилищ, и для оперативных целей (Hveding, 1970a, 1970b, 1976).

4.9.7. Определение сбросов воды из водохранилищ в периоды критических паводков

Оперативные планы водохранилища, регулирующего паводки и половодья, могут корректироваться, если имеются прогнозы речного стока. Для водохранилищ с небольшим противопаводочным объемом или без него прогнозируемый приток дает основание осуществлять своевременно аварийные сбросы, чтобы освободить дополнительный объем для контроля паводка. Основной учитываемой величиной для определения аварийных сбросов должен быть объем паводка, но большое значение имеют также данные

о времени прохождения пика паводка и его максимальном расходе. Для водохранилищ, предназначенных для защиты от паводков нижерасположенных центров, важно также учитывать расположение защищаемых участков. Сбросы определяются пропускной способностью русла нижнего бьефа с учетом его наполнения к началу попусков. Для того чтобы в оперативный план можно было внести корректировки, прогноз должен быть заблаговременным и достаточно надежным.

Для прогнозирования речного стока применяются в основном методы гидрологических расчетов и анализов (WMO, 1974). Так, большая часть методов прогноза паводков и половодий использует в качестве исходных данных сведения о количестве осадков и (или) условиях снеготаяния, а расчет возможного стока основан на эмпирических связях и учете потерь. Другие приемы прогнозирования основаны на расчете движения паводочной волны по речному руслу. В публикациях ВМО (WMO, 1974, гл. 6, 1975a) приведен обзор существующих методов прогноза речного стока. Алехин (1964) дает описание методов экстраполяции данных о стоке в заданные точки речной системы, методов прогноза стока с использованием данных гидрометрических постов, расположенных выше по течению, а также методов единичного гидрографа и водного баланса. Апполов (1964) рассматривает некоторые из перечисленных методов и описывает методы долгосрочных прогнозов сезонного стока, а также прогноза замерзаний рек и очищения от ледяного покрова. Проблемы прогнозирования детально рассматриваются Поповым (1974). Гидрометеорологический центр СССР применяет математические модели для предсказания стока дождевых паводков и весеннего половодья (Кучмент, 1972, с. 121—140).

С началом применения ЭВМ в практике гидрологических расчетов начались разработки моделей речных водосборов, в которых с большей детальностью представлен гидрологический цикл. К настоящему времени создано большое количество детерминированных имитационных моделей, из которых несколько используются для прогнозирования. В центрах речных прогнозов США применяются модели SSARR (U. S. Army Corps of Engineers, 1975), Гидрологическая модель р. Сакраменто (Burnash, 1973) и Гидрологическая модель национальной службы погоды (NOAA, 1972). Все три модели были включены в исследование, проводимое Всемирной метеорологической организацией по испытанию гидрологических моделей (WMO, 1975b). Результаты применения модели р. Сакраменто (с. 300—306) и модели SSARR (с. 317—344) приведены в трудах Международной ассоциации гидрологических наук (IAHS, 1969). Там же приведено описание модели HEC-1 (с. 258—267).

Большая часть методов для прогнозирования паводочного стока требует своевременной гидрометеорологической информации. В Руководстве ВМО (WMO, 1974) дается полное описание приборов (гл. 2), размещения наблюдательской сети (гл. 3), сбора, обработки и публикации данных (гл. 4). Создание системы для

гидрологического прогнозирования обычно связано с большими капитальными вложениями, поэтому прежде всего необходимо рассмотреть ценность прогнозов. В работе Дэя (Day, 1973) представлены методы оценки затрат и экономической выгоды гидрологических прогнозов.

Работа водохранилища не должна в целом зависеть от коммуникаций, которые могут выходить из строя, или полагаться на методы анализа, которые могут быть невыполняемыми в аварийных обстоятельствах. Для того чтобы обеспечить рабоу водохранилища в условиях чрезвычайных паводков, рекомендуется заранее разработать график аварийных сбросов. В работе Гидрологического инженерного центра (HEC, 1976) дано описание последовательности расчетов для построения кривых регулирования пропускной способности водосливов.

Работа водохранилища в режиме контроля паводков и половодья, вообще говоря, может быть улучшена, если при определении сбросов воды имеется возможность учесть сведения об уровнях воды на потенциально опасных участках нижнего бьефа (т. е. в опасных центрах). При известных расходах воды и пропускной способности различных участков русла нижнего бьефа появляется возможность так спланировать попуски из водохранилища, что они не будут ухудшать условия прохождения паводочных вод на опасных участках. Определение допустимых сбросов воды становится сложной задачей при увеличении числа регулирующих водохранилищ, опасных участков и времени добегания. Вычислительная программа HEC-5 разработана (HEC, 1979) для определения максимальных безопасных попусков воды из водохранилищ при регулировании паводочного стока и стока весеннего половодья. Она воспроизводит работу системы водохранилищ и дает возможность оценить расходы на участках нижнего бьефа, а также экономические затраты на обеспечение безопасности этих участков. В программе учитывается неопределенность сведений о расходах воды на перспективу, которая позволяет оценить вероятность прогноза. Если вычислительная программа типа HEC-5 должна использоваться для разработки оперативных решений в реальное время, то в качестве исходной информации требуются сведения о стоке, получаемые различными методами прогноза, которые подключены к программе. Результаты расчетов по модели с использованием прогнозируемых данных о расходах воды должны всегда критически оцениваться прежде, чем они будут использоваться в расчетах регулирования пропускной способности водосливов затворами. Имитационная модель без изменений может быть использована для разработки оперативных планов системы водохранилищ на основе рассмотрения различных альтернативных решений, принимаемых по прогнозируемым данным (Eichert, 1975).

Графики работы водохранилищ, регулирующих паводочный сток, основанные на поддержании расходов нижнего бьефа в безопасном диапазоне, могут привести к переполнению противопаводочного объема и возникновению ситуации, когда регулирование

паводка, предусмотренное графиком, не выполнимо. Поэтому обычно работа системы водохранилищ по обеспечению безопасных расходов на участках ниже по течению осуществляется до достижения заранее определенного уровня в водохранилище. Выше этого уровня начинается транзитная зона, из которой по установленному плану сбрасывается вода, если происходит нарастание паводочного стока. В случае заполнения транзитного объема, сбросы воды осуществляются таким образом, чтобы предотвратить перелив воды через гребень плотины. План работы водохранилища в пределах транзитной зоны основывается на результатах исследования работы водохранилища по контролю максимальных фактических паводков. Разработка оперативных планов, основанных на критериях такого типа, должна обеспечивать наибольшую надежность (U. S. Department of Army, 1959, с. 7—11). Примеры расчетов работы водохранилищ в условиях опасных паводков приведены в работе Эйхерта (Eichert, 1975).

Попуски воды для системы водохранилищ могут устанавливаться на основании сбросов, определяемых для каждого отдельного водохранилища. Однако большую эффективность можно получить, если использовать результаты анализа работы системы водохранилищ для определения попусков. Исседование работы системы водохранилищ может осуществлятся по обобщенным вычислительным программам типа HEC-5, которые позволяют разработать на период паводка взаимосвязанные оперативные планы. Программа может быть также использована для определения попусков воды, которые обеспечивают максимальную экономическую эффективность для данной системы водохранилищ на основании поступающих в реальном времени прогнозов о речном стоке и осадках (Eichert, 1975).

Список литературы

Алехин Ю. М. 1964. Краткосрочные прогнозы стока на равнинных реках. — Л.: Гидрометеоиздат. — 266 с. В-32.

Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. 1964. Гидрологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат. — 407 с. В-32.

Becker L., Yeh W. W. 1974. Optimization of real-time operation of a multiple-reservoir system, Water resources reserach, 10(6). — Washington D. C., American Geophysical Union (p. 1107—1112). B-2[1].

Biswas A. K. 1976. Surface-water quantity management models Ch. Systems approach to water management. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Burnash R. J. C., Ferral R. C., McCuire R. A. 1973. A generalized streamflow simulation system. Conceptual modeling for digital computers — California, Joint Federal-State River Forecast Center. B-24.

Чокин Ш. Ч., Григорьев В. А., Редькин В. К. 1977. Методика расчета регулирования стока. — Алма-Ата: Наука. — 300 с. В-73.

Chow Ven Te (ed.) 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Day H. J. 1973. Benefit and cost analysis of hydrological forecasts. — Operational hydrology report, n 3. WMO, N 341. Geneva. A-10.

[1] Оттисков нет. Имеются журналы по цене 10 ам. долл.

Eichert B. S., Peters J. C., Pabst A. F. 1975. Techniques for real-time operation of flood control reservoirs in the Merrimack Basin, Technical Paper, N 45. California, Hydrologic Engineering Center. — U. S. Army Corps of Engineers. B-52 [1].

Fiering M. B., Jackson B. B. 1971. Synthetic streamflow. — Water Resources monograph, 1. Washington D. C., American Geophysical Union. B-2.

Haimes Y. Y., Hall W. A., Freeman H. T. 1975. Multi-objective optimization in water resources systems. — Elsevier Scientific Publishing Company. B-11 [2].

Hall W. A., Dracup J. A. 1970. Water resources systems engineering. — New York, McGraw-Hill. B-27.

Hufschmidt M. M., Fiering M. B. 1966. Simulation techniques for design of water-resources systems. — Massachusetts, Harvard University Press. B-18 [2].

Hveding V. 1970a. Digital simulation techniques in the planning of large mixed-supply (hydro-thermal) power systems. Economic Commission for Europe symposium on hydro-electric schemes, Dubrovnik. — Geneva, ECE. A-1.

Hveding V. 1970b. On the economic assessment and optimal scheduling of increments to large mixed-supply (hydro-thermal) power systems, Economic Commission for Europe symposium on hydroelectric schemes, Dubrovnik. — Geneva, ECE. A-1.

Hveding V. 1976. Optimum operation and development of predominantly hydropower systems. — Oslo, Norconsult A/S. B-33.

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1971. HEC-4, Monthly streamflow simulation, users manual. — California. B-52.

HEC. 1972. Reservoir temperature stratification, users manual. — California. B-52.

HEC. 1974. HEC-3, Reservoir system analysis for conservation, users manual. — California. B-52.

HEC. 1975. Hydrologic engineerings methods for water resources development. Vol. 8. Reservoir yield. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A007107). B-32, B-52 [1].

HEC. 1976. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 7. Flood control by reservoirs. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052598). B-32, B-52 [1].

HEC. 1977. Hydrologic engineering hethods for water gesources development. Vol. 9. Reservoir system analysis for conservation. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052599). B-32, B-52 [1].

HEC. 1978. WQRRS, Water quality for river-reservoir systems user manual. — California. B-52.

HEC. 1979. HEC-5, Simulation of flood comtrol and conservation systems, userç manual. — California. B-52.

IAHS/Unesco. 1969. The use of analog and digital computers in hydrology. — Proceedings of the Tucson symposium, June, 1966. IAHS Pyblication, N 80. (Unesco, Studies and reports in hydrology, 1). A-4.

IAHS/Unesco/WMO. 1974. Mathematical models in hydrology. — Proceedings of the Warsaw symposium, July, 1971. Vol. 2, part 8, Optimal operation of water resources systems. (IAHS publication, N101. (Unesco, Studies and reports in hydrology, 15). A-4 [3].

Iames D. L., Lee R. R. 1971. Economics of water resources planning.— New York, McGraw-Hill. B-27.

Картвелишвили Н. А. 1970. Регулирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 218 с. В-68.

Кучмент Л. С. 1972. Математическое моделирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 191 с. В-68.

National Oceanic and Athospheric Administration. 1972. National Wather Service River Forecast System Forecast Procedure, NOAA Technical Memorandum

---

[1] Из основных публикаций на английском языке.

[2] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

[3] Обращайтесь в МАГН в Англии.

NWS — HYDRO — 14. — Washington D. C., U. S. Department of Commerce, National Weather Service. (NTIS Order, N COM — 73—10365). B-32.
Попов Е. Г. 1974. Гидрологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат. — 256 с. B-68.
Резниковский А. Ш. (ред.) 1969. Водноэнергетические расчеты методом Монте-Карло. — Л.: Энергия. — 303 с. B-67.
Schanfelberger J. E. 1971. A systems approach to the operation of flood control reservoirs. — Washington D. C., National Teshnical Information Service (NTIS Order, N PB — 240451). B-32.
Шикломанов И. А. 1979. Антропогенные изменения водности рек. — Л.: Гидрометеоиздат. — 302 с. B-68.
Сванидзе Г. Г. 1964. Основы регулирования речного стока методом Монте-Карло. — Тбилиси: Мецниереба. — 271 с. B-70.
Texas Department of Water Resources. 1978. Mathematical simulation capabilities in water resources systems analysis, LP — 16. — Texas. B-50[1], B-32.
U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division. 1975. Program description and users manual for SSARR model (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation). — Oregon. B-53.
U. S. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers. 1959. Reservoir regulation, Engineering manual 1110—2—3600. — Virginia. B-51.
WMO. 1974. Guide to hydrological practices. 3d ed. WMO. N 168. Geneva. A-10[2].
WMO. 1975a. Hydrological forecasting practices. Operational hydrology report, n. 6. (WMO, N 425). Geneva. A-10.
WMO. 1975b. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational hydrology report, n 7. (WMO, N 429). Geneva. A-10[3].

4.10. Оценка влияния проектируемых мероприятий на сток, испарение, движение наносов, подземные воды и окружающую среду

4.10.1. Введение

Водохозяйственные мероприятия оказывают воздействие на временну́ю и пространственную изменчивость речного стока, а также на качество воды. Важными факторами, которые подвергаются влиянию проектируемых сооружений, помимо очевидного влияния на расходы нижнего бьефа создаваемых водохранилищ, являются испарение, гидрохимический режим, подземные воды и движение наносов. По данным Службы мелиорации (Burea of Reclamation, 1977), испарение с водной поверхности водохранилища уменьшает количество и ухудшает качество воды, а отложение наносов уменьшает полезный объем водохранилища. Количественные оценки влияния проектируемых водохозяйственных мероприятий требуют тщательных исследований на основе математического моделирования. В таких исследованиях должны воспроизводиться сложные физические системы и (или) стратегии управления водными ресурсами с применением комплекса вычисли-

[1] В октябре 1980 г. оставалось около 50 экз. Имеются ксерокопии.
[2] Четвертое издание «Руководства по гидрологической практике» готовится к опубликованию в двух томах.
[3] Из основных изданий на английском языке.

тельных машин. Оценка влияния проектируемого мероприятия должна основываться на сравнении условий до и после выполнения проекта с учетом тех изменений в бассейне реки, которые могут произойти за период будущей эксплуатации сооружения (Плешков, 1975; Шикломанов, 1976). Общее обсуждение влияния хозяйственной деятельности на гидрологические явления приводится в публикациях Юнеско (Unesco, 1974, 1980). В работах Родье (Rodier, 1974) и Шикломанова (1979) можно найти всестороннее рассмотрение влияния больших сооружений в руслах рек на гидрологический цикл и окружающую среду.

4.10.2. Влияние проектируемых мероприятий на речной сток

4.10.2.1. Водохранилища. Водохранилища многоцелевого назначения как для регулирования стока, так и для аккумуляции воды (например, для целей водоснабжения, гидроэнергетики, повышения расходов в меженные периоды и т. п.) обычно проектируются и действуют в широком диапазоне колебаний расходов воды. Другие водохранилища специального назначения могут оказывать влияние только на сток в нижнем бьефе при ограниченных колебаниях расходов. Для количественной оценки влияния тех и других водохранилищ могут быть использованы одни и те же аналитические методы. Во многих случаях удовлетворительные результаты при трансформации гидрографов паводков и весенних половодий, пропускаемых через водохранилище, дает простой метод, пригодный для ручных расчетов, полностью основанный на уравнении неразрывности (HEC, 1976, с. 3—01; 1977a, с. 11). Водобалансовые методы с недельными и месячными интервалами времени позволяют выполнить анализ работы водохранилищ, проектируемых для накопления воды в целях водоснабжения, гидроэнергетики и др. (Sokolov, 1974, с. 89). В некоторых случаях водохранилища могут увеличивать речной сток, потому что осадки, выпадающие на водную поверхность, не теряются на инфильтрацию. Обычно водохранилища способствуют уменьшению стока воды за счет увеличения испарения и фильтрации в подземные воды бассейна.

На размещение системы водохранилищ в речном бассейне и последовательность ввода их в действие часто оказывают влияние потребность в воде, водообеспеченность и экономические возможности. Анализ водохозяйственных объектов многоцелевого назначения, планируемых и для регулирования стока и для целей аккумуляции, лучше выполнять на вычислительных машинах с помощью программ, моделирующих их работу (HEC, 1979, с. 11).

4.10.2.2. Мероприятия, не связанные со строительством водохранилищ. К мероприятиям, не связанным с созданием водохранилищ, относятся обвалование берегов, канализация и спрямление русел, струенаправляющие установки и отведение воды водозаборами.

Береговое обвалование и другие мероприятия по улучшению русел изменяют кривую связи уровней и расходов на соответствующих участках русла, что может приводить к изменениям гидрографов половодья и паводков. Возможность таких изменений необходимо установить. Совместное использование методов для расчета профилей водной поверхности и модифицированного метода Пальса (Puls) позволяет получить простой и эффективный прием для анализа кривых связи уровней и расходов (U. S. Department of the Army, 1969, с. 11; HEC, 1975, с. 6.01). Струенаправляющие конструкции обычно не оказывают влияния на гидрограф стока, если потенциально затопляемые площади защищены от вод половодья и паводков. Для сооружений, изменяющих движение воды в эстуариях и водохранилищах, необходимый анализ выполняется методами, описанными в п. 4.9 и в работе Орлоба (Orlob, 1977, т. 2).

Сооружения безрезервуарного типа для ирригации и водоснабжения обычно не вызывают быстрых изменений расходов воды, поэтому для анализа их влияния могут использоваться недельные, месячные и даже сезонные объемы стока (Sokolov, 1974).

Влияние дноуглубительных работ, проводимых для улучшения условий навигации и регулирования стока, может оцениваться с помощью выше перечисленных методов, рекомендуемых для мероприятий, не связанных с созданием водохранилищ. Как правило, углубление русла в целях навигации мало влияет на гидрограф стока, так как оно не изменяет кривую связи уровней с расходами. Однако в определенных условиях такие мероприятия могут приводить к понижению уровней, что может сказаться и на стоке.

4.10.2.3. Внутрибассейновые системы. Схемы управления водными ресурсами часто представляют собой комплекс мероприятий по аккумуляции воды и перераспределению ее как во времени, так и по площади бассейна по сети естественных или искусственных русел. Воздействие такого комплекса мероприятий на сток и водный баланс водосбора требует особенно тщательного анализа.

Создание водохранилищ приводит как к изменению расходов воды в реке, так и к перераспределению стока во времени. Измерения речного стока могут определяться расчетом водного баланса для водохранилища или участка реки, в пределах которого размещается водохранилище (Sokolov, 1974). В случае системы из нескольких водохранилищ водный баланс рассчитывается для каждого водохранилища по порядку уменьшения отметок нижнего бьефа, начиная с водохранилища, расположенного в верхней части реки, и с учетом его работы. В приходную часть уравнения водного баланса включаются сток, поступающий от вышерасположенных водохранилищ, боковой приток на участке реки до створа плотины водохранилища, водопотребление на коммунальные и промышленные нужды, возвратные воды и дополнительный сток, поступающий в результате регулирования на участке реки между рассматриваемыми водохранилищами.

Расходная часть уравнения водного баланса суммирует сток,

проходящий через водослив, безвозвратное водопотребление, дополнительное испарение с водной поверхности водохранилища (разница между испарением с водной поверхности и с поверхности суши) и потери воды на фильтрацию в подземные горизонты в пределах расчетного участка. Водный баланс может рассчитываться за различные интервалы времени, чаще всего расчет выполняется за год или за отдельные месяцы.

Несмотря на то, что создано большое количество простых методов ручного счета как для исследования комплексных внутрибассейновых систем, так и отдельных сооружений, эффективный анализ многочисленных возможных сочетаний проектируемых мероприятий, которые должны оцениваться, требует применения электронных вычислительных машин. Наиболее целесообразно использование математических моделей. При анализе, помимо всегда включаемых рядов фактических данных наблюдений, необходимо рассматривать и искусственно моделируемые ряды (HEC, 1972a, с. 5.01). Разработаны вычислительные программы для оценки влияния каскада водохранилищ на речной сток, контроль половодий и паводков и удовлетворение требований гидроэнергетики. Описание программ приводится в работах Гидрологического инженерного центра (HEC, 1976, с. 12.01; 1977a, с. 1—3).

4.10.3. Влияние водохозяйственных мероприятий на испарение

Испарение, как правило, подробно исследуется только при проектировании водохранилищ-накопителей (например, предназначенных для водоснабжения, ирригации и гидроэнергетики). В большей части созданных моделей расчет потерь на испарение осуществляется с использованием данных фактических наблюдений, площади зеркала водохранилища и скорости испарения. Многие методы расчета испарения основаны на уравнениях теплоэнергетического баланса (Sokolov, 1974, с. 89; Krambeck, 1974, с. 137; Chow, 1964, п. 11). Механические покрытия водной поверхности и искусственные пленки могут уменьшать испарение (Chow, 1964, с. 11—14). Рост водной растительности, как правило, приводит к значительному увеличению потерь на эвапотранспирацию. Например, в тропических районах произрастание водных гиацинтов увеличивает эвапотранспирацию в 2—3 раза (Guadiana, 1976, т. 3).

4.10.4. Влияние проектируемых мероприятий на окружающую среду

Водохранилища и другие мероприятия по регулированию речного стока могут оказывать влияние на условия жизни населения и животного и растительного мира. Так, крупномасштабные ирригационные системы могут существенно повышать увлажненность ранее засушливых районов, а вмешательство в систему естественного стока вызывает изменения флоры и фауны прилегающей местности. Чаще всего интерес к изменениям, вносимым в окружаю-

щую среду, касается вопросов качества вод. И в настоящей работе этим вопросам будет уделено наибольшее внимание, хотя не менее важны, особенно в некоторых районах, вопросы охраны естественных природных условий и изменений локальных климатических условий.

4.10.4.1. Водохранилища. Общие исследования качества воды включают вопросы изучения температурного режима, биохимического показателя содержания кислорода, количества растворенного кислорода и других химических и биологических свойств воды. Создание водохранилищ оказывает влияние на все химические и биологические свойства воды. Для того чтобы установить вносимые изменения, исследования качества воды необходимо проводить сразу же после создания водохранилища. Обычно выбирается критический период продолжительностью не менее 6—7 месяцев, в течение которых соответствующим образом выполняются анализы, например, согласно рекомендациям Гидрологического инженерного центра (HEC, 1972, с. 6—01). В водохранилище можно выделить отдельные слои, и показатели качества воды определять для выделенных слоев. При расчетах изменения качества воды в водохранилищах, наряду с данными о притоке воды, геометрии водохранилища, основных его горизонтах и попусках воды, необходимо использовать сведения о показателях качества притока воды и климатических факторах.

Водохранилища часто создаются для улучшения качества воды в периоды низкого стока. Сбросы промышленных и коммунальных вод так же, как рассосредоточенный приток подземных вод, вносят различные загрязняющие вещества. Для учета всех поступающих загрязнителей необходима специальная система контроля (Whipple, 1977), деятельность которой не менее важна, чем учет водопотребления для целей гидроэнергетики, коммунальных и промышленных нужд и т. п. Для оценки качества воды в системе река — водохранилище созданы общие модели (Straskraba, 1973; HEC, 1978; Cembrowicz, 1978; Кривенцов, 1976). Однако область применения таких экологических моделей довольно ограничена из-за недостаточной проверки на натурном материале.

Создание больших водохранилищ может существенно влиять на местную экономику из-за перемещения населения, изменения технологии рыбоводства и др. (Ackerman, 1973). Изменение естественных расходов воды в реке может оказывать влияние на рыбные хозяйства, расположенные ниже плотины. Кроме того, изменения экосистемы могут приводить к увеличению сферы жизнедеятельности различных вредных для человека животных и паразитов (Detwyler, 1971; Ackerman, 1973). В промышленно развитых странах использование некоторых озер и водохранилищ ограничено из-за загрязнения.

4.10.4.2. Мероприятия, не связанные с созданием водохранилищ. Водохозяйственные мероприятия, не связанные с созданием водохранилищ, также оказывают влияние на качество воды из-за изменений скорости движения воды и глубин русла (Karr, 1978).

Даже мероприятия, которые не изменяют скорости и глубины потока, оказывают влияние на качество воды тем, что они могут вызывать изменения условий землепользования. Таким образом, для правильной оценки воздействия проектируемых мероприятий на окружающую среду важно учитывать условия использования земель и другие возможные изменения, не связанные непосредственно со схемой проекта (Worthington, 1977; Недра, 1978; Шикломанов, 1976; HEC, 1977s; Карасев, 1975).

4.10.5. Влияние проектируемых мероприятий на движение наносов

В проблемах исследования стока наносов можно выделить три большие области: а) отложение наносов в водохранилищах; б) сток наносов рек и водотоков; в) перемещение наносов в эстуариях и прибрежной полосе. Основные различия проблемы наносов между водохранилищами и эстуариями определяются отличием сил, действующих на твердые частицы: в водохранилищах поведение частицы определяется в основном действием гравитации, в то время как в эстуариях доминирующее воздействие оказывают ветры и приливы. Кроме того, при прохождении потока через эстуарии происходят большие изменения в химическом составе. Проблемы наносов в эстуариях и на прибрежных участках в Руководстве не рассматриваются.

4.10.5.1. Водохранилища. Сток наносов является одним из ключевых вопросов в проблемах расчета водохранилищ. Под стоком наносов понимается суммарное количество твердых частиц, поступающих в водохранилище. Описание некоторых методов расчета стока наносов можно найти в работах (HEC, 1977v, с. 5.01; Vanoni, 1975, с. 437; Караушев, 1977), а также в работах, которые упоминались в п. 4.8.5 об условиях заиления водохранилищ.

Единицей измерения стока наносов обычно является тонна за год. От такой единицы измерения удобно перейти к объему наносов, который необходим при оценке плотности и отложений. В работе (HEC, 1977b, с. 2.01) приводятся типичные значения выноса наносов для различных условий, но они могут рассматриваться лишь как самое первое приближение для предполагаемых участков строительства водохранилищ и должны по возможности дополняться измерениями на уже созданных водохранилищах в ближайших районах. Объем наносов, которые могут накопиться в водохранилище за период его эксплуатации, оценивается простым способом, основанном на эффективности осаждения наносов в водохранилище (HEC, 1977b, с. 5.05; Vanoni, 1975, с. 580). Твердые частицы откладываются в водохранилище в виде конуса, вершина которого располагается в конце верхнего бьефа с постепенным наслоением по направлению к плотине. В конечном счете по мере отложения наносов могут быть затронуты все уровни наполнения водохранилища. В верхнем бьефе могут образовываться заводи, так как накопление наносов приводит к уменьшению уклонов речного русла, что в свою очередь еще больше повышает

скорости осаждения твердых частиц. В Гидрологическом инженерном центре (HEC, 1977b, с. 5.01) разработан простой способ расчета распределения объема отложений наносов в водохранилище, а также создана вычислительная программа, реализующая детальный расчет объема отложений по поперечным сечениям водохранилища (HEC, 1977). Методы оценки движения наносов в реках с гидроэнергетическими установками приводятся в работе (HEC, 1977b, с. 5.32), где рассматриваются также методы для расчета размыва русла в нижнем бьефе плотины. В последней работе можно найти также описание возможных влияний размывов и отложений наносов, происшедших в главном русле, на сток наносов притоков. Так как сооружение водохранилища, как правило, приводит к уменьшению естественной изменчивости речного стока, то русловые деформации в нижнем бьефе не могут быть такими значительными, как кажется на первый взгляд. Явное нарушение естественных условий стока наносов компенсируется снижением транспортирующей способности водного потока из-за уменьшения изменчивости режима речного стока (HEC, 1977b). Аналитические методы расчета реализованы в программах для ЭВМ (HEC, 1977b и 1977d). Вычислительная программа (HEC, 1977d) может применяться в исследованиях как размывов нижних бьефов плотин, так и отложений наносов в водохранилищах. Можно отметить, что недостаточное количество экспериментальных данных о режиме и составе наносов является существенным тормозом в развитии многих исследований по русловым деформациям.

Заилению водохранилищ способствует также водная растительность. Отмирающие растения накапливаются в водохранилище и оказывают влияние как на полезный объем, так и на качество воды. В тропических районах водяные гиацинты могут производить на гектаре до 1 т органических отложений в сутки (Guadiana, 1976).

4.10.5.2. Мероприятия, не связанные со строительством водохранилищ. Вопросы, связанные с расчетом стока наносов, являются существенно более сложными, чем грубые оценки объемов дноуглубительных работ в целях навигации, к расчету которых сводилась данная проблема до начала эры вычислительных машин. Расчет стока наносов связан в основном с особенностями материала, из которого сложено русло, и воздействием речного потока, часто в двух и трех измерениях. Сначала разрабатывались методы расчета одномерного потока (HEC, 1977d). При оценках русловых деформаций принимались упрощения, а полученные результаты интерпретировались специалистами, имеющими опыт в речной морфологии. Затем было разработано несколько двухмерных моделей транспортирования наносов, которые могли быть использованы и в расчетах заиления водохранилищ (Orlob, 1977). Часто в проблемах исследования русловых деформаций и транспорта наносов требуются физические модели. Например, исследование местных размывов и отложений в русле вблизи построенного

сооружения является проблемой, связанной с транспортом наносов, но она требует также испытаний на гидравлической модели, потому что турбулентность, вызванная размывом, не может быть прямо связана с аналитическими функциями транспорта наносов.

4.10.6. Влияние проектируемых мероприятий на подземные воды

Хозяйственная деятельность на водосборах и в руслах рек, приводящая к изменениям условий инфильтрации, просачивания поверхностных вод в водоносные горизонты, оказывает влияние на естественный режим подземных вод. Описание общих вопросов гидрологии подземных вод дается в работе Соколова (Sokolov, 1974, с. 64), а детальное обсуждение физических механизмов просачивания и стекания — в работе Биара (Bear, 1968).

Влияние хозяйственной деятельности на естественный режим подземных вод начинается с изменения условий использования земли на водосборе (Unesco, 1974, 1980; Недра, 1978). Урбанизация территорий имеет тенденцию увеличивать поверхностный сток и уменьшать поступление поверхностных вод в подземные водоносные горизонты. Для того чтобы нейтрализовать эту тенденцию, применяются способы искусственного водообмена. На запасы подземных вод существенное влияние может оказывать эвапотранспирация (Sokolov, 1974, с. 79).

Мероприятия по регулированию речного стока такие, как водохранилища и преобразование речных русел, могут как увеличивать, так и уменьшать водообмен поверхностных и подземных вод. В работах, опубликованных ЮНЕСКО (Unesco, 1974, 1980), рассматриваются вопросы влияния водохранилищ на подземный сток. Влияние береговых укреплений рек и водохранилищ на подземные воды является важным вопросом. При их проектировании необходимо рассчитывать утечку воды через земляные дамбы и перемычки (Bureau of Reclamation, 1977, с. 165). В Гидрологическом инженерном центре разработаны методы (HEC, 1972b), с помощью которых можно моделировать влияние проектируемых водохранилищ и других мероприятий на режим подземных вод (см. также работу Фрида (Fried, 1975)).

4.10.7. Влияние проектируемых мероприятий на температурный режим воды

4.10.7.1. Водохранилища. При изучении температурного режима в нижнем бьефе водохранилища необходимо учитывать глубину, с которой поступает вода, а также объем сбрасываемой воды. Кроме того, важно учитывать метеорологические условия, чтобы выделить влияние местного климата и его изменений на температурный режим воды. Расчет взаимодействия воздушных и водных масс выполняется в основном методом теплового баланса, а также с помощью некоторых эмпирических формул и параметров, которые приводятся в работах (Orlob, 1977; Ackermann, 1973; IHD

Norden, 1975, с. 91—94; Starosolszky, 1969, с. 31—36). Влияние водохранилища на температурный режим вниз по течению реки быстро уменьшается по мере удаления от створа плотины.

4.10.7.2. Мероприятия, не связанные с созданием водохранилищ. Хозяйственная деятельность на водосборах рек обычно слабо сказывается на температурном режиме воды. Однако при отводах воды водозаборами, вызывающими уменьшение расходов, температура воды в главном русле, а также в водозаборе может изменяться. При межбассейновых перебросках могут происходить некоторые изменения в температурном режиме вод обоих водосборов. Во всех случаях для расчета изменений температурного режима используются методы водного и теплового баланса (IHD Norden, 1975, с. 91—94; Starosolszky, 1969, с. 31—36).

4.10.8. Влияние водохозяйственных мероприятий на ледовый режим

В районах, где температура воздуха опускается ниже нуля в определенные периоды года, а реки и озера в той или иной степени покрываются льдом, проектируемые водохозяйственные мероприятия естественно будут вносить изменения и в ледовый режим.

4.10.8.1. Водохранилища. Регулирование речного стока водохранилищами, вызывающее увеличение и (или) изменение расходов воды в зимний период, будет приводить к существенным изменениям ледового режима как в верхнем, так и в нижнем бьефах. Колебания уровней воды в водохранилище увеличивают степень разрушаемости ледяного покрова у берегов и приводят к перемещению обломков льда или к образованию торосов, особенно вблизи крутого и (или) неровного берега (Starosolzky, 1969).

Изменения ледового покрова водохранилища определяются объемом срабатываемой воды и изменениями площади зеркала воды в результате сбросов. Самые большие изменения происходят в нижнем бьефе водохранилища в результате существенных изменений естественных режимов стока и температуры воды. Повышенное образование шуги и донного льда могут приводить к заторным и зажорным явлениям, которые, в свою очередь, увеличивают вероятность появления паводков и потоков воды поверх льда. Для борьбы с этими явлениями разработаны различные меры, например, постройка специальных порогов или сооружений, сужающих речное русло (Starosolszky, 1969). Чем с больших глубин осуществляются попуски воды из водохранилищ, тем более высокую температуру будет иметь сбрасываемая вода в зимний период. Это может приводить к увеличению длины участков, свободных от ледяного покрова, и к уменьшению толщины льда в нижних бьефах водохранилищ. В расчетах обычно применяются методы теплового баланса вода/воздух, а также динамики ледового покрова (Starosolszky, 1969).

Повышение расходов воды в зимний период будет приводить также к увеличению объемов пресной воды, поступающих в прибрежные зоны, что может вызвать усиленное ледообразование в

этих местах. Это явление уменьшается, если располагать отверстия водовыпусков пресной воды на большей глубине или снабжать их пенообразующими устройствами (Starosolszky, 1969, с. 130—141).

4.10.8.2. Мероприятия без создания водохранилищ. Мероприятия, не связанные с сооружением водохранилищ, обычно оказывают меньшее влияние на ледовый режим. Однако меры по улучшению русел, приводящие к изменению скорости течения воды, могут сказываться на условия ледообразования. Оказывают влияние на ледовый режим также водоотведение и межбассейновые переброски стока (Starosolszky, 1969, с. 130—141).

4.10.9. Использование вычислительных программ в расчетах речного стока и исследованиях качества воды

Крупномасштабные мероприятия по использованию водных ресурсов оказывают большое влияние на количество и качество воды водных объектов по сравнению с предпроектными условиями. Разработаны различные методы, которые помогают проектировщикам проводить анализ и количественно оценивать ожидаемые изменения. Некоторые из менее трудоемких методов могут использоваться для расчетов вручную, а наиболее надежные методы требуют применения больших вычислительных систем. Методические процедуры для выполнения всестороннего анализа речного бассейна представляют собой в основном различные сочетания описанных ранее методов и приемов. В проблемах комплексного использования водных ресурсов, стоящих на повестке дня, важное значение приобретает надежное моделирование речного водосбора или речной системы, так как всесторонний анализ изменений, вносимых хозяйственной деятельностью, требует во многих случаях оценки результирующего воздействия на больших расстояниях вниз по течению реки.

Водохранилища, особенно крупные, проектируются, как правило, для многоцелевого использования (гидроэнергетика, регулирование стока, рекреация, навигация, рыбоводство, коммунальное и промышленное водоснабжение, ирригация и в некоторых случаях улучшение качества воды). Экономическая эффективность использования водохранилища для любой из названных целей (например, регулирование стока) находится часто в прямой конкуренции с эффектом от использования для других целей (например, гидроэнергетика, рекреация, водоснабжение и т. д.). Другие водохозяйственные мероприятия включают укрепление берегов, канализацию русел, дноуглубление, создание гаваней, улучшение эстуариев, защиту от наводнений, строительство шлюзов и обвалований, межбассейновые переброски стока, изменения землепользования, строительство установок по использованию сточных вод для орошения, водозаборов и водосбросов в реки. Этот перечень, далеко неполный, дает представление о типах проектируемых мероприятий по использованию водных ресурсов, которые могут ока-

зывать влияние на количество и качество воды. Для количественных оценок воздействий, оказываемых мероприятиями различных типов, требуются различные модели (см. приложение к главе 4).

Список литературы

Ackermann W., White Gilbert, Worthington E. B. (eds.) 1973. Man-made lakes: Their problems and environmental effects, geophysical monograph 17. — Washington D. C., American Geophysical Union. B-2.

Bear J. Zaslavsky D., Irmay S. 1968. Physical principles of water percolation and seepage. — Paris, Unesco. A-7 [1].

Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interrior. 1977. Design of small dams. — Washington D. C., U. S. Govt. Printing Office. B-57 [2].

Cembrowicz R. G., Hahn H. H., Plate E. J., Schultz G. A. 1978. Aspects of present hydrological and water quality modelling. — J., of ecological modelling, 5. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company (p. 39—66). B-11.

Chow Ven te (ed.) 1964. Handbook of applied hydrology. — New York, McGraw-Hill. B-27 [2].

Detwyler T. R. (ed.). 1971. Man's impact on environment. — New York McGraw-Hill. B-27 [2].

Fried J. J. 1975. Groundwater pollution. Theory, methodology, modelling and practical rules. — Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. B-11.

Guadiana A. J., Saldana H. C. 1976. Water hyacinth in Mexico: Problems and solutions. — Proceedings of the XII Congress of the International Commission on Large Dams (vol. 3, p. 913), Mexico City. Paris, International Commission on Large Dams. A-6.

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1972a. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 2. Hydrologic data management. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758905). B-32, B-52 [2].

HEC. 1972b. Hydrologic engineering methods for resources development. Vol. 10, Principles of ground-water hydrology. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 758906). B-32, B-52 [2].

HEC. 1972c. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 11. Water quality determinations. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N 762109). B-32, B-52 [2].

HEC. 1975. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 6. Water surface profiles. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A017435). B-32, B-52 [2].

NEC. 1976. Hydrologic Engineering methods for water resources development. Vol. 7. Flood control by reservoirs. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052598). B-32, B-52 [2].

HEC. 1977a. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 9. Reservoir system operation for conservation. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California. (NTIS Order, N A052599). B-32, B-52 [2].

HEC. 1977b. Hydrologic engineering methods for water resources development. Vol. 12. Sediment transport. — U. S. Contribution to the International Hydrological Decade. California (NTIS Order, N A052600). B-32, B-51.

HEC. 1977s. STORM, Urban storm water runoff, users manual. — California. B-52 [2].

HEC. 1977d. HEC-6, Scour and deposition in rivers and reservoirs, users manual — California B-52 [2].

HES. 1978. WQRRS, Water quality for river-reservoir systems, users manual. — California. B-52.

HEC. 1979. HEC-5, Simulation of flood control and conservation systems, users manual. — California. B-52 [1].

[1] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

[2] Из основных изданий на английском языке.

IHD Norden. 1975. Inadvertent effects of man on the hydrological cycle, A Nordic Casebook. Nordic report, n 8. — Oslo, Norweigian Hydrological Committee. B-36 [2].

Карасев И. Ф. 1975. Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 287 с. В-68.

Караушев А. В. 1977. Теория и методы расчета речных наносов. — Л.: Гидрометеоиздат. — 272 с. В-68.

Karr J. R., Schlosser I. J. 1978. Water resources and the landwater interface. — Washington D. C., Scince Magazine (p. 229—234, vol. 201). B-45.

Krambeck H. J. 1974. Energy balance and exchange in a lake: Example of a mathematical analysis of limnological processes, (in German). — Arch Hydrobiol, 73 (1) (English summary). West Germany, Verlagsbuchhandlung B-12.

Кривенцов М. И., Тарасов М. Н. 1976. Прогнозирование минерализации и содержания главных ионов в воде водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат. — 112 с. В-68.

Недра. 1978. Оценка изменений гидрологических условий под влиянием производственной деятельности. — М.: Недра. — 264 с. В-72.

Orlob G. T. 1977. Mathematical modelling of surface water impoundments. — California, Resource Management Associates, Inc. B-42 [1].

Плешков Я. Ф. 1975. Регулирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат. — 558 с. В-68.

Rodier J. A. 1974. Influence des grands amenagements hydroliques sur le cycle hydrometeorologique et l'environmennement. — XIIIes Journees de l'hydraulique, Question 5, Rapport General. Paris, Societe Hydrotechnique de France. B-46 [3].

Шикломанов И. А. 1976. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. — Л.: Гидрометеоиздат. — 79 с. В-68.

Шикломанов И. А. 1979. Антропогенные изменения водности рек. — Л.: Гидрометеоиздат. — 302 с. В-68.

Sokolov A. A., Chapman T. G. 1974. Methods for water balance computations. — Paris, Unesco (Studies and reports in hydrology 17). A-7 [4].

Starosolszky O. 1969. Ice on hydraulic engineering. Division of hydraulic engineering, University of Trondheim, report, n. 70—1. — Trondheim, Norges Teknishke Hogskele. B-35.

Straskraba M. 1973. Limnological models of reservoir ecosystem. — International sumposium on eutrophication and water pollution control, October, 1973, Castle Reinhardsbrunn, DDR, sponsored by hydrological section of the biological soc. of DDR and hydrology section of the Technical University of Dresden. B-49.

Сыроежин М. И. 1974. Обоснования водохозяйственных комплексов. — Л.: Энергия. — 271 с.

U. S. Department of the Army, Office of the Chier of Engineers. 1969. Routing of floods through river channels. Engineering Manual 1110—2—1408. — Virginia. V-51.

Unesco. 1974. Hydrological effects on urbanization. — Paris (Studies and reports in hydrology, 18). A-7.

Unesco. 1980. Casebook of methods of computation of quantative changes in the hydrological regime due to human activities. — Paris (Studies and reports in hydrology, 28). A-7.

Vanoni V. (ed.). 1975. Sedimentation engineering. — J. Hyd. Div., 96 (11), New York, American Society of Civil Engineers (Manuals and reports on Engr Practice, n. 54). B-3 [1].

Whipple W., Jr. 1977. Planning of water quality systems. — Massachusetts, D. C. Heath and Company. B-9.

Worthington E. Barton (ed.) 1977. Arid irrigation in developing countires: environmental problems and effects. — London, Pergamon Prees. B-38.

---

[1] Из основных изданий на английском языке

[2] Бесплатно.

[3] Цена 30 фр.

[4] Распродана. Обращайтесь в библиотеки.

Приложение к главе 4

„Методы гидрологических расчетов, используемые при водохозяйственном проектировании“

Обобщенные математические модели

Обобщенная математическая модель, т. е. вычислительная программа, используется в расчетах, выполняемых по отдельным участкам рек или водосборам, имеющим существенные различия в физико-географических условиях. За некоторым исключением модель используется без каких-либо модификаций. При описании расчетов в настоящем Руководстве упоминались только обобщенные математические модели, готовые к применению и хорошо документированные. В этом приложении будут обсуждаться преимущества и недостатки, непосредственно влияющие на выбор модели. Детальное описание каждой вычислительной программы можно найти в соответствующих документах, на которые делаются ссылки. Все рассматриваемые программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН. Модели частных фирм в обзор не включены. Более подробное описание некоторых моделей можно найти в работе Бауэрса (Bowers, 1972). Несколько моделей, не вошедших в это Руководство, рассматриваются в работе Орлоба (Orlob, 1977, приложение С). Сравнительный анализ некоторых программ, разработанных в основном для гидрологических расчетов, связанных с урбанизированными территориями, проведен в работах (Brown, 1977; Brandstetter, 1967).

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) начала в 1964 г. и завершила в 1974 г. международный проект анализа концептуальных моделей «осадки — сток», используемых в практике оперативных гидрологических прогнозов. Цель этого проекта заключалась в сборе сведений и сравнении оперативных моделей «осадки — сток», которые реализованы на ЭВМ для краткосрочных прогнозов речного стока, а также в подготовке соответствующих рекомендаций по применению таких моделей для прогноза в различных ситуациях с учетом особенностей условий и точности расчетов. В проекте рассматривались результаты применения 10 вычислительных программ, представленных из семи стран для шести стандартных речных водосборов с различными климатическими физико-географическими условиями. В ВМО (WMO, 1975) подготовлен заключительный доклад по этому проекту. В 1976 г. начался второй международный проект как продолжение первого для сравнения моделей снеготаяния, используемых для прогноза стока весеннего половодья. В нем рассматриваются 14 таких моделей для семи стандартных водосборов, представленных семью странами-участницами.

Некоторые из наиболее распространенных обобщенных моделей обсуждаются ниже. Многие из разработанных моделей в данном Руководстве не рассматриваются.

1. HEC-1

HEC-1 (HEC, 1973) является моделью единичного ливня и неприменима для моделирования условий за длительный промежуток времени. По этой программе могут выполняться стандартные расчеты гидрографа стока, сформированного осадками, а также стока со сложного речного водосбора с разветвленной речной сетью. Ряды по осадкам необходимо представить в виде единичных предполагаемых или наблюдаемых дождей, так как использование сведений о потерях осадков в периоды отсутствия дождей не предусмотрено.

Программу можно использовать для оптимизации отдельных параметров процессов «осадки — сток» или трансформации стока, чтобы получить наилучшее соответствие с наблюденными гидрографами и осадками.

В режиме моделирования водосбора программа снабжена некоторыми блоками, по которым предусмотрен ввод и расчет распределения осадков, обработка осадков (жидких и твердых), расчет потерь и излишков жидких и твердых осадков, определение гидрографа стока с отдельных участков бассейна по методу единичного гидрографа и расчет трансформации гидрографов с помощью гидрологических методов. Предусмотрена возможность графического вывода на дисплей гидрографов и графиков хода осадков. Программа широко использовалась для исследования регулирования паводков и половодий. Она может применятся для моделирования систем водохранилищ, при котором попуски из водохранилищ основаны на фиксированных соотношениях между расходами и накоплением воды в водохранилище.

2. SSARR

Модель SSARR (U. S. Army Corps of Engineers, 1975) является моделью непрерывной имитации и предназначена для определения речного стока, формирующегося на водосборе в процессе снеготаяния и от жидких осадков. Эта модель состоит из трех основных частей:

а) генерализованной модели речного водосбора для расчета стока от снеготаяния или жидких осадков, а также от их сочетания;

б) модели речной системы для расчета трансформации речного стока от верхней до нижней точки вдоль русла или озеровидного водоема. Речной сток можно рассчитать как функцию многих корреляционно связанных переменных, включая влияние морских приливов и водохранилищ;

в) модели регулирования паводочного стока водохранилищами (при известных оттоке и объеме водохранилища) может использоваться для анализа в соответствии с предварительно определяемым или моделируемым притоком. Исходными данными для модели являются попуски из водохранилища; они могут также опре-

деляться по фиксированным соотношениям с расходами речной воды.

Эффективность использования модели зависит от надежности определения различных параметров и связей, установленных для отдельного водосбора или речной системы. Одни соотношения являются общими и поэтому применяются для различных бассейнов и их частей, другие специально устанавливаются для каждого отдельного водосбора.

Модель SSARR способна имитировать и малые водосборы в различных климатических условиях при наличии или отсутствии процесса снеготаяния. Параметры, использованные в разработке блока снеготаяния, получены для условий горных областей северо-запада США.

3. Модель имитации гидрологических условий водосбора

Программа имитации гидрологических условий (Johanson, 1979; Grimsrud, 1979) как развитие модели водосбора р. Стенфорд (Crawford, 1966) является моделью, воспроизводящей особенности водосбора, т. е. она может использоваться для оценки гидрологического режима сложных речных бассейнов, но не для анализа работы водохранилищ в этих бассейнах. Эта модель является двухфазной, и в ней условия подстилающей поверхности и русловой сети обрабатываются раздельно. Первая фаза моделирует условия перехвата вод, инфильтрации, поверхностного стекания, внутрипочвенного стока, эвапотранспирации и аккумуляции воды в депрессиях. Она также выполняет расчет запаса и стока подземных вод и накопления воды в различных почвенных зонах. Эта фаза модели использует осадки и другие климатические данные в качестве исходной информации для расчета речного стока, необходимого для второй фазы модели. Первая фаза содержит также блок, осуществляющий расчет движения влаги, используя описание изменяющихся условий влагопереноса и константы, представляющие физические особенности водосбора.

Вторая — русловая фаза модели — использует результаты вычисления по первой фазе для расчета гидрографа оттока воды также за два этапа. Сначала используется процедура типа время — площадь, по которой гистограмма руслового времени добегания переводится во время добегания оттока воды, проходящей по русловой сети. Этот вычисленный объем воды затем поступает в соответствующий блок, моделирующий характеристики запасов воды для русловой фазы. Таким образом данные, полученные на выходе первой фазы модели, обрабатываются на двух этапах второй фазы, которая, имитирует влияние русловой сети и осуществляет расчет гидрографа оттока воды с водосбора.

4. SWMM

Модель управления ливневым стоком, разработанная Агентством охраны окружающей среды США (Bradstetter, 1976; Huber,

1975; 1977) имитирует ливневые осадки и работу комбинированных дренажных систем. Используется для расчета стока с нескольких водосборов по дождевым осадкам и для определения расходов в точках пересечения русловой сети. Она может включать сведения о водозаборах, что позволяет рассчитывать запасы воды по поступлению и отводу ее из бассейна реки. Дополнительный блок программы включает расчет неустановившегося движения и массопереноса в двумерном (с вертикальным перемешиванием) потоке.

По каждому моделируемому водосбору для периода без дождей и периода ливневых осадков рассчитывается количество взвешенных и влекомых наносов, биохимические и химические требования к содержанию кислорода, бактерий, фосфора, азота, нефти и масел и трансформация их по речной системе. Программа ограничена моделированием единичного ливня.

5. Модель резервуара (Танк-модель)

В Национальном научно-исследовательском центре по предупреждению стихийных бедствий в Японии (Japanese National Research Center for Disaster Prevention) разработана модель резервуара (Sugawara, 1974; 1979) для анализа стока в районах избыточного и недостаточного увлажнения. В районах избыточного увлажнения в течение периода моделирования стока почва принимается всегда влажной (или от осадков или от грунтовых вод). Версия программы для районов недостаточного увлажнения используется для оценки почвенной влаги, поступающей в определенном количестве в верхнюю часть резервуара. Водосбор разделяется на ряд влажных и сухих зон, размеры которых меняются в зависимости от количества осадков и перехода их в почвенную влагу.

Сток с водосбора представляется в виде серии вертикальных резервуаров, с оттоком в вертикальном и в горизонтальном направлениях. Объем воды в резервуарах является функцией объема воды, задерживающейся в различных частях почвенного столба. Отток воды из резервуаров является функцией скорости стекания через почвенный слой и скорости инфильтрации в следующий нижерасположенный резервуар. Самый верхний резервуар представляет собой поверхностный сток, второй — внутрипочвенный сток, а третий, четвертый и остальные резервуары отражают почвенную влагу глубоких слоев и подземный сток. Эвапотранспирация осуществляется из верхнего резервуара. Накопленный по отдельным частям бассейна отток поступает в речное русло, где осуществляется расчет трансформации стока с использованием также резервуаров. Рассчитанный ряд оттока воды определяет время запаздывания и истощения трансформируемого гидрографа.

Танк-модель успешно использовалась на различных реках Японии. Описание основных частей программы и кодов для ЭВМ даются в приложении к работе Сугавара (Sugawara, 1974).

6. Линейно несвободная система (CLS)

При использовании приближения линейно несвободной системы (CLS) для моделирования «осадки — сток» (Martinelli, 1977) непрерывный процесс перехода осадков в сток представлен в виде простых линейных систем, описывающих процесс в один и тот же момент времени. Основное внимание обращается на простоту и минимальное число линейных систем для получения удовлетворительной точности, т. е. расхождения между наблюдаемыми и моделируемыми значениями расходов. При использовании квадратичных уравнений и линейно несвободных систем можно применять многократные вводы и одновременно получать индивидуальные оценки функций отклика (мгновенные единичные гидрографы, которые имеют минимальную дисперсию и малое смещение). CLS-приближение заключается в определении избытка осадков для рассматриваемой площади водосбора на основе осадков, выпавших за предшествующий период. Для сложных водосборов с подробными данными наблюдений можно выделить в осадках ту часть, которая идет на питание подземных вод, а также учесть расходы вверх по течению, если такие данные имеются, и использовать их в качестве отдельных исходных трансформированных функций, выводимой CLS.

Было экспериментально установлено, что трех входов бывает обычно достаточно для получения удовлетворительного соответствия и что дальнейшее увеличение входов не оказывает заметного влияния на точность предсказаний из-за значительных погрешностей измерений данных по осадкам и стоку. Приближение CLS дает сравнительно точные предсказания при минимальном количестве исходных данных и является экономичным в смысле использования ЭВМ. CLS-приближение применялось при разработке математической модели р. Арно в Италии, а также при моделировании р. Нил и его основных притоков (Martelli, 1977).

7. STORM

Модель «Накопление, Очистка, Поверхностный сток» (STORM) (Brandstetter, 1976; HEC, 1977) разработана для использования в исследованиях при водохозяйственном планировании накопительных и очистных объемов, необходимых для уменьшения загрязнения поверхностного стока. По этой программе можно также рассчитывать диаграммы загрязняющих веществ (скорости распространения загрязнения), которые могут быть использованы в моделях речного стока.

Поскольку программа STORM предназначена для применения в исследованиях по планированию и включает проверку различных вариантов, то некоторые из ее аналитических методов нуждались в упрощении. Например, для расчета стока используется метод коэффициентов и метод SCS , разработанный Службой охраны почв США. По методу коэффициентов расчет стока основан на взвешенных по площади используемой земли коэффициентах

стока, рассчитанных для часовых превышений осадков после заполнения поверхностных понижений. Коэффициент стока является функцией только относительного стекания с проницаемых и непроницаемых участков водосбора. Предшествующие условия и интенсивность дождя по этому методу не принимаются в расчет.

Метод SCS с семейством кривых считается более обоснованным физически, чем метод коэффициентов поверхностного стока. Метод SCS реализует нелинейную связь между аккумулируемыми осадками и стоком. Так как программа STORM имитирует нелинейный процесс, то она была дополнена процедурой расчета семейства кривых для каждого случая дождя с учетом длительности в часах бездождного предшествующего периода, эвапотранспирации и просачивания за предшествующий период. Единичные гидрографы могут использоваться затем для перевода превышений поверхностного стока в гидрографы стока с бассейна.

По программе выполняются расчеты количества и концентраций для шести основных показателей качества воды — взвешенные и выпадающие в осадок твердые вещества, биохимический показатель содержания кислорода, содержание азота, ортофосфатов и бактерий. Урбанизированные и неурбанизированные территории могут иметь описания различных видов использования земли (до 20 видов). Кроме того, программа STORM может использоваться для расчета снеготаяния, количества и качества воды в засушливый период, эрозии поверхности земли.

Программа STORM может также воспринимать гидрографы стока как исходную информацию для расчета смываемых элементов при оценках загрязнения.

8. WQRRS

Модель оценки качества воды в системе река — водохранилище (WQRRS) создана в Гидрологическом инженерном центре для изучения экологии рек и водохранилищ (HEC, 1978). Модель состоит из трех отдельных, но взаимосвязанных модулей для расчетов водохранилища, для гидравлических расчетов и для оценки качества воды. Каждый модуль оформлен как самостоятельная программная единица и может выполняться независимо. При выполнении анализа качества воды сложного речного бассейна можно объединить все три модуля.

Раздел программы, называемый модулем для расчета водохранилища, осуществляет оценку качества воды по глубине водохранилища, выполняя последовательный анализ по отсекам, заключенным между горизонтальными контурами другого параметра, которые можно рассматривать как одномерные системы. Это приближение обычно хорошо удовлетворяется на озерах с большим периодом водообмена и в меньшей степени выдерживается на мелких водоемах или в водоемах с быстрой сменой воды. Системы с малым периодом водообмена часто полностью перемешаны и могут рассматриваться как медленно перемещаю-

щиеся потоки, которые обрабатывают по второму модулю модели.

Второй раздел программы — модуль гидравлических расчетов — включает шесть вычислительных опций. Этот модуль способен воспроизводить гидравлическое поведение как «постепенно изменяющегося» установившегося потока, так и потока с неустановившимся режимом. Модуль может обрабатывать максимальные расходы дождевых паводков и попуски из водохранилища для удовлетворения запросов гидроэнергетики.

В модуле оценки качества воды вводятся показатели качества воды и скорости их перемещения, по которым рассчитываются максимальные объемы загрязняющих веществ в установившихся и неустановившихся потоках. Модуль гидравлических расчетов программы WQRRS имеет два автоматических вывода информации для использования в модели STORM. Практическое руководство для применения различных моделей качества воды в исследованиях по планированию водохозяйственных мероприятий приводится в (Grimsrud, 1975).

9. HEC-5

Программа HEC-5 предназначена для оценки работы систем водохранилищ на стадии проектных исследований и для расчетов размеров противопаводочной и полезной емкости водохранилища для удовлетворения требований, предъявляемых к каждому водохранилищу из объединенных в систему. Программа может также использоваться для оценки предпроектных условий и влияния существующих и проектируемых водохранилищ на расходы воды и опасные центры в системе. Программа облегчает определение попусков из водохранилищ для пропуска непредвиденных паводков через систему, при условиях возможной минимизации паводочных сбросов или возможно быстрого освобождения системы, в то же время сохраняя сбалансированность противопаводочных емкостей водохранилищ системы.

Перечисленные цели достигаются моделированием последовательной работы водохранилищ многоцелевого назначения, объединенных в систему любой конфигурации. Для моделирования могут использоваться данные фактических наблюдений и искусственные ряды как с короткими, так и с длинными беспаводочными периодами. Конкретно, программа может использоваться, чтобы определить:

а) противопаводочный и полезный объемы водохранилища для удовлетворения различных требований (включая гидроэнергетику) для каждого входящего в систему водохранилища;

б) влияние системы водохранилищ на пространственное и временное распределение стока в бассейне;

в) оценку критериев работы водохранилищ в условиях регулирования паводков и половодий, а также в условиях аккумуляции воды (с учетом требований гидроэнергетики);

г) оценку ожидаемого среднегодового ущерба от паводка, затрат на создание системы водохранилищ и экономической эффективности за счет уменьшения материального ущерба, причиняемого паводком;

д) оценку существующей и проектируемой систем водохранилищ или других альтернатив, включая решения, не связанные с созданием водохранилищ, которые могут дать максимальную экономическую прибыль от регулирования паводочных вод, и обсчет вариантов для выбранных альтернативных систем.

Модель позволяет определить попуски из водохранилища, исходя из условий нижнего бьефа, и не ограничена фиксированными соотношениями поступления и оттока воды из водохранилищ.

В некоторых других странах разработаны модели примерно с такими же возможностями (United Nations, 1978).

Список литературы

Bowers C. E., Pabst A. F., Larson S. P. 1972. Computer programs in hydrology. — Water Resources Research Center bulletin, n 44. Minnesota, University of Minnesota. B-59 [1].

Bowers C. E., Chu C. S. 1977. Computer programs in water resources. — Water Resources Research Center bulletin, 97. Minnesota, University of Minnesota. B-59.

Brandstetter A. 1976. Assessment of mathematical models for storm and combined sewer management, for Environmental Protection Agency, in technology Series, EPA — 600/2—76—175a — Washington D. C., Environmental Protection Agency. B-55 [2].

Brown J. W. et al. 1974. Models and methods applicable to Corps of Engineers urban studies. — U. S. Army Enginer Waterways Experiment Station (miscellaneous paper H—74—8). (NTIS Order, N AD 786—516). B-32.

Crawford N. H., Linsley R. K. 1966. Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model 4, technical report 39. — Michigan, Stanford University, Department of Civil Engineering. B-48 [3].

Grimsrud P. G., Finnemore E. J., Owen H. J. 1975. Evaluation of water quality models, a management guide for planners. Prepared for U. S. Environmental Protection Agency, EPA 600/—5—5—004. — Washington D. C., Environmental Protection Agency. B-55 [4].

Grimsrud P. G., Franz D. D., Johason R. C., Grawford N. H. 1979. Executive summary for hydrological simulation program — FORTRAN. EPA Contract 68—01—5801. — Washington D. C., Environmental Protection Agency (80 p.). B-55 [4].

Huber W. C. a. o. 1975. Storm water management model, users manual — varsion 2. EPA 670—2—75—017. — Washington D. C. Environmental Protection Agency. — 351 p. (NTIS Order, NPB — 257809). B-32.

Huber W. C. a. o. 1977. Storm water management model. Level 1. Preliminary Screening Procedures EPA Project, NR — 802411. — Washington D. C., Environmental Protection Agency. — 286 p. (NTIS Order, NPB — 259916/AS). B-32.

---

[1] Распродана. Обращайтесь в библиотеку Университета Миннесоты.

[2] Из основных изданий на английском языке.

[3] Продаются ксерокопии примерно по 31 ам. долл., микрофиши — по 15 ам. долл.

[4] В сентябре 1980 г. еще не опубликована. Возможно не будет опубликована вообще.

Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers. 1973. HEC-1. Flood hydrograph package, users manual. — California. B-52.
HEC. 1977. STORM, Urban storm water runoff, users manual. — California. B-52.
HEC. 1979. HEC-5, Simulation of flood control and conservation systems, users manual. — California. B-52.
Johanson R. C., Imhoff J. C., Davis H. H. Jr. 1979. Users manual for the hydrological simulation program — FORTRAN, final report for EPA Grant R804971. — Washington D. C., Environmental Protection Agency (650 p.). B-32.
Orlob G. T. 1977. Mathematical modelling of surface water impoundments. — California, Resource Management Associates, Inc. B-42 [1].
Sugawara M., Ozaki E., Watanabe I., Katuyama S. 1974. Tank model and its application to Bird creek, Vollombi brook, Bikin river, Kitsu river, Sonaga river and Nam mune. — Tokyo, Japan, Science and Technology Agency (Research Note of National Research Center for Disaster Prevention). B-31 [2].
Sugawara M. 1979. Automatic calibration of the tank model. Bulletin, vol. 24, N 3. — Washington D. C., International Association of Hydrological Sciences (p. 375—388). A-4 [3].
U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division. 1975. Program description and users manual for SSARR model — (Streamflow synthesis and reservoir regulation). — Oregon. B-53.
United Nations. 1978. Water development and management. — Proceedings of the United Nations water conference, Mar del Plata, Argentina, March 1977, 4 vol. New York, Pergamon Press. B-38 [4].
Wallis, J. R. 1977. CLS: Constrained linear systems, mathematical models for surface water hydrology. — New York Wiley, p. 295—330. B-23.
WMO. 1975. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. — Operational hydrology report, n 7.
WMO, N 429. Geneva. A-10.

---

[1] Имеются ксерокопии. Цена 40 ам. долл. Основное издание на английском языке.
[2] В ограниченном количестве.
[3] В Англии.
[4] Цена около 40 ам. долл. плюс почтовые расходы.

Издания ЮНЕСКО, опубликованные в серии «Исследования и доклады по гидрологии»

1. The use of analog and digital computers in hydrology. Proceedings of the Tucson Symposium. June 1966/L'utilisation des calculatrices analogiques et des ordinateurs en hydrologie: Actes du collogue de Tucson, juin 1966. Vol. 1 et 2. *Co-edition IASH — Unesco/Coédition AIHS — Unesco.*

2. Water in the unsaturated zone. Proceedings of the Wageningen Symposium, August 1967/Leau dans la zone non saturée: Actes dy symposium de Wageningen, août 1967. Edited by/Edité par P. E. Rijtema & H. Wassink. Vol. 1 et 2. *Co-edition IAHS — Unesco/Coédition AIHS — Unesco.*

3. Floods and their computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, August 1967/Les crues et leur évaluation: Actes du colloque de Leningrad, août 1967. Vol. 1 et 2. *Co-edition LASH — Unesco — WMO/Coédition AIHS — Unesco — OMM.*

4. Representative and experimental basins. An international guide for research and practice. Edited by C. Toebes and V. Ouryvaev. Published by Unesco. (Will also appear in Russian and Spanish)/Les bassins représentatifs et expérimentaux: Guide international des pratiques en matière de recherche. Publié sous la direction de C. Toebes et V. Ouryvaev. *Publié par l'Unesco.* , (A paraitre égaliment en espagnol et en russe).

5. Discharge of selected rivers of the world/Débit de certains cours d'eau du monde/Caudal de algunos ríos del mundo/Расходы избранных рек мира. *Published by Unesco/Publié par Unesco.*

   Vol. I: General and regime characteristics of stations selected/Vol. I: Caracteristiques genérales et caracteristiques du régime des stations choisies/Vol. I: Caracteristicas y caracteristicas del régimen de las estaciones seleccionadas/Том I: Общие и режимные характеристики избранных станций.

   Vol. II. Monthly and annual discharges recorded at various selected stations (from start of observations up to 1964)/Vol. II: Débits mensuels et anneuls enregistrés en diverses stations selectionées (de l'origine des observations à l'année 1964)/Vol. II: Caudales mensuales y anuales registrados en diversas estaciones seleccionadas (desde el comienzo de las observaciones hasta el ano 1964)/Том II: Месячные и годовые расходы воды, зарегистрированные различными избранными станциями (с начала наблюдений до 1964 года).

   Vol. III: Mean monthly and extreme discharges (1965—1969)/Vol. III: Débits mensueles moyens et débits extr — êmes (1965—1969)/ Vol. III: Caudales mensuales medianos y caudales extremos 1965—1969)/Том. III: Среднемесячные и экстремальные расходы (1965—1969 гг.).

   Vol. III (part II): Mean monthly and extreme discharges (1969—1972)/Vol. III (parti II): Débits mensueles moyens et débits extrêmes (1969—1972)/Vol. III (parte II): Caudales mensuales medianos y caudales extremos (1969—1972)/Том III (часть II): Среднемесячные и экстремальные расходы (1969—1972 гг.).

   Vol. III (part III): Mean monthly and extreme discharges (1972—1975) (English, French, Spanish, Russian).

6. List of International Hydrological Decade Stations of the world/Liste des stations de la Décennie hydrológique international existant dans le monde/ Lista de les estaciones del Decenio Hidrológico Internacional del mundo/ Список станций международного гидрологического десятилетия земного шара. *Published by Unesco/Publié par l'Unesco.*

7. Ground-water studies. An international guide for practice. Edited by R. Brown, J. Ineson, V. Konoplyantzev and V. Kovalevski. (Will also appear in French. Russian and Spanish/Paraitra également en espagnol, en français et en russe).

8. Land subsidence. Proceedingsof the Tokyo Symposium, September 1969/ Assaissement du sol: Actes du colloque de Tokyo, septembre 1969. Vol. 1 et 2. *Co-edition IASH — Unesco/Coédition AIHS — Unesco.*

9. Hydrology of deltas. Proceedings of the Bucharest Symposium, May 1969/ Hydrologie des deltas: Actes du colloque de Bucarest, mai 1969. Vol. 1 et 2. *Co-edition IASH — Unesco/Coédition AIHS — Unesco.*

10. Status and trends of research in hydrology/Bilan et tendances de la recherche en hydrologie. *Published by Unesco/Publié par l'Unesco.*

11. World water balance. Proceedings of the Reading Symposium. July 1970/ Bilan hydrique mondial: Actes du colloque de Reading, juillet 1970. Vol. 1—3. *Co-edition IAHS — Unesco — WMO/Coédition AIHS — Unesco — OMM.*

12. Research of representative and experimental basins. Proceedings of the Wellington (NewZealand) Symposium, December 1970/Recherches sur les bassins représentatifs et expérimentaux: Actes du colloque de Wellington (N. Z.), décembre 1970. *Co-edition I(i)AHS — Unesco/Coédition AIHS — Unesco.*

13. Hydrometry: Proceedings of the Koblenz Symposium, September 1970/Hydrométrie: Actes du colloque de Coblence, septembre 1970. *Co-edition IAHS — Unesco — WMO/Coédition AIHS — Unesco — OMM.*

14. Hydrologic information system. *Co-edition Unesco — WMO.*

15. Mathematical models in hydrology: Proceedings of the Warsaw Symposium, July 1971/Les modéles mathématiques en hydrologie: Actes du colloque de Varsovie, juillet, 1971. Vol. 1—3. *Co-edition IAHS — Unesco — WMO.*

16. Design of water resources projects with inadequate data: Proceedings of the Madrid Symposium, June 1973/Elaboration des projects d'utilization des ressources en eau sans données suffisantes: Actes du colloque de Madrid, juin 1973. Vol. 1—3. *Co-edition IAHS — Unesco — WMO/Coédition AIHS — Unesco — OMM.*

17. Methods for water balance computations. An international guide for research and practice.

18. Hydrological effects of urbanization. Report of the sub-group on the Effects of Urbanization on the Hydrological Environment.

19. Hydrology of march-ridden areas. Proceedings of the Minsk Symposium, June 1972.

20. Hydrological maps. *Co-edition Unesco — WMO.*

21. World catalogue of very Large floods/Répertoire mondial des très fortes crues/Catálogo mundial de grandes crecidas/Всемирный каталог больших паводков.

22. Floodflow computation. Methods compiled from world experience.

23. Guidebook on water quality surveys. (In press).

24. Effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on water quality. Proceeding of the Amsterdam Symposium, October 1977,

convened by Unesco and organized by Unesco and the Netherlands National Committee for the IHP in co-operation with IAHS/Effets de l'urbanization et de l'industrialization sur le régime hydrologique et sur la qualité de l'eau. Actes du colloque d'Amsterdam, Octobre 1977, convoqué par l'Unesco et organisé par Unesco et le Comité natoinal des Pays-Bas pour le PHI en coopération avec l'AISH. (In press/Sous presse.)

25. World water balance and water resources of the earth.

26. Impact of urbanization and industrialization on water resources planning and management.

27. Socio-economicaspects of urban hydrology.

28. Casebook of methods of computation of quantitative changes in the hydrological regime of river basins due to human activities.

29. Surfase water and groundwater interaction.

30. Aquifer contamination and protection.

31. Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs. Vol. 1: Methodology. Vol. 2: Case studies.

32. Application of results from representative and experimental basins.

33. Groundwater in hard rocks.

34. Groundwater Models. Vol. 1: Concepts, problems and methods of analysis with examples of ther application.

35. Sedimentation Problems in River Basins.

36. Methods of computation of low stream flow.

37. Специфические аспекты гидрологических расчетов для водохозяйственного ного проектирования: Материалы Международного симпозиума. Ленинград, 3—7 сентября 1979 г.

38. Methods of hydrological computations for water projects.

Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании

Редакторы Т. С. Шмидт, Г. Г. Доброумова.
Технический редактор Т. В. Павлова.
Корректор А. В. Хюркес

Сдано в набор 08.08.84. Подписано в печать 17.10.84. М-16679. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Литер. гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 12,93. Кр.-отт. 11,0. Тираж 1000 экз. Индекс ГЛ-98. Заказ № 357. Цена 1 р. 40 к.

Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы и статистика» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191023. Ленинград, Д-23, Садовая, 21.