

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О.Г. Савичев, С.Ю. Краснощёков, Н.Г. Наливайко

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

*Допущено по образованию в области
природообустройства и водопользования
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки (специальностям)
280302*

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 627.815(075.8)

ББК 38.773я73

С13

Савичев О.Г.

С13 Регулирование речного стока: учебное пособие / О.Г. Савичев, С.Ю. Краснощёков, Н.Г. Наливайко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 114 с.

ISBN 5-98298-455-8

В учебном пособии излагаются основные сведения из области регулирования речного стока. Рассмотрены цель, задачи и методы расчета регулирования стока, основные параметры и классификации водохранилищ, подходы к определению потерь воды из водохранилищ и оценке их воздействия на окружающую природную среду, приведена информация о существующих и проектируемых крупных гидроузлах в мире и России. Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 280302 «Комплексное использование и охрана водных ресурсов».

УДК 627.815(075.8)

ББК 38.773я73

Рецензенты

Кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лаборатории гидрогеологии
ТФ ФГПУ СНИИГГиМС
В.Г. Иванов

Кандидат геолого-минералогических наук,
генеральный директор
ЗАО НПО Сибирские минеральные воды
С.А. Юшков

ISBN 5-98298-455-8

© ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2009

© Савичев О.Г., Краснощёков С.Ю., Наливайко Н.Г., 2009

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

Введение

Развитие цивилизации с древнейших времен неразрывно связано с использованием водных объектов, оказывающих исключительно большое влияние на развитие человеческого общества. Это влияние практически всегда неоднозначно. С одной стороны, наводнения, обмеления и пересыхания рек, озер, морей сопровождаются существенными экономическими потерями, а порой, и человеческими жертвами. С другой стороны, водные объекты благоприятствуют развитию ирригации, торговых отношений, тех или иных отраслей промышленности.

Приспосабливаясь сначала к существующим водным условиям, люди с течением времени стали активно воздействовать на режим природных вод, изменяя его характеристики в нужном для себя направлении. Наиболее значительные изменения такого рода связаны с эксплуатацией водохранилищ. История их создания насчитывает, по крайней мере, не менее 5 тыс. лет (сооружение плотин Кошиш, Садд-эль-Кафара, водохранилища Мерис в Древнем Египте, плотины Нимрод на Ближнем Востоке, системы дамб и каналов в Древнем Китае 2000–3000 лет до нашей эры). Однако только во второй половине XX-го столетия их строительство и влияние на окружающую среду приобрело поистине планетарный характер [1, 14, 21, 25], о чем свидетельствуют данные о динамике роста количества водохранилищ по материкам (табл. 1).

Таблица 1

Динамика роста количества (N) и полного объема (V) водохранилищ емкостью более 100 млн м³ [1]

Материк	До 1900 г.		1901–1950 гг.		1950–1987 гг.	
	N	$V, км^3$	N	$V, км^3$	N	$V, км^3$
Европа	9	3.3	104	121.7	399	461.2
Азия	5	1.7	47	17.9	595	1516.7
Африка	1	0.1	15	15.0	99	869.6
Северная Америка	25	8.4	342	344.7	520	1324.2
Центральная и Южная Америка	1	0.3	22	8.8	188	679.6
Австралия	–	–	10	10.6	60	65.1
Итого по миру	41	13.8	540	518.7	1861	4916.4

С учетом роли водохранилищ и связанных с ними целого комплекса водохозяйственных сооружений в развитии общества особое значение приобретает теория регулирования и использования речного стока, являющаяся научной базой для гидрологического и водохозяйственного обоснования гидротехнических мероприятий. Значительную роль в развитии этой теории сыграли работы известных русских ученых А.И. Воейкова, Е.В. Оппокова, Н.И. Соколова и других. Наиболее существенные достижения в этой области были получены после 30-х гг. благодаря работам ученых М.А. Великанова, Б.В. Полякова, Д.Л. Соколовского, С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, Д.Я. Ратковича, А.В. Огиевского, Я.Ф. Плешкова, А.Б. Авакяна, С.Л. Вендрова и других. В настоящее время теория регулирования стока превратилась в мощный аппарат обоснования водохозяйственных мероприятий самого различного уровня, хотя многие вопросы еще требуют более подробного рассмотрения. В данном учебном пособии изложены теоретические основы и практические приемы расчетов регулирования речного стока для различных отраслей народного хозяйства.

Глава 1

Основные сведения о регулировании стока и водохранилищах

1.1. Общая характеристика водопользования и водопотребления

Водное хозяйство на современном этапе может быть охарактеризовано как крупная производственная и природоохранная система, задачей которой является обеспечение хозяйственного комплекса и населения водой в нужном объеме, режиме, качестве и месте, осуществляющая воспроизводство водных ресурсов, их охрану от истощения и загрязнения, защиту окружающей среды от вредного воздействия вод .

Базовыми понятиями в области водного хозяйства являются водохозяйственные объекты и системы, водопользование и водопотребление [7, 8, 11, 40]:

- 1) *водохозяйственный объект* – сооружение, связанное с использованием, восстановлением и охраной водных объектов и их водных ресурсов;
- 2) *водохозяйственная система* – комплекс взаимосвязанных водных объектов и гидротехнических сооружений, предназначенных для обеспечения рационального использования и охраны вод;
- 3) *гидротехническое сооружение* – сооружение, подвергающееся воз-

- действию водной среды и предназначенное для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод;
- 4) *водопользование* – юридически обусловленная деятельность граждан и юридических лиц, связанная с любым использованием водных объектов, в том числе для нужд хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения, водоотведения, потребностей сельского и рыбного хозяйств, водного транспорта и гидроэнергетики, а также в рекреационных целях (различают *общее* водопользование – водопользование без применения сооружений или технических устройств, оказывающих влияние на воды, и *специальное* – водопользование с применением сооружений или технических устройств, или водопользование, влияющее на состояние вод);
 - 5) *водопотребитель* – гражданин или юридическое лицо, получающее в установленном порядке от водопользователя воду для обеспечения своих нужд (*водопотребление* – потребление воды из водного объекта или систем водоснабжения). По своим требованиям водопотребители различаются по следующим основным признакам: а) месту приема и выпуска воды; б) качеству воды; в) распределению водопотребления по часам, суткам, дням недели, сезонам года; г) расчетной обеспеченности водопотребления.

Рассмотрим краткую характеристику различных видов водопользования и требования водопотребителей, наиболее существенные при регулировании речного стока [25, 40].

Хозяйственно-питьевое водоснабжение. Хозяйственно-питьевое и техническое водоснабжение является весьма важной отраслью водного хозяйства для густо заселенных и промышленных районов, особенно при ограниченных водных ресурсах. При заборе воды для водоснабжения из малых и средних рек нередко требуется регулирование стока, если в маловодные периоды он недостаточен для удовлетворения потребностей. Удельное среднесуточное за год коммунальное водопотребление, включающее в себя расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды, поливку улиц и зеленых насаждений, обеспечение водой общественных зданий и нужды местной промышленности, в зависимости от благоустройства населенных пунктов изменяется от 150 до 600 л/сут на одного жителя [34].

Промышленное водопотребление часто объединяется с коммунальным и обеспечивается из городской водопроводной сети. Колебание водопотребления в течение суток обычно удовлетворяется за счет соответствующих резервуаров, а из источника водоснабжения вода при этом забирается достаточно равномерно. Большое количество воды (60–

70 %), доставляемой в города, возвращается обратно в реки через канализацию.

Промышленное водоснабжение. Промышленное водоснабжение требует, как правило, больших количеств воды. Обычно лишь небольшая ее часть используется безвозвратно как сырье, уходит на потери в технологическом цикле, исключается из баланса как особо загрязненная. Большая же часть воды уходит с предприятия, лишь изменив свои качества, которые во многих случаях целесообразно восстановить до исходных или приемлемых для водопользования, применяя очистку, охлаждение и так далее. Эти мероприятия необходимы также для поддержания водных объектов в естественном состоянии.

Если расходы воды в реке в маловодные периоды достаточны для подачи на предприятия только свежей воды, то такая схема промышленного водоснабжения называется прямоточной. В случаях же, когда отработанные воды после очистки или охлаждения непрерывно используются в технологическом цикле, а из источника водоснабжения восполняется лишь безвозвратный расход, схема водоснабжения называется оборотной, или циркуляционной. Существуют также смешанные схемы (прямоточно-оборотная и прямоточная наряду с оборотной).

При оборотной схеме водоснабжения для охлаждения оборудования предприятий жесткость воды под влиянием усиленного испарения от подогрева непрерывно увеличивается. При этом во многих случаях требуется опреснение воды в охлаждающих устройствах (в бассейнах брызгал и градирен, в прудах-охладителях), которое обычно проводится путем слива жесткой воды из бассейна и заменой ее пресной из другого источника. Такой процесс опреснения воды в водоемах, называемый иногда «продувкой», требует определенного количества заменяющей воды, что должно учитываться в водном балансе.

Тепло- и электроэнергетика. Большие количества воды подаются для охлаждения теплообменников мощных тепловых электростанций (ГРЭС). Расходы подаваемой для охлаждения воды зависят от мощности ГРЭС, типа энергомеханического оборудования и времени года.

В среднем на ГРЭС мощностью 1 млн кВт в зимний период подается расход воды 25–35 м³/с (в зависимости от мощности агрегатов), а летом – в полтора раза больше. Гидроэнергетика составляет особую отрасль водного хозяйства.

Сток на гидростанциях (ГЭС) используется для получения энергии, потребность в которой изменяется как в пределах суток, так и в течение года, соответственно, суточному и годовому графикам нагрузок. В пределах суток нагрузки на энергосистему варьируют от минимума

ночью до максимума в дневные и вечерние часы; в пределах года коммунальные нагрузки имеют минимум в летнее время и максимум зимой.

Сельское хозяйство. Ирригация в ряде районов земного шара является доминирующей водохозяйственной отраслью с большим сезонным потреблением воды из рек или водохранилищ. Потребление воды на ирригацию изменяется примерно в пределах 2500–5000 м³/га за сезон, а для риса – 10000–20000 м³/га за сезон в зависимости от климатических зон, вида орошаемых культур и метода орошения (по бороздам из временной оросительной сети, напуском или дождевальными установками). Горные реки с преимущественно ледниковым и горно-снеговым питанием имеют летнее половодье, что благоприятствует использованию их для орошения. Для большинства же равнинных рек с малыми летними расходами требуется нередко высокая степень регулирования стока при использовании его для орошения земель. Подаваемая на поля вода частично возвращается в реки через дренажную сеть и грунтовым потоком.

Водный транспорт. Водный транспорт в прежние годы предусматривался на больших реках, но в последнее время все в большей степени стали использоваться в качестве водных путей средние и даже малые реки. Суда с небольшой осадкой и реактивным водометным устройством вместо гребного винта позволяют широко и эффективно использовать для водного транспорта и малые реки. При поддержании транспортных глубин надо иметь в виду, что мероприятия по повышению их за счет дополнительных кратковременных попусков из вышележащего водохранилища являются малоэффективными. Дело в том, что влияние кратковременных попусков распространяется на сравнительно небольшие расстояния, а размеры повышения глубин за счет таких попусков невелики; для существенного приращения глубин потребовалось бы водохранилище очень большой емкости.

Ограниченное влияние попусков на глубины вытекает из обычной параболической связи между наполнением и расходами:

$$Q = k \times h^n, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, h – наполнение призматического русла с постоянным уклоном, n – константа, равная примерно двум.

Из приведенного соотношения видно, что для увеличения глубины вдвое, расход нужно увеличить вчетверо. Поэтому по мере увеличения бытовых расходов вниз по реке влияние попуска становится все менее заметным, хотя вблизи самого водохранилища крупные попуски могут вызвать нежелательное повышение уровней и скоростей. При

этом следует отметить, что в руслах с размываемыми подстилающими породами указанное соотношение между Q и h нарушается деформациями русла в связи с изменением расхода воды. Подъему уровня воды обычно соответствует намыв гребней перекатов, несколько уменьшающий прирост глубины. В результате приращение глубины составляет в среднем лишь около $2/3$ приращения уровня.

Наряду с попусками из водохранилища для улучшения судоходных условий применяются также выправительные и дноуглубительные работы. Коренное улучшение водных путей достигается шлюзованием. Транспортные условия характеризуются кривыми зависимости глубин на перекатах от расходов воды. Эти кривые строятся по данным ближайших пунктов наблюдений; используются также промеры бакенщиков и теоретические зависимости между расходами, уровнями и глубинами.

Рыбное хозяйство. На рыбном хозяйстве весьма существенно отражаются резкие колебания уровней и расходов в нижнем бьефе, связанные с попусками при суточном и недельном регулировании. Воспроизводство запасов многих ценных видов рыб, особенно полупроходных (судак, лещ, вобла, сазан и другие), приспособлено к естественному гидрологическому режиму. Поэтому изменение этого режима при регулировании стока отрицательно сказывается на рыбном хозяйстве и рыбной промышленности низовий рек. На воспроизводстве проходных рыб (осетр, белуга, севрюга, сельдь и другие) отрицательно сказывается потеря значительной площади нерестилищ этих рыб в пределах водохранилищ в результате уменьшения скоростей течения, заиления участков с песчаными и каменистыми грунтами, сильного волнения, а также изменение водного режима нерестилищ.

На условиях размножения рыб неблагоприятно отражается и задержка прогревания воды в нижних бьефах гидроузлов по сравнению с естественными условиями [37]. При этом необходимо отметить, что современные технологии ведения рыбного хозяйства позволяют в значительной мере нейтрализовать негативное воздействие регулирования стока и увеличить рыбопродуктивность водохранилищ благодаря созданию рыбопропускных и рыбозащитных сооружений, искусственных нерестилищ, своевременному предотвращению заморов и другим мероприятиям [31].

Хотя все крупные водохранилища носят комплексный характер, их роль в развитии водного хозяйства оценивается весьма неоднозначно. Положительный эффект от зарегулированности речного стока нивелируется негативными последствиями от изменения уровенного режима

верхнего и нижнего бьефов гидроузлов и несогласованности требований отдельных водопотребителей и водопользователей, что часто наносит прямой ущерб неэнергетическим участникам водохозяйственных комплексов.

1.2. Необходимость регулирования речного стока

Решение различных водохозяйственных мероприятий по использованию речного стока сводится к удовлетворению водой одного или нескольких водопользователей с учетом их переменной потребности в воде на протяжении года. Эта потребность может быть представлена в виде графика водопотребления или водопользования, который затем сравнивается с гидрографом реки. Режим стока и основные его характеристики (норма, минимумы, распределение по сезонам и так далее) определяются по материалам фактических наблюдений с использованием расчетных приемов, излагаемых в курсах гидрологии. Базовые положения теории вероятностей и математической статистики приведены в приложении 1.

Речной сток подвержен непрерывному изменению как из года в год, так и в течение года: многоводные годы сменяются маловодными или средними, а многоводные сезоны года чередуются с интервалами низкого стока. Такая неравномерность стока в большинстве случаев не удовлетворяет ходу водопользования в течение года, что и обнаруживается при сопоставлении синхронных графиков водопользования и гидрографов стока маловодных лет (или сезонов). Для сравнения с водопотреблением, кроме гидрографов, привлекаются также кривые обеспеченности среднесуточных расходов. Построение этих кривых излагается в курсе гидрологических расчетов [16, 17, 23, 26, 29].

Несоответствие гидрографов стока (или кривых обеспеченности расходов) графикам водопользования обнаруживается во многих отраслях народного хозяйства. Водоснабжение промышленных и населенных районов в течение года осуществляется достаточно равномерно, вследствие чего существенно отличается от гидрографов стока. Энергосистема требует от гидростанции наибольшей мощности обычно в зимнее время, то есть в период низкого стока.

Водный транспорт без применения дноуглубительных работ требует поддержания глубин на нешлюзованных участках реки за счет искусственного увеличения расходов в период межени. Если при этом в отдельные годы или сезоны потребность в воде превышает расходы речного стока, то возникает необходимость в приспособлении стока к

графику водопользования, иными словами, требуется регулирование стока.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите страны и время осуществления первых крупных работ по регулированию речного стока.
2. Дайте определение понятий «водохозяйственное сооружение» и «водохозяйственная система».
3. Назовите отличие между понятиями «водопользование» и «водопотребление».
4. Сформулируйте ограничения использования рек для нужд водного транспорта, водоснабжения, водоотведения, гидроэнергетики, орошения сельхозугодий по величине водного стока.
5. Укажите причины ограничений по использованию попусков воды из водохранилища для обеспечения оптимальных условий работы водного транспорта.

1.3. Основные понятия о регулировании стока и водохранилищах

Решение целого ряда задач водного хозяйства по обеспечению населения, промышленности и сельского хозяйства водой и поддержания оптимальных условий для функционирования экосистемы водосборного бассейна возможно путем создания на реках и озерах устройств и сооружений, называемых водохозяйственной установкой.

При *регуливании стока* – перераспределении во времени естественного стока реки в соответствии с запросами водопотребителей – в состав установки обязательно входит водохранилище, создаваемое подпором вод реки или естественного водоема (озера) от водоудерживающей плотины. Обоснование проекта водохозяйственной установки представляет круг вопросов, решаемых водохозяйственными расчетами [4, 17, 29].

Согласно рекомендациям Института водных проблем (ИВП) РАН, водохранилищами следует считать искусственные и естественные водоемы с замедленным водообменом объемом более 1 млн м³, уровенный режим которых постоянно регулируется гидротехническими сооружениями для накопления воды в целях ее хозяйственного использования. У водохранилищ нет природных аналогов. Только по форме чаши с ними сходны завально-запрудные озера. По мнению А.Б. Авакяна с соав-

торами (1987), наиболее важными являются следующие особенности водохранилищ.

1. Водохранилища – это объекты, создаваемые и управляемые человеком, но одновременно испытывающие также и сильнейшее воздействие природных факторов. По этой причине водохранилища занимают промежуточное положение между «природными» и «техническими» образованиями, иными словами, они – природно-технические системы.
2. Влияние водохранилищ на окружающую среду очень значительное, причем его последствия могут быть и неблагоприятными.
3. Водохранилищам свойственна особая система так называемых внутриводоемных процессов – гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических.
4. Водохранилища – водные объекты, наиболее полно используемые различными отраслями хозяйства и формирующие наиболее характерные черты водохозяйственного комплекса тех или иных территорий.
5. Для водохранилищ характерна чрезвычайно высокая динамичность развития, обусловленная изменчивостью гидрометеорологических процессов, определяющих режим водоема, стремительным изменением воздействия хозяйства на природную среду, изменениями (по разным причинам) режима эксплуатации водохранилищ.

Совокупность воздействий указанных факторов приводит к тому, что водохранилища крайне редко можно считать стационарными объектами, эволюция которых прослеживается на основе предыдущей истории.

Главной целью создания водохранилищ является регулирование стока в интересах водоснабжения, ирригации, гидроэнергетики, водного транспорта и в целях борьбы с наводнениями. Для этого в водохранилищах аккумулируется сток в одни периоды года, сезона, месяца, недели, суток и отдается накопленная вода в другие периоды. Процесс аккумуляции стока называется наполнением водохранилища, а процесс отдачи накопленной воды – его сработкой. К числу параметров, определяющих основные размеры водохранилищ, следует отнести (рис. 1):

- 1) НПУ – нормальный подпорный уровень;
- 2) ФПУ – форсированный подпорный уровень;
- 3) УМО – уровень мертвого объема;
- 4) УНС – уровень навигационной сработки;
- 5) $V_{\text{полезн}}$ – полезный объем водохранилища;
- 6) $V_{\text{УМО}}$ – мертвый объем;

- 7) $V_{\text{полн}} = V_{\text{полезн}} + V_{\text{умо}}$ – полный объем водохранилища, соответствующий НПУ;
- 8) $V_{\text{форс}}$ – форсированный (резервный) объем;
- 9) $F_{\text{нпу}}$ – площадь водной поверхности водохранилища при НПУ;
- 10) $F_{\text{умо}}$ – площадь водной поверхности водохранилища при УМО.

Под *НПУ* понимается высший проектный уровень водохранилища, который подпорные сооружения могут поддерживать в нормальных эксплуатационных условиях в течение длительного времени.

УМО – низкий уровень, до которого срабатывается водохранилище в процессе нормальной его эксплуатации.

Уровень, находящийся между УМО и НПУ, при котором речной флот может нормально функционировать, называется *уровнем навигационной сработки* (УНС).

Под *полезным объемом* водохранилища понимается объем, непосредственно осуществляющий регулирование стока. Он заключен в слое водохранилища высотой глубины сработки $h_{\text{сраб}}$ (между НПУ и УМО).

Мертвый объем водохранилища хотя и не принимает участия в регулировании, но имеет большое практическое значение для водохранилища (определяет параметры заиления, санитарные условия, минимальный напор и так далее).

При пропуске катастрофических половодий и паводков допускается кратковременное повышение уровня воды в водохранилище над НПУ до отметки, называемой *форсированным подпорным уровнем* (ФПУ).

Объем водохранилища, заключенный между ФПУ и НПУ, называется *форсированным* и используется для дополнительной трансформации (срезки) катастрофических максимальных расходов половодий и паводков.

Помимо перечисленных параметров следует также сказать еще об одной важной характеристике водохранилища – кривой подпора – условной линии, соответствующей повышению уровня воды от отметки НПУ у плотины вверх по течению.

Естественная емкость, в которой аккумулируется вода, называется *чашей водохранилища*. При этом различают береговую и глубинную ее области. В береговой области преобладают процессы разрушения горных пород под влиянием волнового прибоя, а в глубинной – происходит отложение продуктов разрушения. Береговая область состоит из трех зон: берега, побережья и береговой отмели. *Берег* – часть суши,

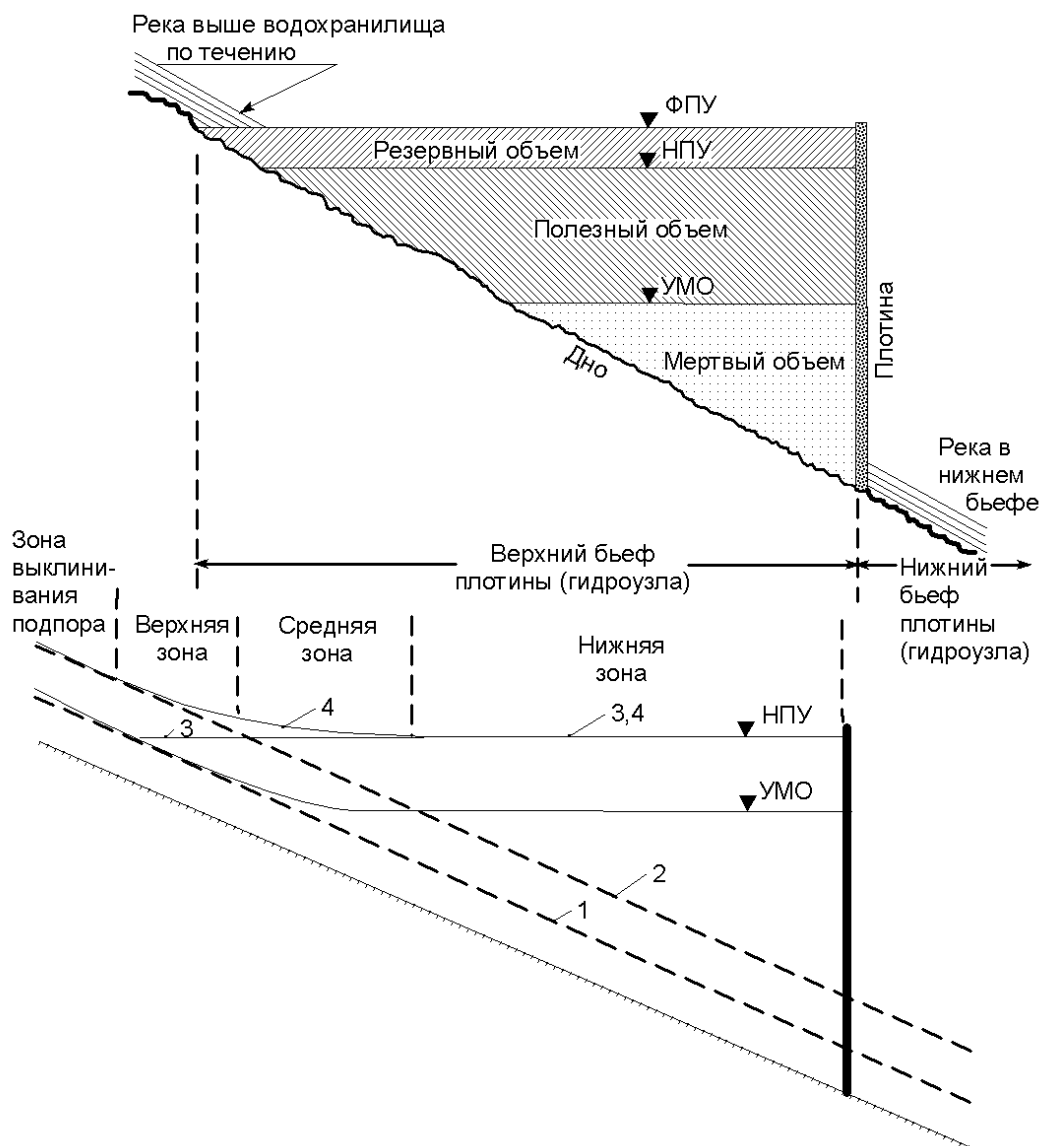


Рис. 1. Основные элементы водохранилища и его водного режима
 1 – меженный уровень воды до подпора; 2 – половодный (паводковый) уровень до подпора; 3 – НПУ; 4 – половодный (паводковый) уровень в условиях подпора

окаймляющая водохранилище в виде склонов различной крутизны. Основание берега располагается на верхней границе волнового прибоя; постепенно разрушаясь, берег отступает от уреза вглубь суши. Заканчивается берег бровкой, то есть линией сопряжения склонов с прилегающей местностью. *Побережье* – зона прибоя. Часть этой зоны, примыкающая к берегу только при сильном волнении, называется сухим побережьем. Часть, затопляемая периодически при подъеме уровня воды, называется затопляемой, а часть побережья, находящаяся под водой постоянно, называется подводной. *Береговая отмель* имеет вид подводной террасы, опускающейся в сторону водохранилища крутым склоном

(отсыпь). Отмель возникает как в результате размыва (абразии) коренных пород, так и за счет намыва (аккумуляции) рыхлого материала, приносимого волнами.

Побережье и береговую отмель объединяют в одну зону, называемую *прибрежной (литоралью)*. *Глубинная область (профундаль)* занимает наиболее глубокую часть дна, не доступную волнению. Переходную часть между литоралью и профундалью называют *сублиторалью*. Границы между отдельными частями котловины водоема не всегда отчетливо выражены. Происходящие химические и биологические процессы, волнения, твердый сток, вносимый реками в водохранилище, постепенно изменяют первоначальный рельеф дна и склонов котловины, а также очертание ее в плане. С течением времени первоначальный рельеф котловины сглаживается, водохранилище мелеет, а затем зарастает.

При расчетах регулирования стока обычно приходится решать следующие основные задачи:

- 1) задан зарегулированный (гарантированный) расход $Q_{зар}$; требуется определить потребную для его поддержания полезную емкость водохранилища $V_{полез}$;
- 2) задана полезная емкость водохранилища; требуется определить обеспечиваемый ею гарантированный расход воды;
- 3) требуется построить зависимость между величинами гарантированных расходов воды и полезного объема водохранилища.

По степени перераспределения стока во времени различают следующие виды регулирования: *суточное, недельное, сезонное, годовичное, многолетнее*. Наиболее важные виды регулирования – сезонное и многолетнее – будут подробно рассмотрены далее в специальных разделах.

Как уже указывалось выше, естественные колебания речного стока выравниваются с помощью водохранилищ. При этом чем больше емкость водохранилища по отношению к регулируемому стоку, тем выше степень его выравнивания, тем ближе значение *коэффициента регулирования стока* или *водоотдачи* α к единице ($\alpha = Q_{зар}/Q_{мг}$, где $Q_{зар}$ – зарегулированный водохранилищем расход, $Q_{мг}$ – среднегодовой расход в створе гидроузла). Добиться полного выравнивания стока (довести значение α до 1) возможно только ценой больших затрат на сооружение крупнейших водохранилищ, которые с экономической точки зрения, как правило, не оправдываются. Однако в ряде случаев при создании водохранилищ на реках с высокой степенью естественного регулирования стока (при относительно малых коэффициентах изменчивости годового стока Cv) иногда целесообразно доведение водоотдачи α до величины, близкой к 1.

В современной практике водохозяйственного проектирования и эксплуатации водохранилища его отдачу обычно связывают с необходимой надежностью удовлетворения требования водопотребителей и водопользователей. Такой характеристикой является *гарантированная отдача водохранилища*, под которой подразумевается минимальная среднесуточная, среднемесячная, среднесезонная или среднегодовая отдача, обеспечиваемая с заданной надежностью. В проектной практике в качестве гарантированной используется отдача либо средняя за всю межень, либо средняя за осенне-зимний период, либо среднегодовая.

В зависимости от назначения гидроузла его гарантированная отдача может быть выражена различно:

- 1) расходом $Q_{гар}$ воды, поступающей в нижний бьеф для нужд водного транспорта, рыбного и лесного хозяйства;
- 2) расходом $Q_{гар}$ воды, забираемой из верхнего бьефа для ирригации, водоснабжения и прочих нужд;
- 3) количеством гидравлической энергии $\mathcal{E}_{гар}$ или мощности $N_{гар}$, используемой в расчетных маловодных условиях для участия в покрытии графика нагрузки энергосистемы.

В комплексных гидроузлах гарантированная отдача выражается совокупностью указанных величин. Если в энергосистеме имеются каскады водохранилищ или ГЭС, расположенные на разных притоках, то под гарантированной отдачей подразумевается суммарный объем воды или общее количество гидравлической энергии, получаемой от всех водохранилищ или ГЭС заданной обеспеченностью. При этом роль каждого водохранилища или ГЭС в энергосистеме и взаимосвязь их режимов оптимизируется с целью достижения максимальной величины совокупной гарантированной отдачи всех ГЭС.

Нарушение гарантированной отдачи называют *перебоями*. Под расчетной обеспеченностью гарантированной водо- или энергоотдачи понимается вероятность удовлетворения потребителей водой или энергией по соответствующей норме, измеряемой числом бесперебойных лет P_l , бесперебойных периодов (месяцев, декад, дней) P_n , числом часов бесперебойной подачи потребителю воды или энергии P_0 :

$$P_l = m/(n+1), \quad (2)$$

$$P_n = m/n, \quad (3)$$

$$P_0 = (N_{гар} - \Delta d)/N_{гар} = (W_{гар} - \Delta d)/W_{гар}, \quad (4)$$

где m – число бесперебойных лет или периодов; n – общее число членов ряда; $N_{гар}$ – гарантированная мощность ГЭС; $W_{гар}$ – гарантированная водоотдача; Δd – среднемноголетний дефицит водо- или энергоотдачи.

Обеспеченность на практике выражается в форме процента бесперебойных лет, периодов и часов. Четкой зависимости между показателями обеспеченности нет, но можно указать, что $P_l < P_n < P_0$. Для удовлетворения требований различных водопользователей устанавливается так называемая приведенная обеспеченность гарантированной отдачи P_{np} , которая учитывает значения и обеспеченность нормальной и урезанной водоотдачи. Приведенная обеспеченность может определяться по формуле С.Н. Крицкого и Х.Ф. Менкеля

$$P_{np} = P_1 + (P_2 - P_1) * \alpha_2 / \alpha_1, \quad (5)$$

где P_1 и P_2 – обеспеченности, соответственно, нормальной α_1 и пониженной α_2 водоотдачи.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение понятий «регулирование стока» и «водохранилище».
2. Назовите виды и основные задачи регулирования стока.
3. Дайте определение понятий: НПУ, ФПУ, УМО, мертвый объем, полезный объем, форсированный объем.

1.4. Классификации водохранилищ

1.4.1. Классификация по видам регулирования

Соответственно видам *регулирования* различают водохранилища суточного, недельного, годовичного и многолетнего регулирования.

Водоохранилище суточного регулирования стока предназначено для перераспределения в течение суток равномерного стока реки в соответствии с неравномерным водопотреблением, например для повышения расходов в часы утреннего и вечернего максимума за счет снижения водопотребления в ночные и обеденные часы (рис. 2).

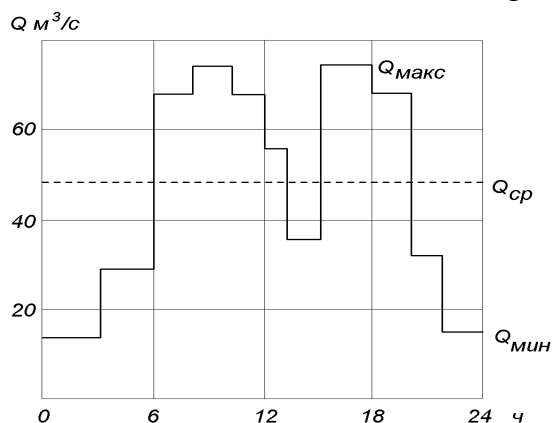


Рис. 2. Схема суточного регулирования стока

Водохранилище недельного регулирования стока предназначено для перераспределения в течение недели практически равномерного стока реки, соответственно, повышенному водопотреблению в рабочие дни и пониженному – в нерабочие (рис. 3).

Объем водохранилища (в м³), необходимый для проведения недельного регулирования стока, определяется объемом избытков (V_1) в нерабочие дни и объемом превышения (V_2) в рабочие дни:

$$V = V_1 = V_2 = 86400 \times k \times (Q_1 - Q_2) \times (n - k)/n, \quad (6)$$

$$V_1 = (Q_{cp} - Q_2) \times k \times 86400, \quad (7)$$

$$V_2 = (Q_1 - Q_{cp}) \times (n - k) \times 86400, \quad (8)$$

где n – число дней в неделе; k – число нерабочих дней; Q_1 и Q_2 – расходы водопотребления, соответственно, в рабочие ($n - k$) и нерабочие (k) дни при среднем расходе Q_{cp} ; 86400 – число секунд в сутках.

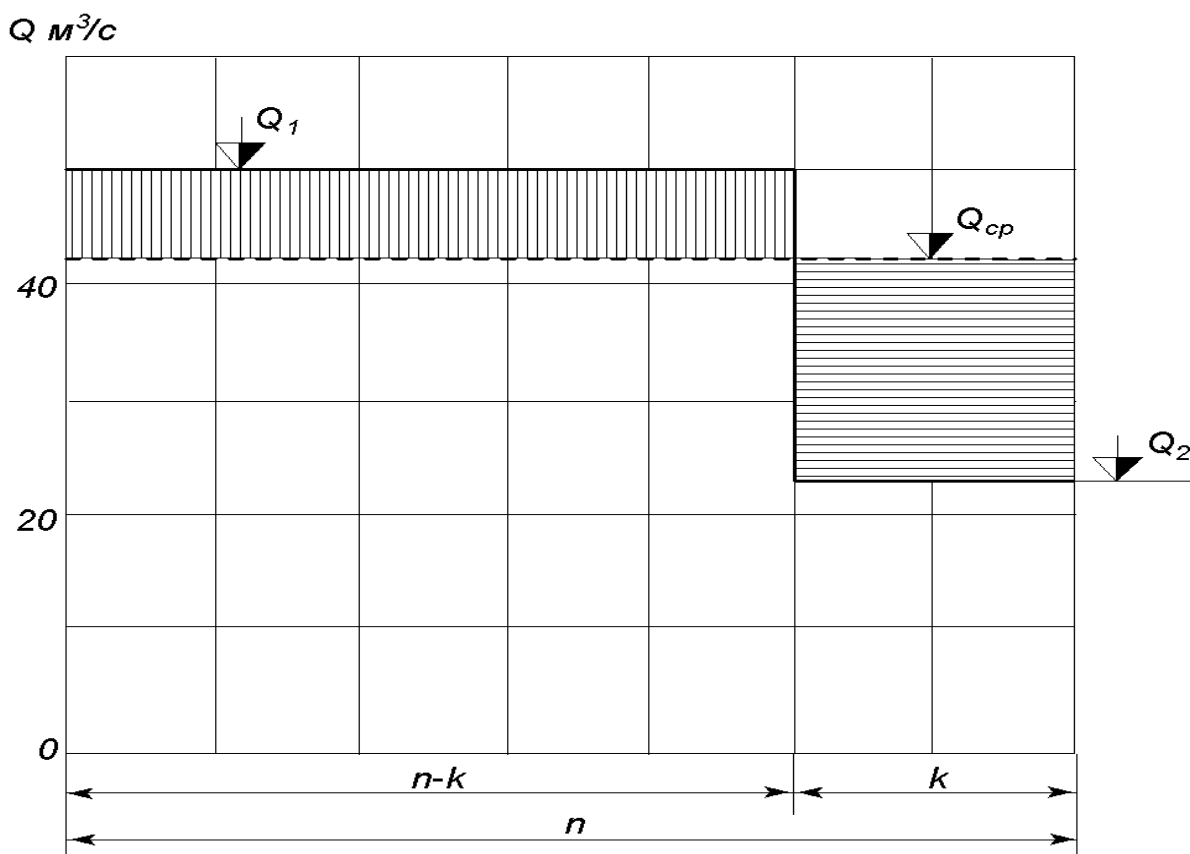


Рис. 3. Схема недельного регулирования стока

Водохранилище сезонного регулирования стока предназначено для перераспределения стока из многоводных сезонов года в маловодные (рис. 4, 5).

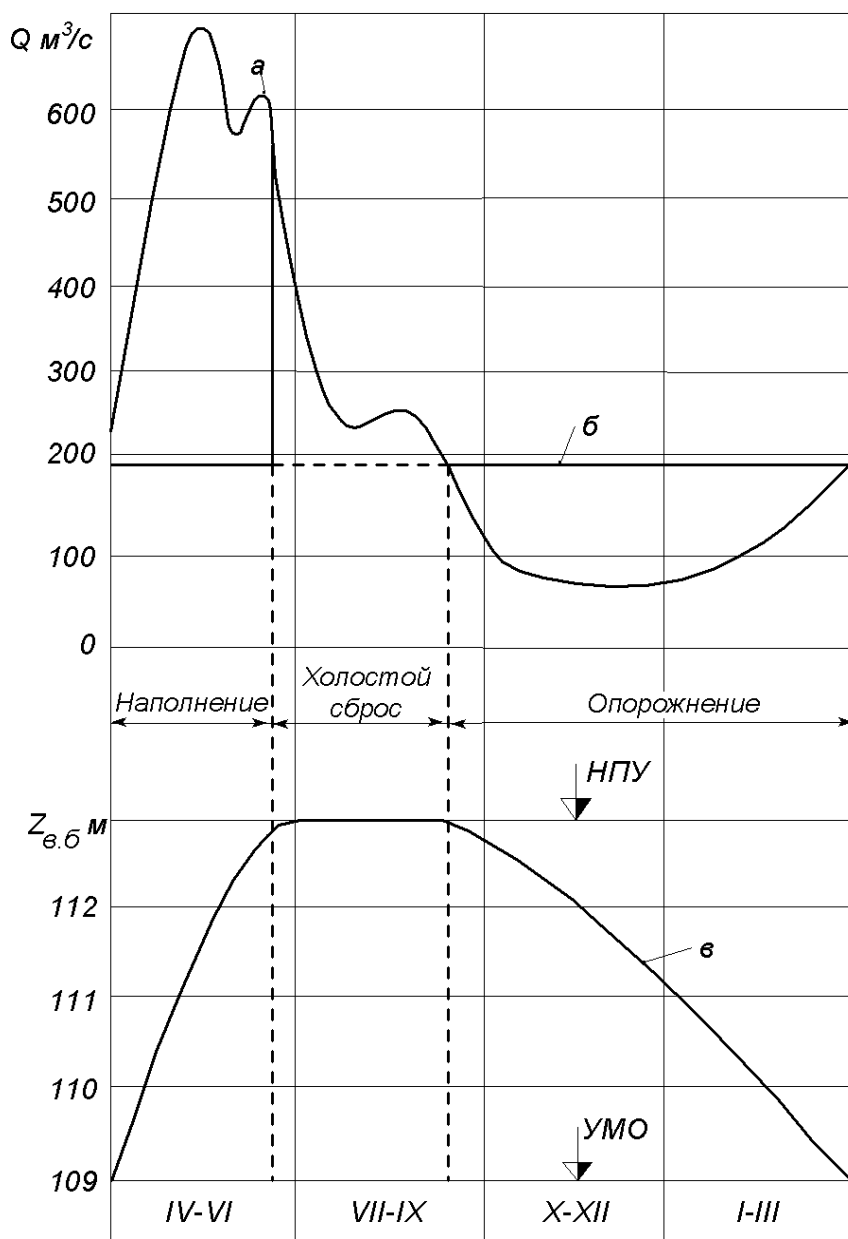


Рис. 4. Схема сезонного регулирования стока
a – естественные расходы; *б* – зарегулированные расходы; *в* – уровни
 верхнего бьефа водохранилища

Такое регулирование обусловлено внутригодовой неравномерностью стока и несовпадением величины стока и водопотребления во времени. Это наиболее распространенный вид регулирования. В период превышения стока над используемым расходом водохранилище наполняется, а в период недостатка – срабатывается. Величина полезного объема водохранилища для осуществления сезонного регулирования

определяется объемом дефицита стока. При заполнении полезного объема часть стока может быть сброшена вхолостую. Объемы превышения и дефицита стоков над потреблением в расчетном маловодном году компенсируются только в том случае, когда зарегулированный расход доведен до величины среднегодового расхода рассматриваемого года. Такое регулирование стока называется *годовым* (рис. 5).

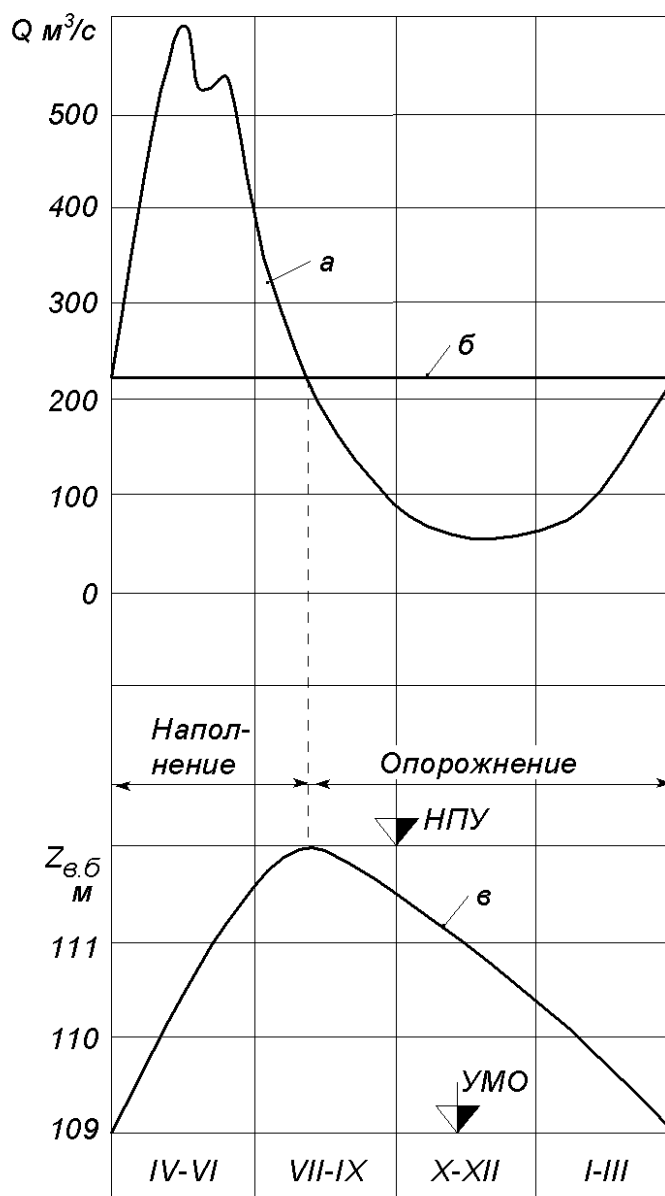
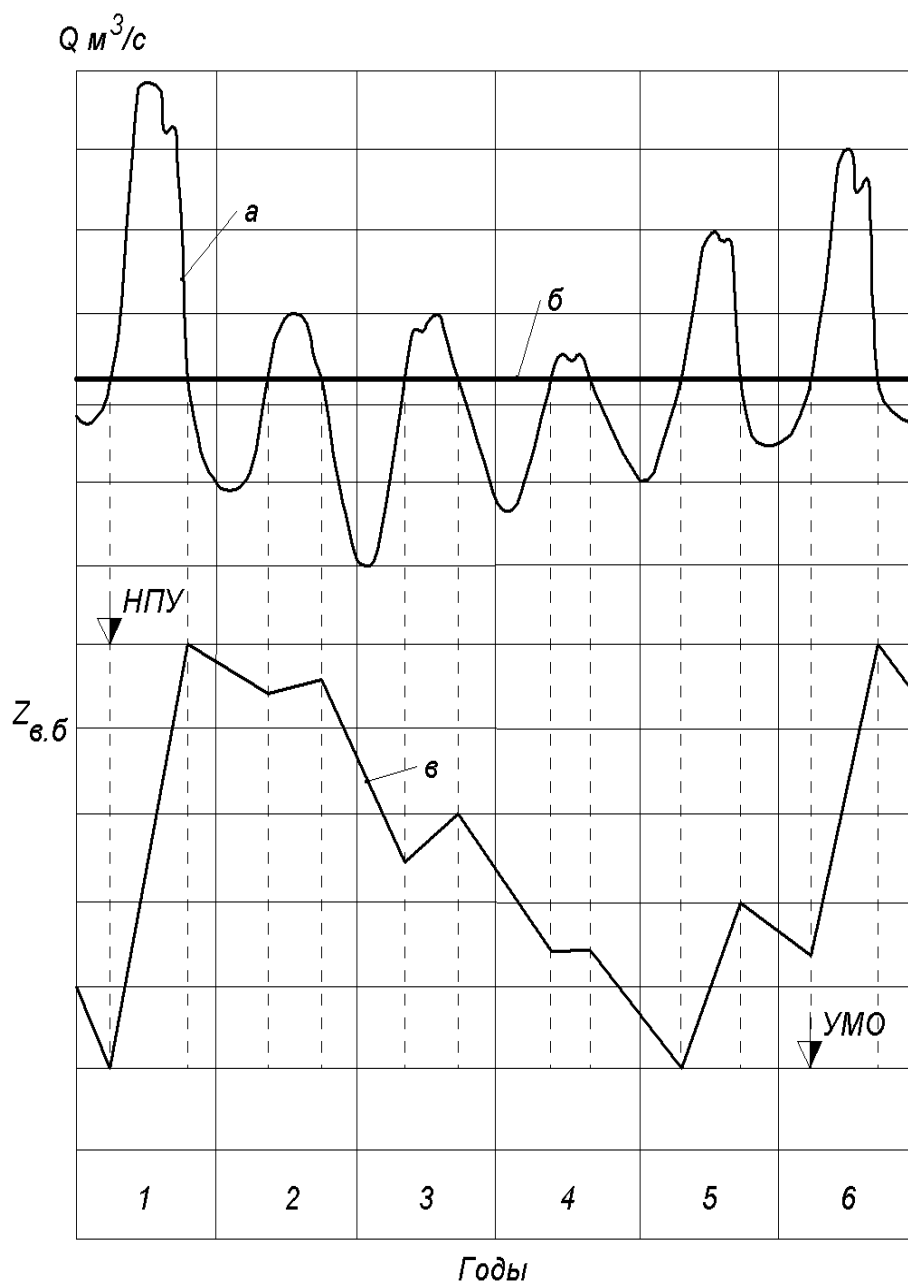


Рис. 5. Схема годового регулирования стока:
а – естественные расходы; *б* – зарегулированные расходы; *в* – уровни верхнего бьефа водохранилища

Водохранилище многолетнего регулирования стока предназначено для его перераспределения не только внутри года, но и стока из мно-

годовы́х и среднево́дных лет в мало́водные (рис. 6). Поле́зный объём водохра́нилища нахо́дится в пря́мой зави́сности от сте́пени регу́лирова́ния сто́ка.



*Рис. 6. Схема многолетнего регулирования стока:
 а – естественные расходы; б – зарегулированные расходы; в – уровни
 водохранилища*

1.4.2. Классификация по размеру водохранилища

В зависимости от размеров площади водной поверхности (при НПУ) водохранилища делятся на очень большие (площадь которых

свыше 1000 км²), большие (площадь от 101 до 1000 км²), средние (площадь от 10 до 100 км²) и малые (площадь до 10 км²). Малые водохранилища, а также мелководные естественные озера, покрытые водной растительностью, называют прудами [4].

Несколько иная классификация была предложена А.Б. Авакяном и В.А. Шарповым в результате анализа обширных материалов по водохранилищам мира (табл. 2). Кроме того, существуют классификации водохранилищ по глубине. Одна из таких классификаций приведена в табл. 3.

Таблица 2

Классификация водохранилищ по размерам [1]

Категория водохранилищ	Полный объем, км ³	Площадь водного зеркала, км ²	Отношение к общему числу водохранилищ, %
Крупнейшие	более 50	более 5000	менее 0.1
Очень крупные	50–100	5000–500	1
Крупные	10–1	500–100	5
Средние	1–0.1	100–20	15
Небольшие	0.1–0.01	20–2	35
Малые	менее 0.01	менее 2	44

Таблица 3

Классификация водохранилищ по глубине [1])

Категория водохранилищ	Наибольшая глубина, м	Средняя глубина, м
Исключительно глубокие	более 200	более 60
Очень глубокие	100–200	30–60
Глубокие	50–99	15–29
Средней глубины	20–49	7–14
Неглубокие	10–19	3–6
Мелководные	менее 10	менее 3

1.4.3. Классификация по генезису

По генезису водохранилищ различают (рис. 7):

- 1) *водохранилища в долинах рек* – создаются путем подпора в долинах рек;

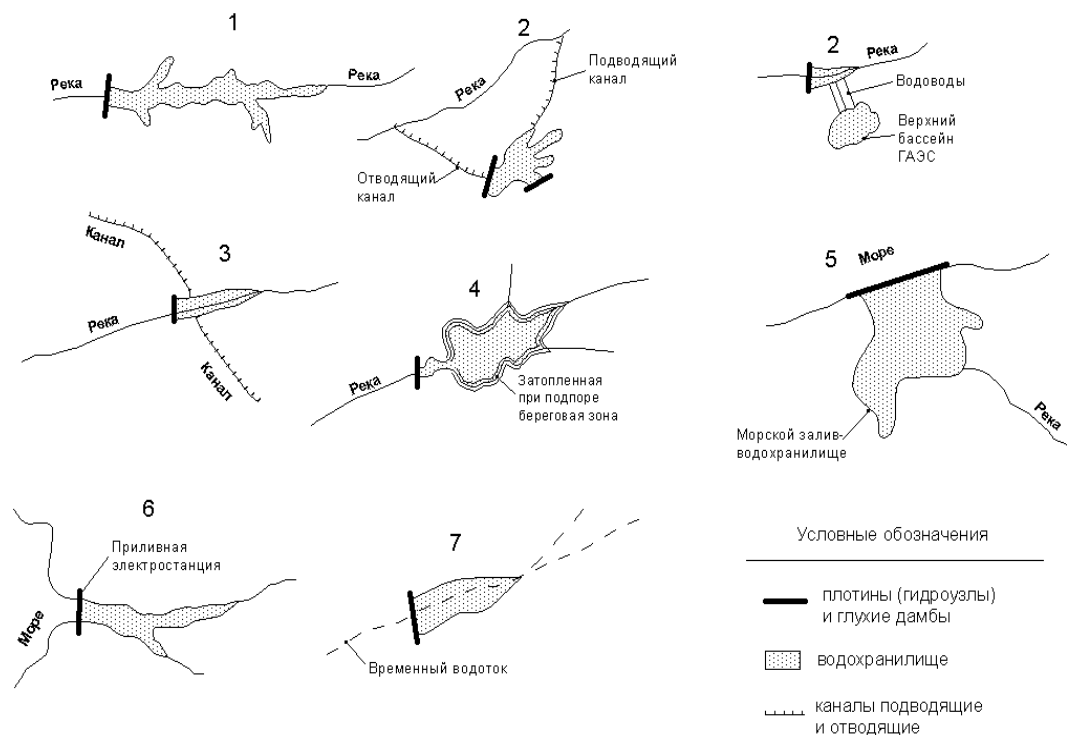


Рис. 7. Характерные типы водохранилищ по генезису:

1 – речное долинное, созданное подпором реки плотиной; 2 – наливное; 3 – смешанное – наливное и долинное; 4 – озеро-водохранилище; 5 – отчлененное от моря и опресненное; 6 – отчлененное от моря без опреснения (приливная электростанция); 7 – на временном водотоке

- 2) водохранилища – коллекторы и приемники сточных вод обычно создаются ниже основных массивов орошаемых земель с целью сбора возвратных вод или для аккумуляции промышленных стоков;
- 3) наливные водохранилища образуются в естественных и искусственных депрессиях путем подачи в них избыточных (преимущественно, паводковых) вод;
- 4) водохранилища – коллекторы и приемники сточных вод обычно создаются ниже основных массивов орошаемых земель с целью сбора возвратных вод или для аккумуляции промышленных стоков;
- 5) озера-водохранилища (зарегулированные озера) создаются путем подпора и искусственного регулирования водообмена естественных озер;
- 6) подземные водохранилища – специфические водные объекты, при создании которых в качестве емкости используются подземные пустоты или водоносные горизонты;
- 7) морские водохранилища располагаются в устьевых участках рек, впадающих в море.

1.4.4. Классификация по местоположению

Водохранилища – объекты аazonальные, создаваемые в любой географической зоне. Но особенности гидрологического режима водохранилищ в существенной мере зависят и от зональных факторов, в соответствии с которыми выделяют *равнинные* и *горные* водохранилища [1].

Первые из них характеризуются значительной площадью водного зеркала и затопления земель на единицу объема и напора, небольшой максимальной (обычно не более 25 м) и средней (5–10 м) глубинами, относительно небольшой глубиной сработки (2–7 м), большими изменениями площади зеркала при колебаниях уровня, высокой интенсивностью переработки берегов и, как правило, комплексным использованием (большинство равнинных водохранилищ расположено на территориях развития многоотраслевого хозяйства).

Горные водохранилища, напротив, характеризуются сравнительно небольшой площадью акватории и затопления земель, большими глубинами (нередко более 100–200 м), менее резкими, по сравнению с равнинными водохранилищами, изменениями площади зеркала при сработке, отсутствием значительных ветроволновой переработки и подтопления берегов, сложенных водоупорными скальными породами, интенсивным заполнением наносами вследствие значительного стока последних.

Промежуточное место (между равнинными и горными водохранилищами) занимают полугорные водохранилища.

1.4.5. Классификация по конфигурации

Форма водохранилищ весьма разнообразна, причем очертания в плане и морфометрические показатели не являются постоянными. Имеется большое количество классификаций водохранилищ по форме. Наиболее простой среди них, по мнению А.Б. Авакяна и соавторов (1987), является классификация М.А. Фортунатова, в соответствии с которой выделяются водохранилища:

- 1) пойменные (русловые);
- 2) долинные;
- 3) озеровидные;
- 4) водохранилища сложной формы.

У первых двух типов длина обычно значительно превышает ширину, причем ширина в большинстве случаев уменьшается от приплотинного участка к верхнему. Для водохранилищ озеровидной формы ширина и длина являются сопоставимыми параметрами.

1.4.6. Классификация по водообмену

Для характеристики водообмена и степени проточности разными авторами используются различные показатели. Одним из наиболее удобных считается отношение объема водохранилища при НПУ к объему среднегодового стока в створе плотины [1]. По величине этого показателя выделяются водохранилища с очень большой (менее 0.1), большой (0.10–0.24), значительной (0.25–0.49), средней (0.50–0.99), небольшой (1.0–1.99) и малой (более 2.0) интенсивностью водообмена. Крупные озера-водохранилища выходят за рамки данной классификации (так, период смены полного объема озера Байкал составляет примерно 400 лет).

1.4.7. Гидрохимическая классификация

Минерализация и химический состав вод водохранилищ формируется и изменяется в результате воздействия комплекса природных и антропогенных факторов. Благодаря замедленному водообмену на фоне географической зональности в химическом составе водохранилищ проявляется влияние местных азональных факторов (геологического строения, рельефа, морфологии котловин), приводящее к неоднородности вод внутри каждого района и в каждом водоеме.

Ионный состав вод меняется от гидрокарбонатно-кальциевого в лесной зоне до сульфатно-натриевого и хлоридно-натриевого в полупустынях и пустынях. Согласно О.А. Алекину (1970), все природные воды, в том числе и в водохранилищах, по минерализации делятся на пресные (до 1 промилле), солоноватые (1.0–24.7 промилле), соляные или минеральные (24.7–47 промилле) и рассолы (более 47 промилле). Пресные воды, в свою очередь, подразделяются на воды с малой (до 200 мг/л), средней (200–500 мг/л) и повышенной (более 500 мг/л) минерализацией. Более подробно гидрохимические классификации изложены в работах [3, 12, 35, 38].

1.4.8. Гидробиологическая классификация

Все водные объекты земного шара населены водными организмами – *гидробионтами*. Видовой состав и количество гидробионтов тесно связаны с физико-химическими особенностями вод и изменяются в зависимости от воздействия зональных и азональных факторов. С другой стороны, гидробионты приспособляются к окружающей среде, в процессе своей жизнедеятельности влияют на качество вод и некоторые

элементы гидрологического режима (например, за счет увеличения сопротивления движению водных масс).

Условия питания гидробионтов положены в основу биологической классификации, в соответствии с которой все водоемы, включая водохранилища, делятся на три основных типа [6]:

- 1) *олиготрофные* (малопитательные) водные объекты, в которых содержится мало питательных веществ, поэтому воды их бедны фитопланктоном (отложения на дне водоема не содержат органических веществ и не требуют кислорода для окисления, вследствие чего кислород равномерно насыщает всю толщу воды в водоеме; воды имеют большую прозрачность, синий и зеленый цвет);
- 2) *евтрофные* (питательные) – воды их богаты питательными веществами, характеризуются интенсивным развитием фитопланктона и высших водорослей (значительная часть органических остатков отлагается на дне, образуя мощные толщи илов, богатых органическим веществом; количество кислорода резко уменьшается ко дну; воды малопрозрачные, имеют желтоватый оттенок);
- 3) *дистрофные* (непитательные) – расположены преимущественно в заболоченных водосборах (в их воде содержится много органических веществ, рН менее 6.5, наблюдается значительный дефицит кислорода даже летом; рыбы в них нет, гидробионты представлены преимущественно мхами; воды малопрозрачны, желтого, бурого или коричневого цвета; с течением времени дистрофные водоемы обычно заторфовываются и превращаются в болота).

Кроме того, в ряде случаев выделяют промежуточные типы – мезотрофные, полиевтрофные и гипертрофные. Водоохранилища с течением времени могут переходить из одного типа в другой. Этот процесс связан со значительным поступлением в водоемы биогенных элементов, в первую очередь азота и фосфора, приносимых сточными водами промышленных и коммунальных предприятий, стоком с удобряемых сельскохозяйственных угодий и территорий населенных пунктов.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Укажите классификацию водохранилищ по видам регулирования и назовите принципиальные отличия между такими водохранилищами.
2. Каковы наиболее существенные различия между равнинными и горными водохранилищами?
3. Назовите основные различия в гидрохимическом и гидробиологическом режиме речных водохранилищ и рек, на которых они сооружены.

1.5. Водохранилища мира и России

По данным А.Б. Авакяна и соавторов (1987), в настоящее время в мире на всех материках, кроме Антарктиды, насчитывается не менее 30 тысяч водохранилищ объемом более 1 млн м³, в том числе, около 2.5 тысяч водохранилищ объемом свыше 100 млн м³. Количество же малых водохранилищ и прудов, предположительно, в сотни раз больше.

Основная часть всех водохранилищ (по величине полного объема и количеству) расположена в умеренных широтах, что объясняется более высоким уровнем экономического развития территорий и, как следствие, более значительной потребностью в энергии и воде для коммунально-бытовых и технических нужд. Меньшее количество и суммарный объем водохранилищ в субтропическом поясе, где их созданию в свое время способствовала потребность в орошении земель.

На территории Российской Федерации находится более 1100 водохранилищ, причем наиболее крупные из них – в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (рис. 8), а наибольшее количество – в центральных районах и Поволжье. Около 13 % из существующих в России водохранилищ используются для выработки электроэнергии на ГЭС, 2.5 % – как охладители на ТЭС и АЭС. В целом же, для всех водохранилищ характерно комплексное использование в самых различных целях.

Говоря о водохранилищах Сибири, следует отметить, что наиболее крупные из них были созданы во второй половине XX-го века для нужд гидроэнергетики. Прежде всего, это – Красноярское, Братское, Саяно-Шушенское, Усть-Илимское и ряд других (табл. 4).

Водохранилища сибирского региона преимущественно долинного типа, созданны путем подпора рек. Вместе с тем, здесь создано уникальное Иркутское водохранилище путем подпора 60-километрового участка р. Ангары и подъема среднемноголетнего уровня озера Байкал на 1 м. Из крупных водохранилищ равнинным является только Новосибирское на р. Оби, построенное в 1956 г. для сезонного регулирования стока и заполненное до НПУ в 1958 г. Полный его объем составляет 8.86 км³, площадь водного зеркала – 1070 км² [30]. Все прочие крупные водохранилища приурочены к горным и полугорным районам.

В Западно-Сибирском регионе, помимо отмеченного выше Новосибирского водохранилища, имеется большое количество малых водо-

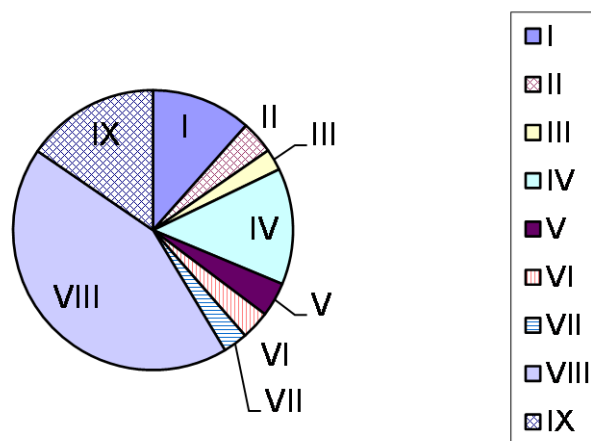


Рис. 8. Соотношение значений полного объема водохранилищ Российской Федерации.

Экономические районы: I – Северный и Северо-Западный; II – Центральный и Центрально-черноземный; III – Волго-Вятский; IV – Поволжский; V – Северо-Кавказский; VI - Уральский; VII – Западно-Сибирский; VIII – Восточно-Сибирский; IX – Дальневосточный

Таблица 4

Основные параметры водохранилищ Сибири [2]

Водохранилище	Река	Год создания	Объем водохранилища, км ³		Площадь зеркала, км ²	Участники комплексного использования*
			полный	полезный		
Новосибирское	Обь	1956–1959	8.8	4.4	1070	Э, И, О, В, Р
Красноярское	Енисей	1966–1970	73.3	30.4	2000	Э, И, О, В, Н
Саянское	То же	1976–1980	29.1	14.7	670	Э, Т, И, Л, В
Майнское	–	1980–1985	0.1	0.07	11.5	Э, Т
Иркутское	Ангара	1956–1960	47.7	46.45	1466	Э, Т, О
Братское	То же	1961–1967	169.3	48.2	5470	Э, Т, Л, О
Усть-Илимское	–	1971–1974	59.4	2.77	1873	Э, Т, Л
Курейское	Курейка	1986–1990	13.4	10.1	747	Э
Хантайское	Хантайка	1970–1975	23.5	17.3	1560	Э, Р
Вилуйское	Вилуй	1966–1970	35.9	17.8	2170	Э, Т, В
Мамаканское	Мамакан	1961–1964	0.2	0.11	–	Э

* Э – энергетика, И – ирригация, Т – водный транспорт, В – водоснабжение, Л – лесосплав, О – рекреация, Р – рыбное хозяйство, Н – борьба с наводнениями.

хранилищ и прудов, предназначенных в основном для орошения и хозяйственного водоснабжения сельских объектов, гораздо реже – в каче-

стве накопителей стоков. По данным Верхне-Обского бассейнового водохозяйственного управления (ВОБВУ), в бассейне Верхней и Средней Оби насчитывается более 1100 искусственных водоемов с объемом каждого более 500 тыс. м³ (в том числе 12 водохранилищ с объемами более 10 млн м³), из которых 60 % сосредоточено в Кемеровской области.

Достаточно большое количество прудов и малых водохранилищ (около 400) имеется даже на территории Томской области с ее неблагоприятными условиями для ведения эффективного сельского хозяйства. Следует также отметить, что еще в 1970-е годы было начато строительство крупного гидроузла на р. Томи у поселка Крапивино, а позже – в 1980-е годы – был спроектирован каскад водохранилищ на р. Катунь. Но все работы по этим объектам в конце 1980-х – начале 1990-х годов были приостановлены по ряду причин социально-экономического характера. Детально ознакомиться с проблемами проектирования, строительства и эксплуатации водохранилищ в Западной Сибири можно в работе [33].

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Укажите регионы России, где расположено наибольшее количество водохранилищ.
2. Укажите регионы России, где расположены самые большие (по объему) водохранилища.
3. Назовите причины создания водохранилищ в России и других странах.

Глава 2

Общая методика расчета водохранилищ

2.1. Гидрологические данные

Параметры водохранилища и режим его эксплуатации устанавливаются на основании данных о притоке воды и наносов. Источником информации служат материалы наблюдений в створе проектируемого гидроузла или в другом створе, где гидрологический режим изучался в течение длительного времени.

При подготовке гидрологического раздела проекта водохранилищ необходимо руководствоваться СП 33-101-2003 и Руководством по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ (1983). Материалы гидрологического раздела должны отражать состояние гидрологической изученности водотока в районе проектируемого водохрани-

лица, содержать результаты подсчета стока в опорных гидростворах, данные о годовом стоке и его внутригодовом распределении, максимальном и минимальном стоке, стоке наносов и ледовом режиме рек.

Материалы наблюдений за стоком представляются в виде таблицы среднемесячных и среднегодовых расходов воды. Таблица расходов дается за водохозяйственные годы (вместо календарных лет). За начало водохозяйственного года берется граница смены низкого стока на высокий, то есть конец межени – начало половодья. Практический смысл принимаемого года заключается в том, что в пределах его замыкается определенный период работы водохранилища: наполнение – сработка. Поскольку чаще всего расчет ведется по среднемесячным значениям расходов, граница водохозяйственного года совмещается с началом первого половодного месяца. При этом границу года следует жестко закрепить, ориентируя ее на более раннее начало половодья. Этим исключается неизбежное искажение стока предшествующей межени высокими расходами начавшегося раннего половодья.

Вся используемая календарная последовательность стока реки должна быть однородной, а наблюдаемый сток приведен к естественному состоянию. Если сток реки регулируется водохранилищами, то выполняются расчеты по его ретрансформации. Если сток изымается, то выполняются расчеты по его восстановлению. Желательно иметь представление и о возможных изменениях условий формирования стока под влиянием хозяйственных мероприятий на водосборе. При проектировании каскадов водохозяйственных установок требования к исходным гидрологическим данным значительно возрастают. В этом случае появляется необходимость устанавливать боковую приточность на участке между створами расположения гидроузлов (под боковым притоком на участке реки понимается суммарный сток воды всех постоянных и временных водотоков, непосредственно впадающих в русло с частного водосбора). В зависимости от наличия исходных гидрометрических данных определение боковой приточности осуществляется следующими способами: 1) по сумме расходов притоков, впадающих в пределах участка (при освещенности частного водосбора наблюдениями не менее 50 % притоков); 2) по методу водного баланса; 3) по разности расходов воды в замыкающем створе расчетного участка и во входном створе.

Гидрологические задачи усложняются при разработке схем совместной работы гидроэлектростанций в каскадах и на разных реках в составе энергосистем, а также в связи с решением проблемы территориального перераспределения стока из одного бассейна в другой. В этих случаях, кроме прочих проблем, возникает необходимость в установле-

нии зон синхронных и асинхронных пространственных колебаний стока. Сложным является и гидрологическое обоснование гидроузлов с водохранилищами глубокого многолетнего регулирования. Здесь существенное значение приобретает вопрос изучения цикличности стока. Накопленные материалы исследований показывают, что колебания стока отдельных лет и сезонов в статистическом смысле не являются не зависимыми от стока смежных лет и удаленных от них лет и сезонов. Иначе говоря, величины стока оказываются связанными между собой. Математически эта связь оценивается коэффициентами корреляции, величины которых в большинстве случаев положительны и существенно больше нуля.

Для начального цикла многовариантных водохозяйственных и водноэнергетических расчетов использование всего длительного наблюдённого гидрологического ряда не всегда целесообразно. В этом случае допустимы расчеты либо по отдельным (характерным по водности) годам, либо по расчетным периодам, включающим последовательности из нескольких маловодных лет подряд, средние по водности и многоводные годы.

Расчетный период должен удовлетворять условиям репрезентативности и отвечать следующим требованиям: 1) по общей водности он должен быть близким (но не больше) к среднемноголетним значениям (норме стока); 2) в состав его должны входить годы различной водности и характерные сочетания лет различной водности; 3) коэффициент изменчивости C_v годового стока за выбранный расчетный период должен быть близким (но не меньше) к коэффициенту изменчивости годового стока за весь имеющийся гидрологический ряд. Длительность расчетного ряда обычно принимается не менее 15–20 лет. Указанная величина условна и требует конкретного обоснования в зависимости от характера колебаний стока и глубины его регулирования водохранилищем.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите основные издания Государственного водного кадастра (ГВК), содержащие сведения о водном режиме рек.
2. Перечислите содержащиеся в ГВК гидрологические параметры и периоды осреднения, для которых получены эти параметры.
3. Назовите процедуры статистического анализа, позволяющие провести проверку гидрологических рядов на однородность.
4. Назовите методы определения среднемноголетних расходов воды и коэффициентов вариации.

5. Дайте определение понятия «обеспеченность случайной величины» и кратко опишите процедуру определения эмпирической обеспеченности.
6. Что необходимо знать для описания «поведения» расходов воды.

2.2. Топографические материалы

Основной топографической характеристикой водохранилища являются кривые зависимости площадей зеркала (F) и объемов (V) от подпорного уровня (наполнения водохранилища) (рис. 9). Для расчета этих характеристик необходимо иметь, как правило, топографические карты в масштабе 1:25000 (и крупнее). Площади зеркала водохранилища при тех или иных положениях подпорного уровня определяются планиметрированием, палеткой или весовым способом на картах площадей, ограниченных контурами горизонталей и линией продольной оси подпорного сооружения, замыкающей горизонтали с обоих берегов. При наличии топографических материалов в цифровом векторном виде соответствующего масштаба, определение площадей можно проводить средствами ГИС-технологий. Для построения зависимости площадей зеркала от уровней необходимо провести определение на картах площадей при всех горизонталях в пределах от начального уровня Z_0 (уреза воды) до возможного подпорного уровня Z_n .

Пусть в пределах намечаемого подпора вплоть до Z_n получен ряд значений площадей зеркала F_1, F_2, \dots, F_n . Соединяя эти точки прямой, можно построить зависимость $F=f(Z)$. Ординаты полученной кривой $V=f(Z)$ для любой отметки Z рассчитываются путем последовательного суммирования от Z_0 элементарных объемов ΔV_i , определяемых по уравнению:

$$\Delta V_i = \Delta Z * (F_i + (F_i * F_{i+1})^{0.5} + F_{i+1}) / 3 \quad (9)$$

или при малом ΔZ :

$$\Delta V_i = \Delta Z * (F_i + F_{i+1}) / 2, \quad (10)$$

где ΔV_i – элементарный объем водохранилища между горизонталями Z_i и Z_{i+1} ; F_i и F_{i+1} – площади зеркала водохранилища, соответственно, при уровнях Z_i и Z_{i+1} ; $\Delta Z = Z_i + Z_{i+1}$.

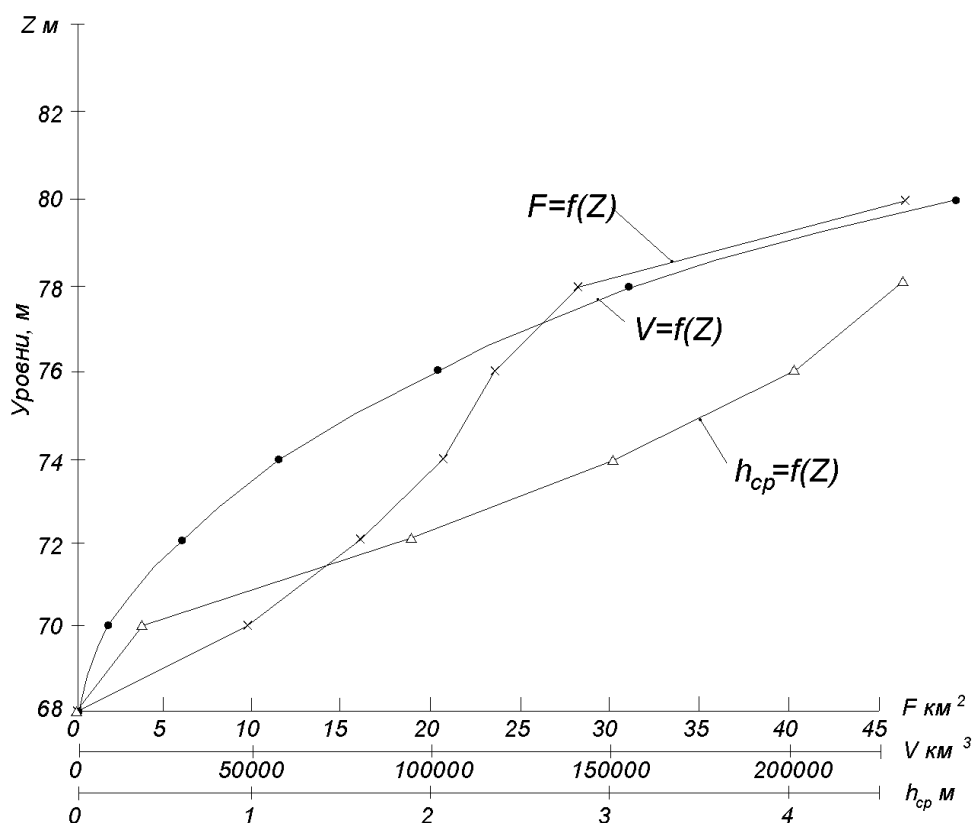


Рис. 9. Кривые зависимости площадей зеркала F , статических объемов V и средних глубин h_{cp} от уровней воды Z

Кроме зависимостей $F = f(Z)$ и $V = f(Z)$ строится зависимость средней глубины от уровней $h_{cp} = f(Z)$. Средняя глубина водохранилища находится как частное от деления объема воды на площадь зеркала при одной и той же отметке наполнения.

Форма кривой $F = f(Z)$ определяется конфигурацией долины и может иметь неправильное очертание. Зависимость $V = f(Z)$ выражается плавной выпуклой кривой параболического вида. Учитывая, что кривая $V = f(Z)$ рассчитана в условиях горизонтальности уровня водохранилища, то есть отвечает гидростатическому равновесию неподвижной жидкости, она носит название статической кривой объемов водохранилища.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Укажите допустимые масштабы карт, по которым определяются морфометрические характеристики водных объектов.
2. Какие морфометрические характеристики водных объектов могут быть получены с помощью картографического материала.

3. Назовите способы определения площадей водного зеркала искусственных и естественных водоемов.

2.3. Общая характеристика методов расчета

Установление параметров водохранилища (емкости, отдачи и режима его работы) производится на основе анализа режима речного стока. При этом имеется в виду, что колебания фазово-однородных величин стока носят случайный характер, подчиняющийся определенной закономерности лишь в смысле распределения вероятностей. Только внутригодовой ход стока имеет закономерность функционального характера, отчетливо проявляющуюся в циклической смене фаз по временам года. Эти обстоятельства определяют следующие основные принципы использования гидрометрических материалов при расчетах по регулированию стока [4, 20].

1. Календарный ход стока на будущий длительный период работы водохранилища не может быть предсказан заранее, можно предвидеть лишь вероятности различных сочетаний стока (гидропрогнозы, имеющие заблаговременность от нескольких дней до 1–2 месяцев и даже до года, принимаются во внимание по мере возможности как в расчетах, так и при эксплуатации водохозяйственных установок).

2. Конкретный ряд стока за время наблюдений позволяет получить представление о возможных в будущем особенностях водохозяйственного режима и об их вероятностях.

Исходя из указанных принципов, в существующей теории регулирования стока рассматриваются три группы методов водохозяйственных расчетов в отношении использования ряда гидрологических наблюдений речного стока за прошедший период.

Календарные методы: *выполнение расчетов непосредственно по календарным естественным, не искаженным человеческой деятельностью, гидрологическим рядам с последующей статистической обработкой их результатов.* Способ наиболее широко распространен в проектной практике. В нем предполагается, что используемые для расчета данные прошлых наблюдений отражают все сложные закономерности процесса стока в будущем. Достоинством его является наглядность и универсальность в смысле области применения, что весьма важно при разработке планов эксплуатации водохранилищ и компенсирующего регулирования отдачи в сложных водохозяйственных системах. Однако небольшая длина ряда наблюдений за стоком иногда приводит к значи-

тельными погрешностям при определении тех или иных водохозяйственных параметров.

Вероятностные методы: *проведение расчетов регулирования стока по статистическим характеристикам исходных рядов стока.* Вероятностные методы позволяют теоретически оценить вероятности различных чередований водности рек. В результате исключается возможная ошибка в оценке регулирующей способности водохранилищ при расчете по коротким гидрологическим рядам.

Метод математического моделирования или метод статистических испытаний (Монте-Карло). *Основная идея этого метода заключается в создании математической модели процесса речного стока.* Метод имеет общие черты с двумя вышеотмеченными способами использования гидрологических данных в выполняемых водохозяйственных расчетах. Общим с первым способом является то, что и здесь водохозяйственные расчеты производятся непосредственно по гидрологическому ряду, который в отличие от наблюдаемого теоретически создан путем реализации процесса стока. Эта реализация достигается через установленные статистические параметры, то есть функцию распределения вероятностей стока, что является общим со вторым способом. Статистические испытания дополняют наблюдаемый ряд, который является лишь вариантом чередования маловодных и многоводных лет и сезонов, что имеет большое значение для правильного решения задач многолетнего регулирования стока.

Согласно С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю (1982), статистическое моделирование гидрологических рядов основывается на следующих положениях:

- 1) задается безусловное распределение вероятностей рассматриваемых величин;
- 2) принимается во внимание корреляция между смежными членами последовательности; задается коэффициент автокорреляции.

Методика моделирования включает в себя следующие операции:

- 1) построение безусловной кривой обеспеченности гидрологических величин (тип кривой во многих случаях принимается соответствующим гамма-распределению);
- 2) случайным розыгрышем определяется последовательность обеспеченностей;
- 3) дальнейший порядок моделирования зависит от того, какой тип автокорреляции служит предметом исследования.

Подробное изложение этих вопросов и метода Монте-Карло, в целом, можно найти в работах [15, 27, 28]. Здесь лишь приведем неко-

торые расчетные уравнения, позволяющие провести моделирование величин среднегодовых расходов воды в случаях [15]:

1) нормальной корреляции между смежными значениями:

$$k_i = 1 + r \times \left(\xi_{i-1} - 1 \right) \times \left(\xi_{p_i} - 1 \right) \times \sqrt{1 - r^2}, \quad (11)$$

где k – модульный коэффициент (Q_i/Q_{cp}); i – номер вычисляемого члена последовательности; k_{p_i} – модульный коэффициент расхода, соответствующего обеспеченности P_i , полученной по случайному розыгрышу для i -го элемента (определяется по таблице гамма-распределения); r – коэффициент корреляции;

2) нормализованной автокорреляции:

$$k_i = 1 + r \times \left(\xi_{i-1} - 1 \right) \times \Phi_{P_i} \times C_v \times \sqrt{1 - r^2}, \quad (12)$$

где Φ – нормированное отклонение, отвечающее полученной по случайному розыгрышу обеспеченности; C_v – коэффициент вариации;

3) гамма-корреляции:

$$k_i = 1 + r \times \left(\xi_{i-1} - 1 \right), \quad (13)$$

$$C_{v_{усл}} = \frac{C_v \times \left[\left(-r^2 \right) \times 2 \times r \times \left(-r \right) \times k_{i-1} \right]}{1 + r \times \left(\xi_{i-1} - 1 \right)}, \quad (14)$$

4) корреляции между обеспеченностями (расчеты выполняются непосредственно по ряду обеспеченностей, полученных случайным розыгрышем).

Принятие того или иного метода за основу обуславливается длительностью имеющего гидрологического ряда и намечаемой степенью регулирования стока, определяющей продолжительность циклов сработки и наполнений водохранилища.

При сезонном регулировании стока, когда цикл работы водохранилища замыкается в пределах каждого года, обоснование параметров водохранилищ, построение диспетчерских правил управления режимом их работы и оценку гарантированных и среднемноголетних величин отдач водохранилищ практически всегда с нужной точностью можно выполнить непосредственно по ряду наблюдений, если его длина составляет не менее 25–30 лет (первый способ). В этих случаях статистические методы привлекаются лишь для получения экстремальных значений стока, не уловленных наблюдениями.

Достаточно сложным случаем является проектирование водохранилища многолетнего регулирования стока, при котором цикл заполнения и сработки водохранилища измеряется несколькими годами. Поэтому для расчетов многолетнего регулирования стока по календарному гидрологическому ряду необходимо, чтобы ряд был длительным и включал в себя группировку маловодных лет, дающих представление о

критической сработке заданного объема водохранилища. Так как в практике обычно приходится иметь дело с гидрологическими рядами ограниченной длительности, то за основу расчетов многолетнего регулирования стока принимается второй или третий способ, то есть способ с использованием кривых распределения вероятностей стока или гидрологических рядов, смоделированных по методу Монте-Карло. Наблюденные гидрологические ряды в этом случае используются для получения характеристик режима регулирования и при разработке правил управления работой водохранилищ.

Вероятностные методы и методы математического моделирования разработаны применительно к параметрам годового стока Cv_2 (коэффициент вариации), Cs_2 (коэффициент асимметрии) и r_1 (коэффициент автокорреляции со сдвижкой в 1 год) в предположении, что коэффициенты корреляции годовых величин стока через два года и более незначительны. Но в ряде случаев данные коэффициенты являются значимыми и, как показали исследования В.А. Шелутко, учет их может привести к увеличению многолетнего объема водохранилища в зоне больших Cv_2 и α до 10–15 %.

В целом, у рассмотренных приемов расчета есть свои достоинства и недостатки. Расчет непосредственно по стоку истекшего периода отличается наглядностью и удобством применения к любому сколь угодно сложному водохозяйственному режиму. Недостатками его являются:

- 1) неопределенность обеспеченности и поэтому несопоставимость результатов водохозяйственных расчетов не только по разным рекам, но даже и для одной реки при различных вариантах регулирования;
- 2) невозможность расчета при отсутствии достаточно продолжительных наблюдений за стоком данной реки;
- 3) невозможность обобщения выводов расчета.

Расчет по обобщенным характеристикам стока реки в большей степени свободен от указанных недостатков. Он может давать убедительные результаты только в сочетании с фактическими данными и если в нем правильно отражаются указанные закономерности. Водохозяйственный расчет непосредственно по фактическим многолетним данным о стоке не обходится без статистических элементов, точно также и обобщенный метод расчетов основывается, прежде всего, на стоковых параметрах по данной реке и окружающим ее бассейнам.

Гидрологическая основа для расчета (фактические данные) входит в обобщенный расчет в виде устанавливаемых по ним исходных статистических параметров стока и его внутригодового распределения,

которые при отсутствии фактических данных определяются также и косвенными путями, применяющимися в гидрологии. Статистические элементы при расчетах по фактическому ряду стока входят, например, при определении среднего объема стока за год, при оценке повторяемости стока и так далее. Особую роль играет введение понятия гарантийности при определении и назначении допустимого числа перебойных лет в фактическом ряду.

В результате критерий вероятности в явной или неявной форме берется в основу непосредственного расчета стока за истекший период. Определенная длительность периода отражает и соответствующий ей вероятный размах экстремальных отклонений стока, определяющих условия регулирования. Этот размах тем больше, чем длиннее период. Поэтому, вычисляя емкость по ходу стока за довольно длительный период (например, за 20 лет), можно ожидать, что она окажется достаточной для повторяемости сочетаний стока один раз в столько же лет. Такое определение необходимой емкости водохранилища могло быть верным только в применении к средней ее величине из нескольких расчетов (например, из ряда 20-летних). Для каждого же отдельного случая (ряда) обеспеченность бесперебойной работы водохранилища, рассчитанного по стоку истекшего периода, подвержена значительным колебаниям. Очевидно, чем менее полными являются исходные стоковые данные для расчетов обобщенным методом на основе теории вероятностей, тем менее точными будут и результаты расчета. Расчет непосредственно по недостаточным фактическим данным будет еще более приближенным (или просто невозможным). Кроме того, нельзя забывать трудностей накопления гидрометрических материалов в условиях весьма развитой и крайне разнообразной гидрографической сети России с различными климатическими зонами и многочисленными типами гидрологического режима рек. Поэтому при отсутствии стоковых рядов для большинства малых, а иногда и для средних рек, обобщенный метод расчета приобретает особо важное значение.

Расчеты по имеющимся фактическим рядам стока без контроля по обобщенному методу нельзя считать надежными, так как ни один из имеющихся рядов (даже из числа наиболее длительных) не может охватить всевозможные комбинации последовательностей величин стока. Наблюдаемые же за прошедшее время сочетания в ходе стока, вообще говоря, неповторимы. Поэтому каждый ряд стока представляет собой лишь случайную выборку, соответствующую условиям только данного ряда.

Вероятностный метод расчета по статистическим параметрам того же ряда рассматривает всевозможные сочетания величин стока (с учетом отсутствующих, но возможных в данном ряду), исследует эти величины как свободно варьирующие (и смысле их размеров и последовательности). Этим самым исключается влияние случайных особенностей периода гидрометрических наблюдений. Указанные условия и особенности расчетов по вероятностному методу способствовали широкому его распространению не только при ограниченных сведениях о стоке, но и наряду с расчетами по фактическим длительным рядам, а также для контроля их результатов.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите основные методы расчетов регулирования стока.
2. В чем преимущества и недостатки расчетов по рядам фактических наблюдений относительно других методов.
3. Кратко опишите сущность и процедуру использования метода Монте-Карло.

2.4. Расчеты к обоснованию основных параметров водохранилища и режима его эксплуатации

Расчеты для обоснования параметров водохранилища заключаются в последовательном определении для ряда заданных вариантов НПУ оптимальных уровней сработок УМО и соответствующих им величин гарантированной водоотдачи (мощности, годовой выработки электроэнергии, располагаемой и установленной мощностей). После этого обосновывается сама отметка НПУ путем сопоставления технико-экономических показателей вариантов НПУ. Первоначально подобные расчеты, ввиду их большого количества, производятся в сокращенном объеме обобщенными методами.

Расчеты первоначального наполнения водохранилища выполняются, как правило, применительно к многоводным, средним и маловодным условиям. По многоводным условиям устанавливаются темпы роста подпорных сооружений, по средним и маловодным – водноэнергетические показатели ГЭС в период от подъема уровня верхнего бьефа (водохранилища) до проектных отметок (период временной эксплуатации). Для периода временной эксплуатации обычно определяются следующие водно-энергетические показатели ГЭС: годовая выработка электроэнергии в средних по водности условиях, годовая и месячные выработки (мощности) в расчетных маловодных условиях (90 или 95 %

обеспеченности), располагаемая по напору мощность в расчетных маловодных условиях.

Длительность первоначального наполнения водохранилища зависит от его объема и предстоящих гидрологических условий и может измеряться месяцами или годами. Расчеты первоначального наполнения водохранилища выполняются балансовым методом по смоделированным рядам расходов воды различной водности. Этот способ используется для крупных водохранилищ, наполнение которых возможно осуществить за несколько лет. В случае небольшого объема водохранилищ расчеты обычно проводятся по характерным (по водности) годам.

При моделировании теоретического маловодного периода 90 или 95 %-й обеспеченности из n лет коэффициент изменчивости стока для этого ряда лет (n -летия) определяется по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля:

$$Cv_n = \frac{Cv_1}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2 \times r_1}{n \times (1 - r_1)} \left(n - \frac{1 - r_1^n}{1 - r_1} \right)}, \quad (15)$$

где Cv_1 – коэффициент изменчивости годового стока в створе проектируемого сооружения; r_1 – коэффициент корреляции между годовым стоком смежных лет. При $r_1 = 0$ формула упрощается.

Средневодный период в n лет представляет собой повторение средневодного года. Для проведения расчетов первоначального наполнения водохранилища из ряда наблюдений за стоком отбирают годы со среднегодовыми расходами, близкими к среднемноголетнему и среднему за n лет, а затем приводят их к искомым значениям путем умножения среднемесячных расходов модели на соответствующие коэффициенты приводки.

Исходными данными для расчета являются, кроме гидрологических данных, график предполагаемого роста напорного фронта, сроки ввода строительных водосбросов (туннелей) и гидроагрегатов, пропускная способность строительных туннелей и эксплуатационные характеристики гидроагрегатов в зоне пониженных напоров.

2.5. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности

За пределами расчетной обеспеченности P отдачи из водохранилища в связи со сработкой полезного объема водохранилища возможны перебои, то есть снижение отдачи по сравнению с гарантированной. Установление величины снижения отдачи (глубины перебоя) является чрезвычайно важной задачей водохозяйственных расчетов. При сезон-

ном (годовом) регулировании величины отдачи за пределами расчетной обеспеченности устанавливаются на основе кривой обеспеченности межennaleго или годового естественного стока, так как наполнение и сработка водохранилища сезонного регулирования стока происходит в течение каждого года и на смежные годы влияния не оказывает.

При многолетнем регулировании стока вероятность перебоя отдачи в смежном году повышается. В режиме водохранилищ с большой отдачей α длительные периоды нормальной работы могут сменяться группами лет с ограниченной отдачей. Глубина перебоя (дефицит в гарантированной отдаче) бывает различной по перебойным годам и изменяется от нуля до величины, близкой в пределе к годовой отдаче брутто. Величина отдачи за пределами расчетной обеспеченности может быть установлена в этом случае по кривой обеспеченности, отражающей работу водохранилища и течение длительного периода.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите основные подходы к обоснованию параметров эксплуатации водохранилища.
2. Какие данные используются для определения отдачи водохранилища за пределами расчетной обеспеченности?

Глава 3 Заиление водохранилищ

Водоохранилища являются аккумуляторами наносов. Отложение мелких (взвешенных) наносов называется заилением, крупных (влекомых) – занесением. Если не удастся выделить мелкие и крупные наносы, то общий процесс аккумуляции наносов называется заилением [22].

В процессе заиления водохранилища кривая подпора повышается и распространяется вверх по течению, а в пределах подпорного бьефа образуется уклон, обеспечивающий скорости течения, достаточные для перемещения наносов. Среди последних в большинстве случаев преобладает взвешенные фракции, и лишь для небольших водохранилищ на горных реках угроза их занесения связана, преимущественно, с влекомыми наносами.

По развитию процесса заиления можно выделить три зоны водохранилища:

- 1) верхнюю, где режим потока изменяется мало и отложения наносов невелики;

- 2) среднюю, где гидравлические условия сильно изменены подпором и где выпадает основная масса песчаных наносов;
- 3) нижнюю, куда попадает только илисто-глинистые фракции.

В процессе заиления границы указанных зон смещаются вниз по течению. В то же время повышение кривой подпора сопровождается отложением наносов вверх по течению на участках рек, первоначально находившихся вне подпора.

При малых уклонах реки местоположения участка выклинивания подпора меняются в широких пределах, а наносы одновременно осаждаются на большой длине, не создавая концентрированных отложений. При больших уклонах реки ниже места выклинивания кривой подпора отложения образуют своего рода бар, постепенно распространяющийся, в основном, вниз по течению. В этих случаях руслоформирующим материалом в бытовых условиях часто является не песок, перемещающийся во взвешенном состоянии, а влекомый галечниковый материал. На мелких водохранилищах и прудах наблюдается отложение илистых наносов сразу по всей площади. Процесс заиления водохранилища, таким образом, отличается специфическими особенностями и требует глубокого анализа в каждом конкретном случае.

В результате заиления водохранилища уменьшается его эффективность, как регулятора стока (вследствие уменьшения полезного объема), и происходит дополнительное затопление земель в процессе повышения кривой подпора. В связи с этим при проектировании следует определить ход этих процессов во времени.

Сначала проводят ориентировочную оценку сроков заиления T (в годах) без учета частичного выноса наносов в нижний бьеф:

$$T = W/(G/\rho_{отл}), \quad (16)$$

где W – объем водохранилища; G – средний многолетний сток наносов, млн т/год; $\rho_{отл}$ – плотность отложений, принимаемая равной 0.4–0.6 т/м³ для илистых, 1.0–1.2 т/м³ для песчано-илистых и 1.5 т/м³ для песчаных наносов.

Затем (I этап уточнений) процесс заиления водохранилища условно разделяют на два периода:

- 1) в подпорном бьефе формируется тело заиления с продольным уклоном, обеспечивающим транзит руслоформирующих фракций наносов, и отметкой у плотины на уровне наибольшей сработки водохранилища;
- 2) тело заиления имеет у плотины отметку, равную отметке НПУ.

В конце каждого из этих периодов в теле заиления формируется русло, отвечающее среднеполоводному расходу воды Q_0 , шириной B и

глубиной h_{cp} со следующими соотношениями между параметрами потока

$$Q_0 = v \times B \times h_{cp}, \quad (17)$$

$$\frac{\sqrt{B}}{h_{cp}} = \Gamma, \quad (18)$$

$$V = C \times (I \times h_{cp})^{0.5}, \quad (19)$$

$$C = \frac{h_{cp}^y}{n}, \quad (20)$$

где $\Gamma = 4 \dots 5$ – коэффициент морфологической зависимости, $m^{-0.5}$; I – продольный уклон водотока в теле заиления; n – коэффициент шероховатости; y – показатель степени (примерно 1/6).

При этих условиях должно обеспечиваться транспортирование поступающих сверху наносов со среднеполоводной мутностью ρ_0 (бытовое значение), зависимость которой от скорости течения описывается формулой (21)

$$\rho = \alpha \times \left(\frac{v}{\sqrt[3]{h_{cp}}} \right)^3, \quad (21)$$

где α – эмпирический коэффициент, определяемый по материалам наблюдений.

В результате совместного решения уравнений (17–21) определяют величину уклона русла, который должен сформироваться в теле заиления. После этого по топографическим данным и с учетом вычисленного значения I рассчитывают объем призмы заиления. Подставив полученное значение и среднюю величину стока наносов, задерживаемых водохранилищем, в формулу (16), находят период заиления.

Если по данным проведенных расчетов оказывается, что заметное сокращение полезного объема водохранилища происходит уже за несколько десятилетий, проводят более подробные вычисления (II этап), в ходе которых используют метод баланса наносов.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем заключается опасность заиления водохранилища?
2. Какие гидрологические данные необходимо знать для расчета заиления водохранилища?
3. Какие факторы определяют интенсивность и продолжительность заиления водохранилища?

Глава 4

Потери воды из водохранилищ

В водохозяйственных расчетах, проводимых по стоковым данным за период наблюдений, предшествующих составлению проекта водохранилища, учитываются потери воды только на дополнительное испарение и фильтрацию. На последующих стадиях подлежат учету потери воды на шлюзование и ледообразование. Вода, расходуемая на испарение, теряется для данного водохранилища. Вода, фильтрующаяся в нижний бьеф, теряется лишь для потребителей, использующих воду из водохранилища.

4.1. Потери воды на испарение

Испарение – это процесс миграции воды с поверхности тела в атмосферу. Поскольку между испаряющей поверхностью и атмосферой существует непрерывный противоположно направленный обмен молекулами воды, то под испарением понимают результирующую этого обмена.

Слой дополнительного испарения с поверхности водохранилища рассчитывается по формуле

$$E_d = E_g - E_c, \quad (22)$$

а средний за интервал времени Δt расход потерь на дополнительное испарение в $\text{м}^3/\text{с}$ – по формуле

$$Q_u = (E_d \times F_{cp}) / (\Delta t * 1000), \quad (23)$$

где E_g – слой испарения с водной поверхности, мм; E_c – слой испарения с ложа водохранилища до его заполнения (мм), то есть с намечаемой к затоплению суши; F_{cp} – средняя площадь зеркала водохранилища в м^2 , которая находится по кривой $F = f(Z)$ при уровне, отвечающем среднему наполнению водохранилища за расчетный интервал времени Δt в секундах: декаду, месяц (при расчете регулирования по календарному гидрологическому ряду) или сезон, год (при расчетах регулирования обобщенными методами); 1000 – перевод мм в м. Потери на испарение рассчитываются, как правило, для периода открытого русла. В целом, потери на дополнительное испарение изменяются в широком диапазоне: от нуля для северных районов до 10 % среднего многолетнего стока для южных районов.

Оценка испарения E_g с водной поверхности может быть произведена с использованием нескольких методов: *пульсационного, турбулентной диффузии, водных испарителей, водного и теплового балан-*

сов, по эмпирическим формулам. Большое количество методов вызвано тем, что сложный механизм взаимодействия между водной поверхностью водоема и прилегающей к ней воздушной массой полностью не раскрыт. Более точным из разработанных методов считается инструментальный (прямой) метод, то есть метод непосредственного измерения слоя испарившейся воды с помощью водных испарителей. К прямым методам относится и пульсационный метод. Прямые методы не всегда могут быть применены вследствие их трудоемкости и невозможности использования при разработке проекта. Поэтому для определения испарения с поверхности воды применяют косвенные методы, основанные на использовании уравнений водного и теплового балансов, турбулентной диффузии водяного пара в атмосфере. Разработаны также эмпирические формулы для расчета испарения по метеорологическим данным, которые получили широкое применение в гидрологической практике. Ниже приведена краткая характеристика основных методов расчета испарения с водной поверхности.

Метод водных испарителей. Для характеристики испарения с водной поверхности на территории бывшего СССР была создана сеть водно-испарительных площадок, оборудованных стандартными сетевыми испаромерами ГГИ–3000 (площадью 0.3 м^2 , высотой 0.6 м) и эталонными водно-испарительными бассейнами (площадью 20 м^2 , глубиной 1 м). Испарение между сроками наблюдений по испаромеру вычисляется как разность между уровнями воды в нем в предыдущий и текущий сроки наблюдений плюс слой осадков за период наблюдений. Чтобы воспользоваться данными наблюдений по испаромеру для определения испарения с изучаемого водоема необходимо эти данные откорректировать поправочным коэффициентом. Так, например, расчетное уравнение перехода от показаний прибора к испарению с поверхности водоемов площадью до 1000 км^2 , полученное В.С. Голубевым, имеет следующий вид:

$$E = 0.43 \times E_{0.3} + 0.9 \times h_{\odot} - 1.2 \times \Delta h_{\odot} + 2.4 \times \tau_d - 8.1 \times \Delta \tau_d - 35, \quad (24)$$

где E и $E_{0.3}$ – месячные нормы испарения, соответственно, с поверхности водоема и испаромера ГГИ–3000, мм/мес; h_{\odot} и τ_d – полуденная высота Солнца (градус) и продолжительность дня (ч) от восхода до захода Солнца на 15-е число месяца; Δh_{\odot} и $\Delta \tau_d$ – изменение полуденной высоты Солнца (градус) и продолжительности дня (ч) между последним и первым числом месяца.

Пульсационный метод. Известно, что потоки воздуха в атмосфере почти всегда имеют турбулентный характер движения. Поэтому

уравнение переноса водяного пара в атмосфере необходимо привести к виду, учитывающему этот характер движения. Для этой цели используют предложенный О. Рейнольдсом метод осреднения по времени входящих в уравнение величин. Перед осреднением все переменные величины представляются в виде $N = N_0 + N'$, где N_0 – среднее значение величины N , N' – ее пульсационная добавка. После выполнения осреднения, с соблюдением всех его свойств, проводится анализ полученного уравнения при следующих допущениях: 1) фазовые переходы водяного пара в воздухе отсутствуют; 2) градиенты характеристик атмосферы в горизонтальных направлениях равны нулю; 3) по высоте приземного слоя атмосферы вертикальный поток пара постоянный. В результате получим выражение для расчета испарения в виде

$$E = \rho \times \overline{u' \times q'}, \quad (25)$$

где ρ – плотность воздуха, u' и q' – пульсационные добавки соответственно скорости ветра и удельной влажности воздуха. Формула (25) имеет простой вид, но этот метод практического применения для расчета испарения не получил из-за отсутствия высокочувствительной аппаратуры для измерения пульсаций влажности воздуха.

Метод водного баланса. Метод предусматривает использование уравнения водного баланса, составленного применительно к водоему для оценки испарения в виде:

$$E = x + y_1 - y_2 + g_1 - g_2 + \Delta H, \quad (26)$$

где E – испарение с поверхности воды; x – осадки, выпадающие на поверхность воды, y_1 и y_2 – приток и отток поверхностных вод; g_1 и g_2 – приток и отток подземных вод; ΔH – изменение уровня воды в водоеме. Рассматриваемый метод имеет ограничения, определяемые точностью измерения составляющих водного баланса.

Метод теплового баланса. Метод предусматривает использование уравнения теплового баланса, записанного для водной поверхности в следующем виде:

$$R = L_u \times E + P + B, \quad (27)$$

где R – радиационный баланс; L_u – удельная теплота испарения; E – испарение; P – турбулентный теплообмен между водной поверхностью и воздухом; B – теплообмен между водной поверхностью и нижележащими слоями воды. Используя отношение Боуэна, устанавливающее связь между количеством теплоты, получаемой водной поверхностью от воздуха при турбулентном теплообмене, и количеством теплоты, затрачиваемой на испарение, получим уравнение (28).

$$E = \frac{(R - B) \times \Delta e}{\Delta e + 0.64 \times \Delta t}, \quad (28)$$

где E в мм/ч; R (радиационный баланс = испарение \times скрытая теплота испарения + поток тепла в почву + поток тепла от подстилающей поверхности к атмосфере) и B (поток тепла в почву); Δt – разность температур воздуха на высотах 0.5 и 2 м; Δe – разность упругости водяного пара на высотах 0.5 и 2 м.

Метод турбулентной диффузии. Этот метод является одним из самых перспективных для оценки испарения с поверхности водоема. Он разработан на основании использования теории турбулентной диффузии. Базовое уравнение для вывода рабочих формул можно записать в виде

$$\frac{d(\rho \times q)}{dt} = \frac{\partial^2(\rho \times k_n \times q)}{\partial n^2}, \quad (29)$$

где k_n – коэффициент турбулентного обмена по оси n . Сделав ряд допущений и выполнив интегрирование, получим уравнение (30):

$$E = \rho \times k \times \frac{0.623}{P} \times \frac{\partial e}{\partial z}, \quad (30)$$

где P – атмосферное давление, e – парциальное давление (упругость) водяного пара. В свою очередь, сделав подстановку в формулу выражения для коэффициента турбулентного обмена, получим зависимость (31), пригодную для практического использования:

$$E = 0.12 \times \omega_1 \times (E' - e_2), \quad (31)$$

где ω_1 – скорость ветра на высоте 1 м, E' и e_2 – давление насыщенного водяного пара и парциальное давление на высоте 2 м, E – слой испарившейся воды в мм/сут.

Расчет испарения по эмпирическим формулам. В настоящее время получено большое количество эмпирических формул, но почти все они имеют структуру, предложенную еще Дальтоном (1802 г.):

$$E = \varepsilon_0 \times (E' - e_2), \quad (32)$$

где ε_0 – коэффициент, зависящий от скорости ветра.

Для расчета испарения с поверхности суши используются различные методы, в целом, соответствующие методам для расчета испарения с водной поверхности. Они могут быть разделены на методы определения с помощью приборов (прямые) и расчетные (косвенные) методы. Рассмотрим последние подробнее. С помощью указанных методов оценивается суммарное испарение без подразделения его на испарение с почвы, транспирацию (испарение растениями) и испарение влаги, задержанной стеблями и листьями при выпадении осадков. Это объясня-

ется, прежде всего, сложностью их разделения, а также тем, что перечисленные виды испарения осуществляются одновременно и на практике учитываются совместно.

Испарение влаги с почвы, лишенной растительности, зависит от ее содержания в почве и глубины залегания, пористости грунта и размеров пор. Эти и другие факторы определяют приток влаги в жидком и парообразном состоянии к поверхности почвы по порам.

В настоящее время широкое распространение получили методы расчета испарения с поверхности суши, основанные на его связи с испаряемостью, осадками и другими элементами водного баланса. К ним следует отнести, например, уравнения Э.М. Ольдекопа, Р. Шрейбера, В.С. Мезенцева, М.И. Будыко и других авторов.

М.И. Будыко, обобщив уравнения Шрейбера и Ольдекопа, получил следующее выражение:

$$E = \sqrt{E_0 \times x \times \left[1 - \exp\left(-\frac{E_0}{x}\right) \times th\left(\frac{x}{E_0}\right) \right]}, \quad (33)$$

где x – норма годовых осадков, E_0 – испаряемость ($E_0 = \frac{R_0}{L_E}$, R_0 – норма радиационного баланса увлажненной поверхности, L_E – удельная теплота испарения).

Уравнение В.С. Мезенцева имеет вид

$$E = E_M \times \left(1 + \left[\frac{E + W_1 - W_2}{E_M} \right]^n \right)^{-\frac{1}{n}}, \quad (34)$$

где E_M – максимально возможное испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях; x – осадки; W_1 и W_2 – влагозапасы метрового слоя почвы на начало и конец периода, для которого вычисляется испарение; n – параметр, характеризующий расчлененность рельефа.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение понятий «испарение» и «суммарное испарение».
2. Перечислите основные методы расчета испарения с водной поверхности.
3. Какие метеорологические величины могут измениться после создания водохранилища?

4.2. Потери воды на фильтрацию

Под *фильтрацией в пределах гидротехнического сооружения* понимается движение обтекающего фильтрационного потока как под сооружением – в толще основания, так и в обход – в примыканиях к берегам и дамбам, сопрягающих сооружение с берегом или другим гидротехническим сооружением (*боковая фильтрация*). Так как до возведения сооружения долина реки обычно имеет подземный поток, то подпор в реке вызывает подпор и этих вод, изменяющий их расход к реке. При количественной оценке условий движения подземных вод в районах гидротехнических сооружений рассматривают отдельно фильтрацию воды под плотиной, в обход ее плечевых примыканий и фильтрацию воды из водохранилища вне зоны влияния нижнего бьефа. Потери воды на фильтрацию под плотиной и в обход плотины и через тело плотины принимаются, как правило, постоянными в течение всего времени.

Последовательное изложение теории и способов расчета фильтрации в пределах гидротехнических сооружений можно найти в работах Н.Н. Павловского, В.И. Аравина, С.Н. Нумерова, М.Д. Чертоусова, Н.Н. Веригина, В.М. Шестакова и других.

4.2.1. Фильтрация воды под плотиной

Для управления фильтрационным потоком под плотиной проектируется ее подземный контур, который, помимо тела плотины, может включать в себя верховой экран, верховую и низовую противофильтрационные завесы, горизонтальный и вертикальный дренаж под флютбетом (подземной частью гидротехнического сооружения) или в нижнем бьефе сооружения.

Верховой экран делается чаще из суглинка, противофильтрационные завесы сооружаются в виде шпунтовой стенки, забиваемой с поверхности земли, или в виде цементационной завесы. Противофильтрационные завесы, как правило, не бывают полностью водонепроницаемыми. Проницаемость шпунтовых стенок обуславливается раскрытием их замков. Проницаемость цементационных завес оценивается коэффициентом фильтрации k равным 0.01–0.1 м/сут. Противофильтрационные завесы могут быть совершенными, если они доводятся до водоупора, и несовершенными, если они не доходят до водоупора.

Фильтрация воды из верхнего бьефа водохранилища в нижний происходит под действием разности напоров $H = H_1 - H_2$, где H_1 и H_2 – соответственно напоры в верхнем и нижнем бьефах, отсчитываемые от дна водохранилища (рис. 10). Разность напоров H также называют *дей-*

ствующим напором. Условия фильтрации воды под плотиной, помимо действующего напора H , предопределяются строением и фильтрационными свойствами горных пород в основании сооружения и контурами подземной части плотины и флютбета. Водопроницаемые породы в основании сооружений могут быть однородными или неоднородными по своим фильтрационным свойствам. Из неоднородных схем строения наибольшим распространением пользуется схема двухслойного пласта, реже встречаются многослойные пласты.

Фильтрационный поток под плотиной является напорным (водоупорной кровлей является непроницаемый подземный контур плотины) и рассматривается как плоский в разрезе, т. е. расход потока под плотиной определяется на единицу ее длины. На рис. 10 приведена схема движения подземных вод под плотиной с плоским флютбетом (не имеющим развитых в глубину конструктивных элементов) при однородном строении. Линиями S показано направление движения вод (линии тока), линиями N – распределение напора в потоке (линии равного напора).

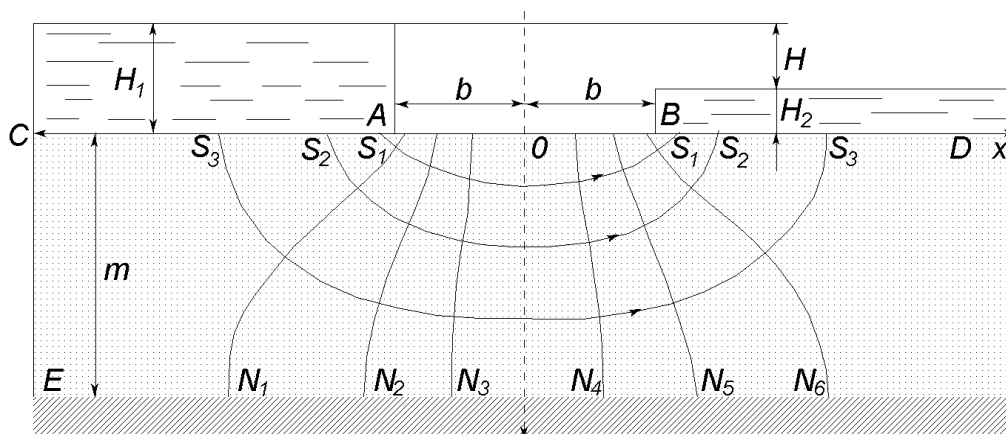


Рис. 10. Линии тока и линии равного напора при фильтрации под плотиной с плоским флютбетом

Фильтрация при однородном строении основания плотины. Фильтрационный расход под основанием сооружения, приходящийся на единицу его длины (принимается $B = 1$ м), определяется по формуле

$$q = k \times H \times q_{\text{пр}}, \quad (35)$$

где H – действующий напор ($H = H_1 - H_2$); $q_{\text{пр}}$ – приведенный фильтрационный расход, т. е. расход при $k = 1$ и $H = 1$.

Приведенный фильтрационный расход определяется в зависимости от формы флютбета, ширины плотины по основанию $2b$ и мощности водопроницаемых пород под ее основанием m . Для случая плоского флютбета (рис. 10) $q_{\text{пр}}$ определяется по графику на рис. 11 а в зависимости от отно-

шения b/m (b – половина ширины флютбета по основанию). Для упрощения расчетов иногда не учитывают незначительное заглубление в породы основания выступающих частей флютбета. С допустимой в практике точностью флютбет при расчетах можно считать плоским, если заглубление конструктивных элементов основания плотины не превышает одной десятой ширины флютбета по низу [12].

Напор в основании флютбета определяется по специальному графику для приведенного напора $h_{пр}$ (рис. 11, б), откуда значения $h_{пр}$ снимаются в зависимости от отношений x/b и b/m , т. е. в зависимости от положения точки на линии флютбета и соотношения между шириной плотины и мощностью пород основания. Под приведенным напором $h_{пр}$ понимается напор в той или иной точке потока H_x , отсчитываемый от уровня воды в нижнем бьефе и выраженный в долях действующего напора, т. е. $h_{пр} = H_x/H$.

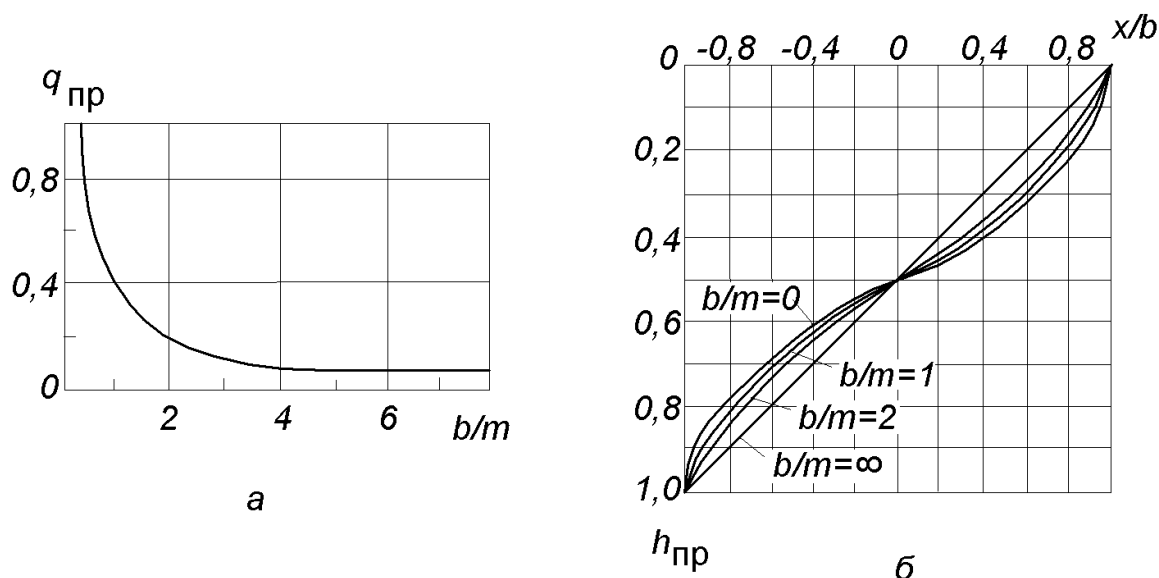


Рис. 11. Вспомогательные графики для фильтрационных расчетов
 а – график $q_{пр} = f(b/m)$; б – график $h_{пр} = f(x/b, b/m)$

Для расчета действующего напора в любой точке можно пользоваться следующим соотношением:

$$H_x = h_{пр} \times H + H_2. \quad (36)$$

При определении $h_{пр}$ координата точки, которая берется на подошве флютбета, отсчитывается от начала координат (середина основания плотины) по оси x в сторону нижнего (+ x) или верхнего (- x) бьефов.

Если мощность водонасыщенных пород под основанием плотины значительная, например при $m/(2b) > 2,5$, то принято считать, что плотина

имеет водопроницаемое основание неограниченной мощности. В таких условиях расход потока ориентировочно можно определять по формуле (35), принимая значения мощности в зависимости от конкретной природной обстановки. Более точные решения разработаны акад. Н.Н. Павловским и изложены в специальной и справочной гидрогеологической литературе.

Расход фильтрационного потока под плотиной при ограниченной мощности водопроницаемых пород в ее основании можно определить по приближенной формуле Каменского:

$$Q = k \times F \times I_{cp} = k \times m \times B \times H / (m + 2 \times b). \quad (37)$$

Формула (37) дает достаточно точные результаты при $m/b \leq 2$.

Определение всех элементов потока под плотиной может быть выполнено по гидродинамической сетке, построенной либо графическим путем, либо с помощью моделирования. При построении сетки в качестве непроницаемых границ рассматриваются подземный контур плотины и поверхность водоупорного ложа, в качестве проницаемых – линии дна водохранилища в верхнем и нижнем бьефах (CA и BD на рис. 10). По сетке для любого участка потока можно определить напор H_x , напорный градиент I , скорость фильтрации v и расход q .

При наличии шпунта или цементационной завесы, расположенных в начальной части флютбета, фильтрационный расход потока под плотиной определяется по уже известной формуле (35). Входящий в эту формулу приведенный расход $q_{пр}$ определяется по графику на рис. 12 в зависимости от параметров s/m и $m/(2b)$. Если при этом шпунт или цементационная завеса располагаются в средней части флютбета, то определяемый по графику приведенный расход следует увеличивать на 5–10 %.

Определение всех расчетных элементов потока при фильтрации под плотиной, имеющей шпунты, цементационные завесы и другие устройства, может быть выполнено и по гидродинамической сетке потока.

Фильтрация при неоднородном строении основания плотины. Если основание плотины сложено горизонтально залегающими чередующимися слоями различной водопроницаемости и небольшой мощности, то для такой толщи предварительно определяют значения максимального (по напластованию) и минимального (нормально к напластованию) коэффициентов фильтрации [28]. Затем находят среднее значение коэффициента фильтрации по формуле

$$k_{cp} = \sqrt{k_{max} \times k_{min}}. \quad (38)$$

В дальнейшем задача решается как для однородного основания плотины, но при этом ширина плотины $2 \times b$ уменьшается в a раз, где $a = \sqrt{k_{max}/k_{min}}$ (т. е. вместо значения $2 \times b$ берут значение $2b / a$). При значи-

тельных мощностях отдельных слоев пласта в основании обычно используются решения, разработанные для схемы двухслойного и реже многослойного пласта.

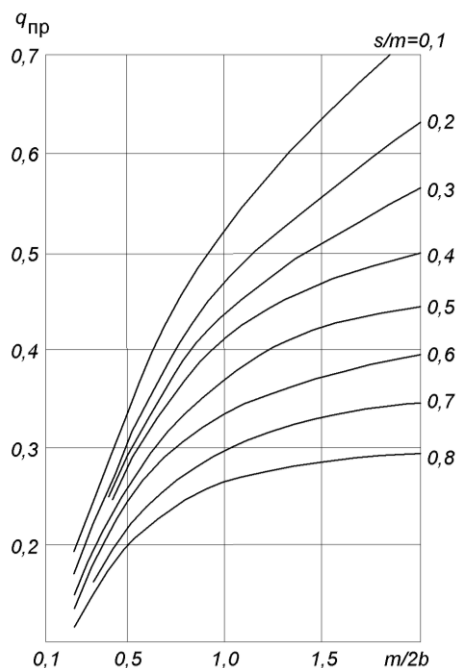


Рис. 12. Вспомогательный график $q_{пр} = f[s/m, m/(2 \times b)]$

Двухслойное строение основания плотины довольно часто встречается в природе. При этом обычно верхний слой имеет меньшую мощность и более низкую водопроницаемость, чем нижний слой. В таких условиях линии фильтрационных токов в верхнем слое близки к вертикальному направлению, а в нижнем – к горизонтальному. На границе слоев происходит резкое преломление линий тока.

Решение задачи для такой двухслойной схемы получено Г.Н. Каменским. Им выведена расчетная формула для определения фильтрационного расхода под плотиной:

$$q = H / [2 \times b / \{ \epsilon_2 \times m_2 \} + 2 \sqrt{m_1 / \{ \epsilon_1 \times k_2 \times m_2 \} }], \quad (39)$$

где k_1, k_2 и m_1, m_2 – коэффициенты фильтрации и мощности верхнего и нижнего слоя, соответственно; H – действующий напор; b – половина ширины флютбета по основанию.

Если в основании плотины залегает более двух достаточно мощных слоев, то в зависимости от конкретных условий, слоистая толща может быть приведена к условно однородной или к схеме двухслойного строения, для которой существует достаточно точное решение. Условное приведение при этом осуществляется по отношению к одному или двум основным слоям, коэффициенты фильтрации которых принимаются за

расчетные. После приведения расчеты фильтрации под плотиной осуществляются по соответствующим формулам для двухслойного или однородного основания.

4.2.2. Способы построения гидродинамических сеток

При фильтрации под водонепроницаемым бетонным сооружением наблюдается неплавно изменяющееся напорное движение грунтовых вод. Снизу область фильтрационного движения ограничена водопором. Движение подземных вод описывается уравнением Лапласа. В случае двумерного профильного потока уравнение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0. \quad (40)$$

Построение гидродинамической сетки проводят с помощью следующих основных способов: аналитического, способа аналогий, графического, физического и математического моделирования.

Аналитический способ требует использования довольно сложных методов теории функций комплексного переменного, конформных отображений, фрагментов и т. п. Аналитические решения развиты академиком Н.Н. Павловским, П.Я. Полубариновой-Кочиной и многими другими учеными. Н.Н. Павловским была доказана единственность решения рассматриваемой задачи о напорной фильтрации под гидротехническими сооружениями. Поскольку аналитические решения не всегда могут быть применены, особенно при сложных очертаниях подземного контура сооружения, широко применяются приближенные методы, в которых с помощью аналогии или графически строятся гидродинамические сетки движения, по которым определяются необходимые параметры, характеризующие движение.

Способ аналогий основан на том, что некоторые физические явления подчиняются уравнению Лапласа, причем в отличие от фильтрации в этих явлениях гораздо проще измерять значения определяемой функции. Например, экспериментальное изучение изменений потенциала однородного электрического поля выполняется легче, чем определение потенциала в различных точках фильтрационного потока.

Метод ЭГДА (метод электродинамических аналогий) разработан Н.Н. Павловским в 1918 г. Если рассматривается плоское движение на модели, то обычно применяется электропроводная бумага или фольга с различной удельной электрической проводимостью (с различным удельным сопротивлением). Когда область фильтрации характеризует-

ся постоянным значением коэффициента фильтрации, удельная электрическая проводимость материала модели должна быть постоянной. В случае области фильтрации, состоящей из нескольких слоев с различными коэффициентами фильтрации, электропроводящая область должна быть составлена из слоев такой же конфигурации с различной удельной электрической проводимостью. При этом граничные условия на модели ЭГДА соответствуют граничным условиям в области фильтрации [13].

Если для потока жидкости и электрического тока обеспечить одинаковые граничные условия, сетки движения в обоих рассматриваемых случаях будут одинаковыми. При этом расположение линий равного потенциала и линий тока не зависит от коэффициента фильтрации (удельной электрической проводимости), напора (разности электрических потенциалов), а определяется (в однородном грунте) только конфигурацией области фильтрации (области, где происходит движение электрического тока).

Метод МАГДА или МАГА (метод магнитогидродинамической аналогии) основан на том, что скалярный потенциал магнитного поля Φ_m (аналог потенциала скорости Φ) в среде с постоянной магнитной проницаемостью также удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial z^2} = 0. \quad (41)$$

Напряженность магнитного поля H_m (аналог скорости движения) представлена ее компонентами (42), которые могут быть измерены с помощью специальных измерительных катушек:

$$H_{m_x} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial x}; \quad H_{m_z} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial z}. \quad (42)$$

Метод МАГА разработан А.Н. Патрашевым. Он особенно эффективен при изучении обтекания тел и потенциального движения сжимаемой жидкости. Модель изготавливается из листовой мягкой стали, на границах устанавливаются электромагниты [21].

Графический способ. Гидродинамическая сетка движения характеризуется, как известно, ортогональностью линий тока и линий равного потенциала и, кроме того, постоянством отношения отрезков, проведенных через середины сторон ячеек сетки. Обычно это отношение принимается равным единице. В этом случае гидродинамическая сетка называется квадратичной. Эти свойства используются при графическом построении гидродинамической сетки движения. Принимаются обычные граничные условия, нулевая линия тока – подземный контур сооружения, последняя линия тока – линия водоупора. Первая линия

равного потенциала – дно верхнего бьефа, последняя линия равного потенциала – дно нижнего бьефа. При этом следует учитывать, что линии равного потенциала (напора) перпендикулярны к первой и последней (водоупор) линиям тока, а линии тока нормальны к поверхности дна в верхнем и нижнем бьефах.

Построение гидродинамической сетки начинается с проведения приблизительного очертания линий тока. На первом этапе проводится линия тока, ближайшая к подземному контуру. Далее разбивают первую ленту расхода (между соседними линиями тока) на криволинейные квадраты. Уточняя очертание этих квадратов, так чтобы средние линии их были равными, а углы – прямыми, получают очертание сетки движения в первой ленте. Переходя далее ко второй и последующим лентам расхода и уточняя очертания всех криволинейных квадратов, строится сетка движения. При этом последняя линия тока, полученная в результате построения, должна совпасть с линией водоупора. Если это не достигнуто, необходимо провести коррекцию построения.

Если рассматривается напорная фильтрация под гидротехническим сооружением в грунте бесконечной глубины, обычная область фильтрации ограничивается полуокружностью с радиусом, равным примерно трем длинам подземной части сооружения. Соответственно ограничивается и область построения гидродинамической сетки движения [39].

Физические модели воспроизводят истинный поток, так как представляют собой насыщенные пористые среды подобно прототипу, но в уменьшенном масштабе. Условия на границах задаются как значения напорной функции, контролируемые столбом воды в открытом колодце. Напоры в водоносном горизонте измеряются пьезометрами (или тензиометрами).

Физические модели наглядны, но довольно громоздки в эксплуатации. Кроме того, строгое соблюдение масштабов при конструировании модели чрезвычайно затруднительно: сложно обеспечить однородность среды, еще сложнее добиться упорядоченной неоднородности, учесть влияние на фильтрационный поток капиллярной каймы, разрыва уровня на водных границах и т. д. [24].

Математическое моделирование. Расчеты фильтрации основаны на решении дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель процесса движения подземных вод, численными методами. При проведении математического моделирования используются:
а) вероятностно-разностный метод конечных элементов (МКЭ); б) метод конечных разностей (МКР).

МКР представляется более наглядным. Преимущества МКЭ заметно проявляются лишь в задачах повышенной сложности и нелинейности изучаемого фильтрационного поля и основаны на более точной пространственной аппроксимации реальной структуры движения и границ потока с помощью криволинейных (призматических) элементов. На практике в качестве основного расчетного метода чаще используется конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений фильтрации.

После сеточного преобразования дифференциальных уравнений с помощью МКР применяются многообразные численные методы, которые можно разделить на две группы: 1) прямые; 2) итерационные. Принципиальное их различие состоит в том, что результатом прямых методов является *точное* решение исходной системы уравнений, в то время как конечный результат итерационных методов является лишь некоторым *асимптотическим приближением* к точному решению.

Наибольшее распространение среди прямых методов расчета имеют: а) метод исключения Гаусса и его модификации; б) метод прогонки. Существует множество различных модификаций итерационных методов, суть которых – поиск решения задачи путем серии последовательных приближений (итераций), начиная от заданного начального приближения.

4.2.3. Фильтрация воды в обход плотины

Если плотина примыкает к берегам, сложенным водопроницаемыми породами, из водохранилища происходит фильтрация воды в обход плечей плотины. При этом образуются фильтрационные токи, траектории движения которых можно приближенно принять за полуэллипсы.

Обходной фильтрационный поток в большинстве случаев оказывается во взаимодействии с потоком грунтовых вод прибрежной территории. Этот поток, двигающийся примерно перпендикулярно обходному потоку, прижимает обходное течение к берегу, стремясь сузить занятую этим течением область. В результате образуется некоторая конечная длина зоны в верхнем бьефе плотины, в пределах которой в береговой грунт на участке примыкания плотины поступает обходной поток. Возможны также условия, при которых влияние подземного потока отсутствует.

Расчет фильтрации в обход плотины *без учета влияния подземного потока* производится по формуле:

$$Q = k \times m \times H \times q_{\text{пр}}, \quad (43)$$

где $q_{\text{пр}}$ – приведенный фильтрационный расход, который определяется в зависимости от формы плечевого примыкания плотины (плоское, со шпунтом), его ширины $2b$ и ширины зоны обходной фильтрации по соответствующим вспомогательным графикам и таблицам, как при расчетах расхода потока под плотинной. Для безнапорного потока фильтрационный расход определяется по уравнению:

$$Q = k \times q_{\text{пр}} (H_1^2 - H_2^2) / 2. \quad (44)$$

4.2.4. Фильтрация из водохранилищ

Фильтрация воды из водохранилища часто происходит в сторону коренного берега или через междуречный массив в соседнюю речную долину. При этом не исключено, что после установления стационарной кривой подпора будет наблюдаться не фильтрация воды из водохранилища, а приток подземных вод в водохранилище. В таком случае считают, что имеет место положительное питание грунтовыми водами. Отрицательное питание отмечается на участках, где грунтовые воды питаются за счет речных.

Под расчетом фильтрации из водохранилища понимается определение фильтрационных потерь, которые не следует смешивать с фильтрационным расходом из водохранилища. *Фильтрационным расходом q из водохранилища* называется объемное количество воды, фильтрующейся из водохранилища (или в водохранилище) в единицу времени. *Под фильтрационными потерями $q_{\text{п}}$* понимается разность между расходами грунтового питания реки до (q_1) и после (q_2) устройства водохранилища

$$q_{\text{п}} = q_1 - q_2. \quad (45)$$

Все входящие в формулу расходы являются единичными, т. е. отнесенными к единице длины берега водохранилища. Из формулы (45) видно, что фильтрационные потери равны фильтрационному расходу только для водохранилищ, созданных в долинах, не имеющих грунтового питания ($q_1 = 0$).

На рис. 13, а река А до устройства водохранилища получала грунтовое питание q_1 . После наполнения водохранилища фильтрационный поток направляется в долину реки Б. Фильтрационные потери по формуле (45) при этом будут больше фильтрационного расхода.

На рис. 13 б фильтрационный поток до и после наполнения водохранилища направлен в долину реки Б, и поэтому уравнение (45) имеет вид

$$q_{\text{п}} = q - q_2, \quad (46)$$

где, $q > q_1$, т. е. фильтрационные потери будут меньше фильтрационного расхода.

Для схемы *в* на рис. 13 фильтрационного расхода не будет, точнее он будет отрицательным, так как после наполнения водохранилища продолжается питание реки грунтовыми водами, но фильтрационные потери не исчезают вследствие перемещения водораздела грунтовых вод ближе к водохранилищу и сокращения области питания реки *A*. Формула (45) при этом приобретает вид

$$q_{\text{п}} = q_1 - q, \text{ где, } q_1 > q. \quad (47)$$

Постоянные фильтрационные потери из водохранилища имеют место при установившемся движении грунтовых вод и определяются по формулам:

для безнапорных потоков

$$q_{\text{п}} = \frac{k \times (H_2 - H_1)}{2} [(H_1 + H_2) / L \pm i], \quad (48)$$

для напорных потоков

$$q_{\text{п}} = k \times m \times (H_2 - H_1) / L, \quad (49)$$

где $q_{\text{п}}$ – фильтрационные потери на единицу длины берега водохранилища; k – коэффициент фильтрации пласта; H_1 – высота бытового уровня воды в реке над водоупором; H_2 – высота уровня воды в водохранилище над водоупором; L – расстояние от водохранилища до соседней долины, принадлежащей к другой речной системе или к реке, впадающей в нижний бьеф; i – уклон водоупорного ложа (знак минус берется при уклоне водоупора в сторону водохранилища, знак плюс – при уклоне водоупора от водохранилища в сторону соседней долины); m – мощность водоносного пласта при напорном потоке.

Временные фильтрационные потери из водохранилища относятся к периоду неустановившегося движения грунтовых вод, связанного с формированием подпора грунтовых вод, т. е. с насыщением пород, слагающих водоносный пласт. Если река питается грунтовыми водами до и после устройства водохранилища при горизонтальном водоупорном ложе (рис. 14, *a*) и однородном пласте, время T , в течение которого происходит фильтрация из водохранилища, определяется по формуле

$$T = \frac{3}{\pi} \times \frac{\mu}{k} \times \frac{l^2}{2 \times H_1 + H_1}, \quad (50)$$

где μ – недостаток насыщения пород; k – коэффициент фильтрации пород; l – расстояние от уреза воды водохранилища до ближайшей точки на кривой депрессии до создания водохранилища по горизонтали (рис. 14, *a*); H_1 – мощность фильтрационного потока у уреза реки после его создания.

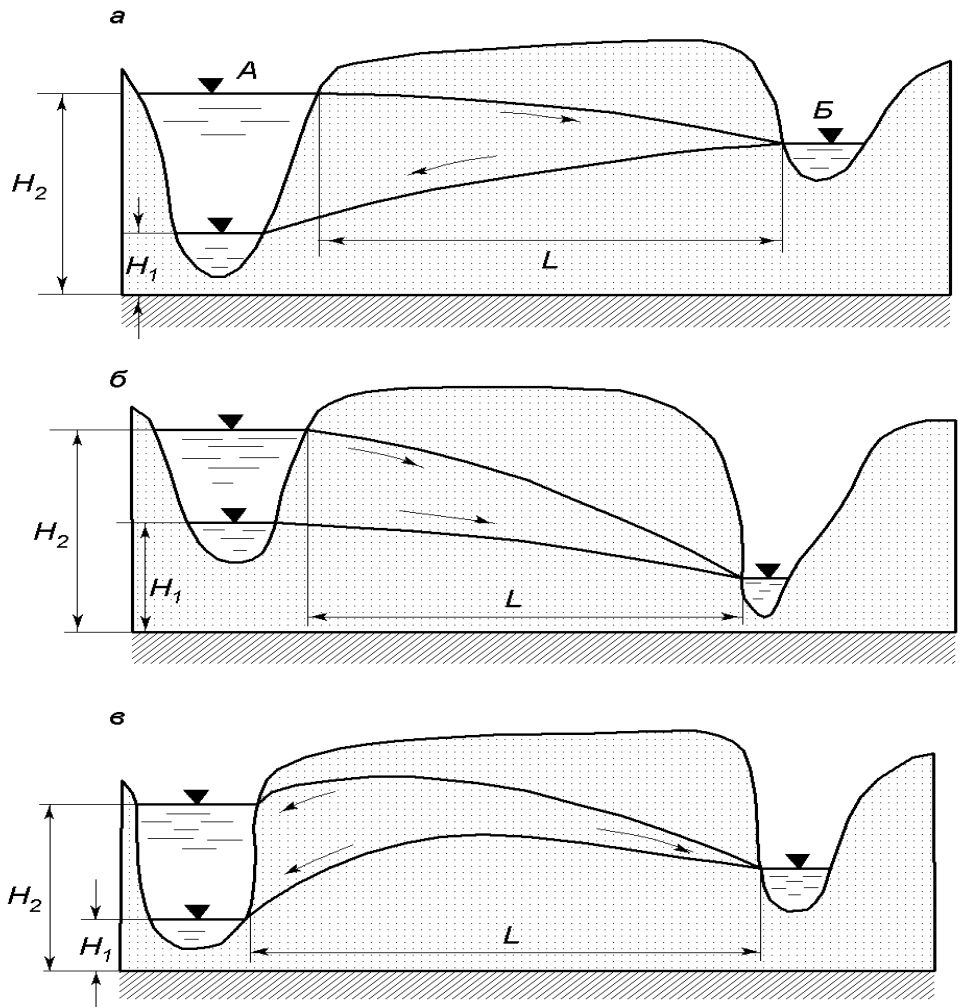


Рис. 13. Схемы к определению фильтрационных потерь из водохранилища

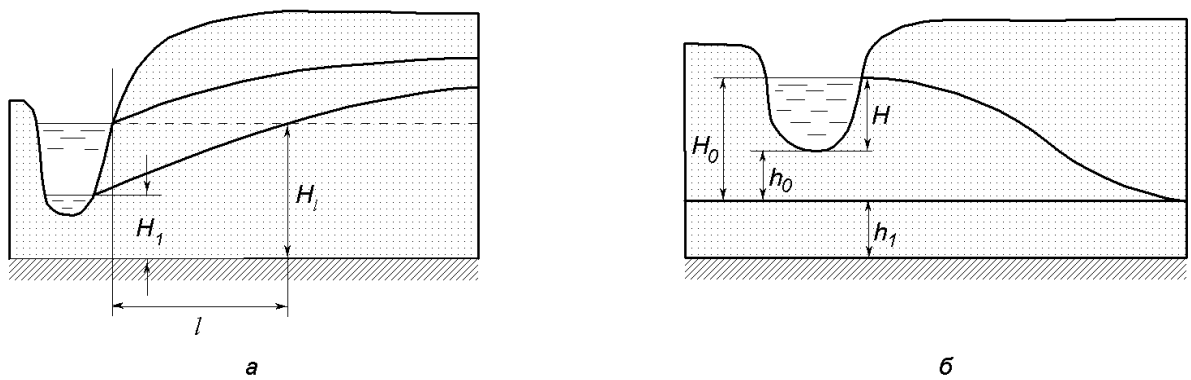


Рис. 14. Схемы к определению временных фильтрационных потерь из водохранилища:
 а) при наличии грунтового питания; б) при отсутствии грунтового питания

Общий объем воды, профильтровавшейся из водохранилища к моменту прекращения фильтрации, на единицу длины берега

$$V_T = q_{\text{ср}} \times T, \quad (51)$$

где $q_{\text{ср}}$ – средний фильтрационный расход из водохранилища за весь период T на единицу длины берега, равный расходу грунтового потока до устройства водохранилища и определяемый по формуле:

$$q_{\text{ср}} = k \times (H_i^2 - H_1^2) / (2 \times l). \quad (52)$$

Так как в период насыщения берега водохранилище лишено грунтового питания, *временные фильтрационные потери из водохранилища* можно определить по уравнению

$$q_{\text{п}} = 2 \times q_{\text{ср}}. \quad (53)$$

При отсутствии грунтового питания реки, когда грунтовые воды залегают ниже дна водохранилища, проходит некоторый период времени, необходимый для того, чтобы поток, фильтрующийся из водохранилища, сомкнулся с грунтовыми водами, т. е. период насыщения пород, залегающих под водохранилищем (рис. 14, б); затем начинается фильтрация воды из водохранилища в водоносный слой с насыщением берегов водохранилища.

Время T , необходимое для насыщения пород под дном водохранилища, определяют по формуле

$$T = \frac{\mu}{k} \times (h_0 - 2,3 \times (H + H_k) \times \lg [(H + H_k + h_0) / (H + H_k)]), \quad (54)$$

где μ – недостаток насыщения пород, залегающих под дном водохранилища; h_0 – глубина залегания уровня грунтовых вод (или при отсутствии грунтовых вод – ложа водоупора) от дна водохранилища (рис. 14, б); H – глубина воды в водохранилище; H_k – капиллярное давление на уровне грунтовых вод, равное приблизительно половине высоты капиллярного поднятия.

Общий объем воды, потерянный водохранилищем на насыщение пород под ним на единицу длины долины, к моменту смыкания фильтрационных вод с грунтовыми

$$V_T = \mu \times h_0 \times B, \quad (55)$$

где B – ширина водохранилища по урезу воды.

Временные фильтрационные потери в среднем за период насыщения пород под водохранилищем

$$q_{\text{п}} = \mu \times B \times h_0 / T. \quad (56)$$

Фильтрационный расход через один из берегов водохранилища при горизонтальном залегании поверхности грунтовых вод (рис. 14, б) в любой момент времени t , начиная от момента наполнения водохранилища:

$$q_t = \beta \times H_0 \times \sqrt{\mu \times k \times H_0 / \epsilon \times t}, \quad (57)$$

где H_0 – высота уровня воды в водохранилище над уровнем грунтовых вод, а при отсутствии грунтовых вод – над водоупором; β – коэффициент, зависящий от отношения h_1/H_0 , значения которого приведены в табл. 5; h_1 — мощность водоносного горизонта у реки до устройства водохранилища.

Из формулы (57) видно, что расход q_t со временем убывает. Фильтрационные потери в среднем за произвольный период времени t с момента наполнения водохранилища через один берег

$$q_{\text{п}} = 2 \times q_t = \beta \times H_0 \times \sqrt{2 \times \mu \times k \times H_0 / t}, \quad (58)$$

а общий объем воды, профильтровавшейся за время t из водохранилища через один берег на единицу его длины [17]

$$V_t = 2 \times q_t \times t = \beta \times H_0 \times \sqrt{2 \times \mu \times k \times H_0 \times t}. \quad (59)$$

Таблица 5

Значения коэффициента β

h_1/H_0	0	1	2	3	4	5
β	0.67	1.07	1.37	1.61	1.81	2.00

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что понимается под фильтрацией в пределах гидротехнических сооружений?
2. Сформулируйте основные принципы расчета фильтрации воды под плотиной и в обход плотины.
3. Какие существуют способы построения гидродинамических сеток?
4. В чем отличие фильтрационных потерь от фильтрационного расхода из водохранилищ?
5. Опишите схемы к определению фильтрационных потерь из водохранилищ.
6. Для каких периодов проводят расчеты постоянных и временных фильтрационных потерь из водохранилища?
7. Дайте определение временных фильтрационных потерь из водохранилища при наличии и при отсутствии грунтового питания

4.3. Потери воды на шлюзование

Потери воды на шлюзование. На судоходных реках в составе гидроузлов предусматриваются шлюзы. В этих условиях необходимо учи-

тывать потери воды на шлюзование $Q_{ш}$. Величина $Q_{ш}$ за интервал времени Δt определяется по заданному числу шлюзований m , площади водной поверхности одной шлюзовой камеры S и режиму уровней бьефа (для однониточного и однокамерного шлюза). В этом случае, приняв в расчете средние отметки бьефов, можно найти $Q_{ш}$ в $\text{м}^3/\text{с}$ по формуле

$$Q_{ш} = m \times S \times (Z_{вб} - Z_{нб}) / \Delta t, \quad (60)$$

где S (м^2), $Z_{вб}$ и $Z_{нб}$ (м), Δt (с). Потери воды на шлюзование учитываются только в навигационный период.

4.4. Потери воды на ледообразование

Потери воды на ледообразование определяются объемом льда, осевшего на берегах водохранилища при его сработке, в результате чего он временно исключается из водного баланса зимой, то есть зимний приток воды в водохранилище уменьшается. Весной этот лед тает, и, если он не сбрасывается в нижний бьеф, добавляется к притоку талой воды в водохранилище. Отсюда и двухзначность потерь воды на ледообразование. Если водохранилище не срабатывается, то при образовании льда режим уровней не изменяется. Объясняется это вытеснением плавающим льдом слоя воды, равного его весу.

Объем воды $\Delta W_{л}$, подлежащий исключению из зимнего притока, можно определить по выражению

$$\Delta W_{л} = h \times \gamma \times (F_{н} - F_{к}), \quad (61)$$

где h – средняя толщина ледяного покрова водохранилища; γ – плотность льда; $F_{н}$ и $F_{к}$ – начальная (в момент образования ледостава) и конечная (в момент окончания зимней сработки) площади зеркала водохранилища. Величина $\Delta W_{л}$ условно называется временной потерей на ледообразование.

Для больших водохранилищ значительную роль в их водном балансе играют снеговые осадки, выпадающие на ледяной покров. Для средних и небольших водохранилищ ими можно пренебречь. Благодаря вытеснению из водохранилища своим весом равновеликого объема воды эти осадки сразу же обращаются в сток.

Таким образом, на водный баланс водохранилища снеговые осадки оказывают противоположное с потерями на ледообразование влияние: зимой увеличивают приток, а весной соответственно уменьшают. Если испарение рассчитывается только для периода открытого русла и, следовательно, осадки за зимние месяцы не принимаются во внимание,

а в водохозяйственных расчетах необходимо учитывать результирующую величину:

зимой

$$\Delta W_3 = \Delta W_l - \Delta W_c \quad (62)$$

весной

$$\Delta W_6 = -\Delta W_l + \Delta W_c, \quad (63)$$

$$\Delta W_c = h_c * F_k \quad (64)$$

где ΔW_c – объем «снегового притока»; h_c – слой воды в снеговых осадках; F_k – площадь ледяного покрова в конце зимней сработки водохранилища. Если же расчет потерь на испарение ведется за весь год, то снеговой приток оказывается уже учтенным и повторному учету не подлежит.

Потери воды на ледообразование подлежат учету при сезонном регулировании, то есть когда водохранилище ежегодно срабатывается до УМО. При многолетнем же регулировании в большинстве случаев водохранилище к концу зимы срабатывается лишь частично и поэтому объем потерь может быть заимствован из оставшегося переходящего на будущий водохозяйственный год запаса воды водохранилища до восстановления его весной.

Однако положение, аналогичное сезонному регулированию, создается в последний год критического маловодья, когда к концу зимы этого года водохранилище срабатывается полностью до УМО. В этом случае потери на ледообразование (и снеговой приток) также подлежат учету в водохозяйственных расчетах. Средний за интервал времени Δt расход потерь воды на ледообразование в м³/с может быть определен по выражению

$$Q_l = (\Delta W_l + \Delta W_c) / \Delta t. \quad (65)$$

Потери воды на ледообразование (за вычетом зимних осадков) относятся к периоду зимней сработки водохранилища, а возврат воды производится в первом весеннем месяце. При многолетнем регулировании потери воды на ледообразование вводятся, как отмечалось выше, в последнем году сработки водохранилища.

Глава 5

Сезонное (годовое) регулирование стока

Смысл сезонного (годового) регулирования стока заключается в перераспределении стока из многоводных сезонов года в маловодные. При этом водохранилище наполняется до отметки НПУ в период высо-

кой водности года, а к началу следующего половодья срабатывается до УМО.

Пределом сезонного (годового) регулирования стока является доведение зарегулированного (гарантированного) расхода заданной обеспеченности P до величины среднегодового расхода расчетного маловодного года, т. е. при сезонном (годовом) регулировании $Q_{зар} \leq Q_{pg}$, или в относительных единицах $\alpha \leq K_{pg}$, где Q_{pg} – среднегодовой расход расчетной обеспеченности P ; K_{pg} – модульный коэффициент годового стока расчетной обеспеченности P ; $K_{pg} = Q_{зр} / Q_{гн}$; $\alpha = Q_{зар} / Q_{гн}$; $Q_{гн}$ – среднегодовое значение расхода (норма годового стока). Ниже изложены основные подходы к решению основных задач расчета применительно к сезонному регулированию стока.

5.1. Обобщенные методы расчета регулирования стока

Обобщенные методы расчета регулирования стока базируются на использовании статистических параметров, полученных по рядам наблюдений за расходами воды, и позволяют решить основные задачи регулирования стока для случаев постоянной и переменной в течение года водоотдачи водохранилища.

Последовательность расчета регулирования стока при постоянной в течение года водоотдачи выглядит следующим образом. Во-первых, из гидрологических ежегодников выписываются среднемесячные и среднегодовые значения расходов воды (m^3/c) за N лет по форме, представленной в табл. 6.

Таблица 6

Характерные расходы воды реки, m^3/c

Год	Месяц (порядок гидрологического года)											Год	
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II		III
1936/ 1937	134	153	87	76	53	46	48	52	41	37	32	26	65
...

Затем задается обеспеченность P расчетных расходов воды и рассчитываются параметры годового стока: норма годового стока $Q_{срг}$, коэффициент вариации годового стока Cv_g , коэффициент асимметрии годового стока Cs_g ; по таблице биномиального распределения (Пирсона III-го типа) по вычисленным параметрам находится среднегодовой расход воды Q_{pg} заданной обеспеченности P ; определяется параметр годового стока в относительных единицах – модульный коэффициент годо-

вого стока расчетной обеспеченности K_{p2} ($K_{p2} = Q_{p2} / Q_{cp2}$).

После этого устанавливается либо коэффициент водоотдачи α ($\alpha = Q_{gap} / Q_{cp2}$), либо гарантированный расход Q_{gap} с последующим вычислением α . Затем определяются параметры меженного стока: норма меженного стока Q_{cpm} , коэффициент вариации меженного стока Cv_m , коэффициент асимметрии меженного стока Cs_m ; по таблице биномиального распределения (Пирсона III типа) по вычисленным параметрам находится сток межени Q_{pm} расчетной обеспеченности.

На заключительном этапе расчетов определяются параметры меженного стока в относительных единицах (модульный коэффициент стока межени расчетной обеспеченности K_{pm} ($K_{pm} = Q_{pm} / Q_{cpm}$); длительность межени t_m в долях года; средняя многолетняя доля межени в годовом стоке m_m) и потребный полезный объем $V_{сез}$ водохранилища по формулам:

$$\beta_{сез} = \alpha \times t_m - m_m \times K_{pm}, \quad (66)$$

$$V_{сез} = \beta_{сез} \times W_2, \quad (67)$$

где W_2 – среднемноголетний объем годового стока ($W_2 = Q_{cp2} \times 31.5 \times 10^6$).

В расчетах регулирования стока при переменной в течение года водоотдачи после того, как будут определены исходные гидрологические данные и обеспеченность p расчетных расходов воды, задаются значения Q_{gap} в диапазоне $Q_{мин} \leq Q_{gap} \leq Q_{p2}$ ($Q_{мин}$ – минимальный наблюдаемый расход, для обеспечения которого не требуется создания водохранилища). После этого при заданных Q_{gap} по форме, представленной в табл. 7, определяются дефициты стока ΔQ ($\Delta Q = \Sigma Q_{меж} - \Sigma Q_{gap}$; $\Sigma Q_{меж}$ подсчитывается по $n_{меж}$ месяцам, в течение которых $Q_i < Q_{gap}$; $\Sigma Q_{gap} = Q_{gap} \times n_{меж}$) по годам гидрологического ряда.

Таблица 7

Расчет зависимости $Q_{gap} = f(V_{полез})$

Год	$\Sigma Q_{меж}$ за месяцы, когда $Q_i < Q_{gap}$	$n_{меж}$	ΣQ_{gap}	ΔQ
$Q_{gap} = 118$				
1936/1937	543	5	590	47
1937/1938	590	6	708	118
...
$Q_{gap} = 130$				
1936/1937	543	5	650	107
1937/1938	590	6	780	190
...
$Q_{gap} = \dots$				

По формуле $P = m / (n + 1)$ определяется порядковый номер m_p дефицита стока расчетной обеспеченности (в ряду увеличения дефицита стока) – $m_p = P \times (N + 1)$. Данному порядковому номеру и соответствует расчетный дефицит меженного стока ΔQ , величиной которого определяется полезный объем водохранилища. По результатам проведенных расчетов строится зависимость зарегулированного (гарантированного) расхода воды от полезного объема.

5.2. Расчеты регулирования по интегральным кривым стока

Расчет регулирования по интегральным кривым стока выполняется в графоаналитической форме – изменение притока и потребления во времени представлено в виде суммарных (интегральных) кривых (рис. 15). Интегральные кривые – это графическое изображение хронологической последовательности стока или потребления в нарастающем виде. Их использование, по сравнению с другими методами расчета, выгодно отличается наглядностью, что имеет важное значение для ознакомления с сущностью регулирования стока и решения многовариантных задач регулирования стока на начальных стадиях проектирования водохранилища.

Прежде всего, необходимо произвести расчет и построение интегральной кривой стока в створе проектируемого гидроузла. Исходными данными для подсчетов интегральной кривой служат среднемесячные расходы за расчетный период водохозяйственных лет. В практике проектирования используется интегральная кривая не абсолютных значений месячных объемов стока, а разностная интегральная кривая, представляющая собой суммарное нарастание разностей между месячным стоком и равномерным стоком (близким по значению к среднемноголетнему месячному стоку).

Применение интегральных кривых для расчетов регулирования основано на следующем уравнении водного баланса водохранилища за период его работы между моментами t_1 и t_2

$$V_{t_2} = V_{t_1} + \int (Q_{np} - Q) dt = V_{t_1} + \int Q_{np} dt - \int Q dt, \quad (68)$$

где V_{t_1} – запас воды в водохранилище в начальный момент t_1 , V_{t_2} – запас воды в конце периода t_2 , Q_{np} и Q , соответственно, приток в водохранилище и расход воды из него. Первый интеграл в уравнении (68) выражает приращение объема притока за период $(t_2 - t_1)$, а второй – приращение объема расходуемой воды. Это значит, что разности ординат интегральных кривых притока и потребления дают величину наполнения или сработки водохранилища в любой момент времени.

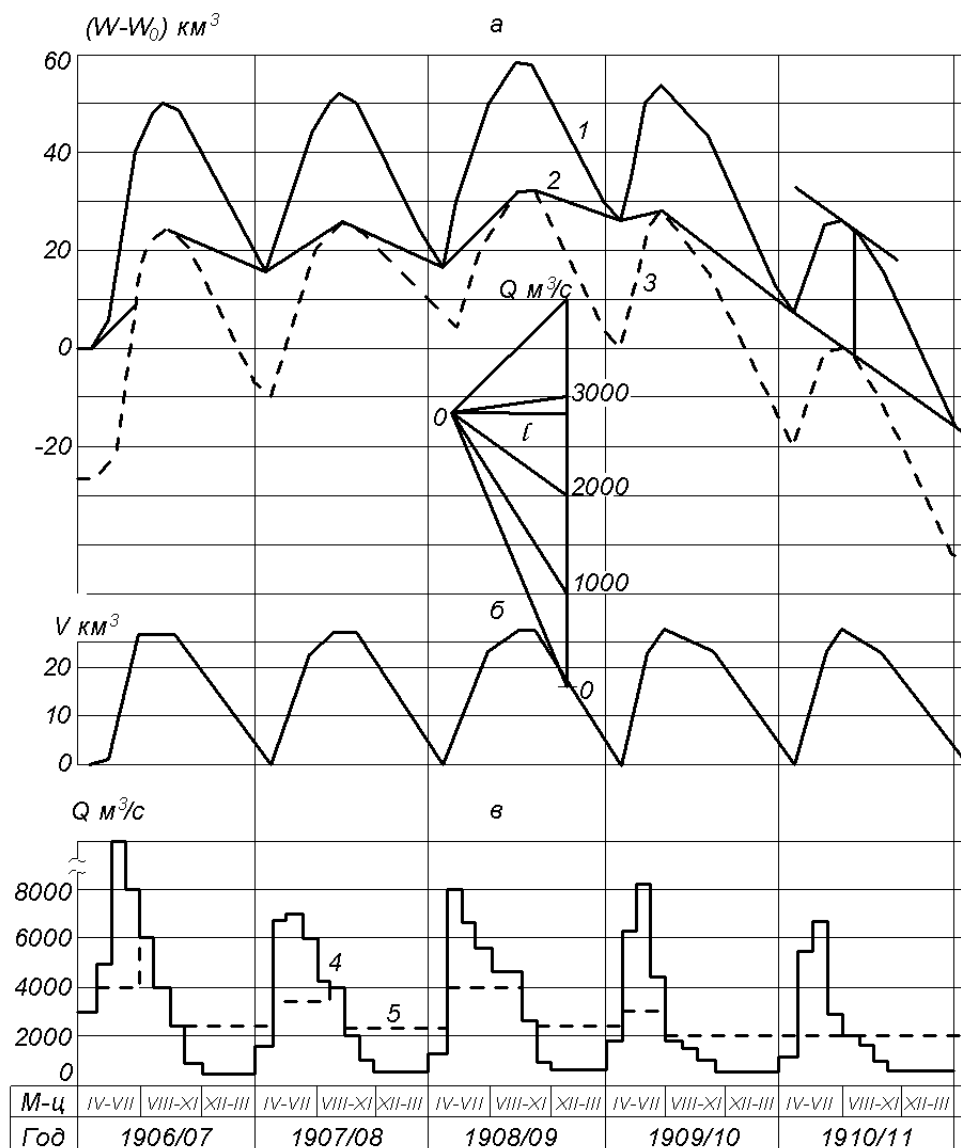


Рис.15. Расчеты сезонного регулирования стока:

а – интегральные кривые стока – естественного (1), зарегулированного (2) и контрольная (3); б – график наполнения и сработки водохранилища; в – графики расходов воды – естественных (4) и зарегулированных (5)

При равенстве Q_{np} и Q в какой-то период первый интеграл равен второму и, следовательно, наполнение водохранилища за период остается неизменным. Исходя из этого, параллельная интегральной кривой притока воды линия, отстоящая вниз от нее на некоторое расстояние, будет характеризовать неизменное наполнение водохранилища. Если это расстояние в масштабе шкалы объемов m_W принять равным $V_{полез}$, то верхняя линия будет соответствовать интегральной кривой пустого во-

доохранилища, а нижняя – полного. Интегральная кривая зарегулированного расхода, то есть полного расхода брутто (включая полезное потребление, холостые сбросы и потери) пройдет в зоне, ограниченной этими двумя линиями, направляясь то к верхней (если приток меньше потребления), то к нижней (если приток больше потребления). При равенстве этих расходов линия зарегулированного стока совпадает с нижней линией, что означает избыток притока, сбрасываемого вхолостую, или с верхней, что означает перебой в отдаче воды.

Лучевой масштаб m_W вычисляется следующим образом. Сначала определяется равномерный месячный сток ΔW_0 как результат округления частного при делении суммарного стока W за весь расчетный период на число временных интервалов n (число месяцев, в каждом из которых $\Delta t = 2.63 \cdot 10^6$ с). После этого назначается масштаб оси объемов m_W и масштаб оси времени m_t так, чтобы соотношение $\Delta t / \Delta W_0$ составляло 1:1, 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5, 1:3.0 (пример: для m_W 1 см – 10 км³, m_t 3 мм – 1 месяц и $\Delta W_0 = 7.5$ км³ $\Delta t / \Delta W_0 = 3$ мм / 7.5 мм = 1:2.5, что вполне допустимо). Затем находится значение равномерного расхода воды $Q_0 = \Delta W_0 / \Delta t$, а по формуле (69) рассчитывается полюсное расстояние l при условии $l \geq 1.5$.

$$L = m_W / (m_t * m_Q), \quad (69)$$

где m_Q – масштаб расходов воды.

Например, при m_W 1 см – 10 км³, m_t 3 мм – 1 месяц и $\Delta W_0 = 7.5$ км³, $Q_0 = 7.5$ км³ / (2.63 * 10⁶), m_Q 1 см – 500 м³/с $l = 10$ км³ / (3.3 * 2.63 * 10⁶ с * 500 м³/с) = 2.3 см. На заключительном этапе откладывается горизонтальный отрезок длиной l см, через правую границу которого в масштабе m_Q проводится вертикальная линия. Точка пересечения отрезка и линии соответствует значению Q_0 .

По интегральным кривым возможно решать перечисленные в разделе 1.3 основные задачи регулирования стока: по заданному Q_{gap} определять $V_{полез}$, а также обратную задачу; определять характеристики зарегулированного режима (уровни или наполнение водохранилища, зарегулированные расходы). Графики наполнений–сработки водохранилища строятся в виде плавной линии по наполнениям на конец-начало расчетных интервалов (месяцев), взятых с интегральных кривых как вертикальные расстояния (в масштабе объемов) между линией пустого водохранилища и линией зарегулированных расходов, местами совпадающей с линией полного водохранилища; графики расходов – ступеньками. На указанных графиках, характеризующих режим работы водохранилища, дополнительно фиксируется момент окончания заполне-

ния полезной емкости, если этот момент не совпадает с границами месяцев.

Для количественной оценки характеристик зарегулированного режима рассчитываются и строятся кривые продолжительности наполнений водохранилища, естественных и зарегулированных расходов. Объем срезки на последних (площадь со знаком минус) должен соответствовать объему повышения стока (площадь со знаком плюс). Расходы, определяемые по интегральным кривым, соответствуют расходам брутто. Поэтому при дальнейшем их использовании необходимо вычесть из них потери стока.

5.3. Табличные водохозяйственные расчеты по календарному стоковому ряду

Табличный способ сводится к реализации (решению) уравнения водного баланса водохранилища по отрезкам времени Δt :

$Q_{акк} \times \Delta t = \pm \Delta V_{акк} = (Q_{нр} - Q_{зар}) \times \Delta t = (Q_{нр} - (Q_{испл} + Q_{х сбр} + Q_n)) \times \Delta t$, (70), где $Q_{акк}$ – расход аккумуляции, то есть разность притекающего $Q_{нр}$ и зарегулированного $Q_{зар}$ расходов; $\Delta V_{акк}$ – изменение объемов водохранилища (плюс – при увеличении его, минус – при сработке); $Q_{испл}$, $Q_{х сбр}$, Q_n – соответственно, расходы используемой, сбросной и уходящей на потери воды из водохранилища; Δt – интервал осреднения.

В зависимости от необходимой точности и интенсивности изменения притока расчет выполняется по интервалам различной длительности. Так, для половодья и паводков используются данные по пятидневкам и декадам, а за остальное время года обычно по месяцам. Использование расчетных интервалов, больших, чем месяц, является крайне нежелательным, так как при этом будет иметь место завышение гарантированной отдачи. Все результаты расчета записываются в таблице (табл. 8).

В зависимости от участников водохозяйственного комплекса табл. 8 может несколько видоизменяться. Расчеты начинаются с начала гидрологического ряда (в водохозяйственном разрезе). При этом за начало половодья принимается полностью сработанный полезный объем. Расчет ведется «ходом вперед» до конца ряда. Для упрощения табличных водохозяйственных расчетов по календарному стоковому ряду предварительно разрабатывается и строится диспетчерский график управления работой водохранилища. В случае использования ЭВМ расчеты табличным способом проводятся методом последовательного приближения (подбора), исходя из обеспечения требований водополь-

зователей и водопотребителей и необходимости ежегодной сработки и наполнения водохранилища сезонного регулирования. При этом вполне достаточно 4–5 итераций. По результатам расчета строится диспетчерский график управления работой водохранилища. При заранее заданной обеспеченности гарантированной отдачи в составе длительного гидрологического ряда выделяется определенное число перебойных лет, то есть лет со сниженной отдачей по сравнению с гарантированной величиной. Например, при обеспеченности 95 % и длительности ряда 60 лет число перебойных лет равно трем.

Таблица 8

Пример табличного способа водохозяйственных расчетов гидроузла

Ме- сяц, де- када	Расходы, сред- ние за Δt : (м ³ /с)			Аккумуля- ция		V_k км ³	Уровни вер.бьефа		Z_n ср, М	Напоры, м		
	$Q_{бр}$	$Q_{нт}$	$Q_{ГЭС}$	$Q_{акк}$ м ³ /с	$V_{акк}$ км ³		Z_k М	$Z_{ср}$ М		$H_{бр}$	h потери	H_n т
Многоводные условия 5 % обеспеченности по объему годового стока												
Средневодные условия												
Маловодные условия 5 % обеспеченности по объему годового стока и осенне-зимней межени												

$Q_{бр}$ – приток брутто; $Q_{нт}$ – приток нетто ($Q_{нт} = Q_{бр} - Q_{потери}$); $Q_{акк} = Q_{нт} - Q_{ГЭС}$;
 $V_{акк} = Q_{акк} * \Delta t$; V_k – наполнение на конец Δt ; ($V_k = V_k \pm V_{акк}$); Z_k – конечный уровень;
 $Z_{ср}$ – средний уровень; $Z_{н ср}$ – средний уровень нижнего бьефа;
 $H_{бр}$ – напор-брутто; $h_{потери}$ – потери напора; $H_{нт}$ – напор-брутто ($H_{нт} = H_{бр} - h_{потери}$);
 N – мощность ($N = 9.81 * Q_{ГЭС} * H_{нт}$).

Для учета суточных колебаний уровней в нижних бьефах ГЭС рекомендовано много способов. Наиболее простым и достаточно надежным является способ, используемый в практике Ленгидропроекта, который сводится к нахождению уровней нижнего бьефа по кривой $Q=f(Z_{н.б})$, соответствующих расходам не ниже средневзвешенного $Q_{ср.взв}$

$$Q_{ср.взв} = [(Q_1^3 \times T_1 + Q_2^3 \times T_2) / (T_1 + T_2)] \times 0.5, \quad (71)$$

где Q_1 – максимальный расход ГЭС при работе в пике графика нагрузки; T_1 – продолжительность работы ГЭС и пике графика нагрузки; Q_2 – минимальный расход при суточном регулировании (базовый), T_2 – продолжительность работы ГЭС базовым расходом (ночной и дневной провалы нагрузок). Из практики проектирования гидроузлов

$Q_{\text{ср.взв}} \approx 0.7 \times Q_I$. Весной, когда $Q_{\text{зар}} > Q_{\text{ср.взв}}$, $Z_{\text{н.б.}}$ определяются соответствующими $Q_{\text{зар}}$. Специалисты института «Гидропроект» рекомендуют определять уровни нижнего бьефа с учетом суточных колебаний по эмпирической формуле

$$Z_{\text{н.б.}} = \xi \times Z_{\text{ср}} + (1 - \xi) \times Z_{\text{макс}} \quad (72)$$

где $Z_{\text{ср}}$ – средний за сутки уровень воды, $Z_{\text{макс}}$ – максимальный за все время работы ГЭС, коэффициент ξ меняется от 0.7 до 0.3. Однако из-за приближенных значений ξ в ряде случаев возможно отклонение уровней нижнего бьефа от фактических.

Для упрощения водохозяйственные и водноэнергетические расчеты в ряде случаев проводятся на постоянный зарегулированный расход в период сработки водохранилища от НПУ до УМО. При этом зарегулированные расходы в каждом году определяются по выражению

$$Q_{\text{зар}} = (\Sigma Q_{\text{сраб}} + \Sigma Q_{\text{пр}}) / n, \quad (73)$$

где $\Sigma Q_{\text{сраб}} = V_{\text{полез}} / \Delta t$, где Δt – число секунд в интервале осреднения расходов (месяц или декада); $\Sigma Q_{\text{пр}}$ – сумма приточных расходов (нетто) за период сработки полезного объема водохранилища ($V_{\text{полез}}$); n – число меженных месяцев или декад, в течение которых срабатывается водохранилище. Гарантированная мощность при этом соответствует порядковому номеру $m = p \times (n + 1)$ в ряду уменьшения средних мощностей за период сработки водохранилища или другой расчетный период.

5.4. Методы расчета сезонного регулирования стока на переменную водоотдачу по диспетчерским правилам

Специальные правила управления работой водохранилищ практически оформляются в виде диспетчерских графиков (рис. 16). Диспетчерский график строится в координатах: ось ординат – наполнение или уровни водохранилища, ось абсцисс – время года. В целом, он представляет собой линии, разграничивающие зоны, в пределах каждой из которых указана отдача потребителю (расход воды или мощность), исходя из бесперебойной работы водохранилища. Как правило, поле диспетчерского графика разделяется характерными линиями на четыре основные зоны работы водохранилища: 1) гарантированной отдачи; 2) повышенной отдачи или незакрепленного режима; 3) полной производительности установки; 4) урезанной отдачи или ограничений. К характерным линиям диспетчерского графика относятся следующие.

1. *Противоперебойная линия.* Представляет собой верхнюю границу зоны гарантированной отдачи и отделяет зону гарантированной отдачи от зоны повышенной отдачи. Состоит из двух ветвей: а) ветви опорожне-

ния (сработки), ограничивающей упомянутую зону в период межени; б) ветви весеннего наполнения, предназначенной для обеспечения необходимого к концу половодья запаса воды в водохранилище для поддержания отдач в межень.

2. *Противосбросовая линия.* Представляет собой нижнюю границу зоны с отдачей, повышенной в пределах максимального водопотребления установки. Состоит из двух ветвей: а) ветви предполоводного опорожнения и б) ветви наполнения. Первая из них предназначена для обеспечения сработки, а вторая – для предотвращения чрезмерно быстрого заполнения водохранилища.

3. *Линия урезанной или пониженной отдачи.* Представляет собой нижнюю границу гарантированной отдачи.

Противоперебойная и противосбросовая линии охватывают своими ветвями весь полезный объем водохранилища и проводятся от УМО до НПУ. Все характерные линии строятся навстречу ходу времени, то есть ходом назад, причем ветви наполнения противоперебойной и противосбросовой линий строятся от НПУ до УМО, а ветви сработки тех же линий – от УМО до НПУ. При расчете и построении диспетчерских графиков необходимы следующие исходные данные:

- 1) основные характеристики плана водохозяйственного использования (гарантированная отдача и распределение ее на протяжении года, расход полной производительности установки и другие материалы);
- 2) размеры полезного объема водохранилища;
- 3) гидрологическая характеристика водотока в створе гидроузла за весь период наблюдений;
- 4) характеристика ожидаемых прогнозов стока.

При разработке диспетчерских графиков год делится на две фазы: половодье и межень. Статистические характеристики для сезонных объемов стока (весна, межень) и расчетные величины этих объемов определяются по фактическим рядам стока в жестких календарных датах. Жесткие даты деления года на сезоны постоянны для всех лет и назначаются с таким расчетом, чтобы фактическое половодье вмещалось в весенний сезон, практически, при всех сроках начала половодья (ранних и поздних). Назначением жестких дат весеннего сезона определяются одновременно постоянные границы межени. На практике границы фаз годового стока чаще всего совмещают с началом месяцев и выбирают по данным средних многолетних месячных расходов воды.

Варианты моделей распределения стока для весны и межени выбираются также из фактических рядов наблюдений за стоком, но не в

жестких границах, а по фактической продолжительности каждого отобранного сезона и с приводкой объемов стока этих фактических объемов к расчетному объему стока в жестких датах. Элементы диспетчерских графиков получают построением огибающих соответствующих линий сработки и пополнения водохранилища, относящихся к ряду реальных лет (моделей), сток которых предварительно приведен к расчетным величинам.

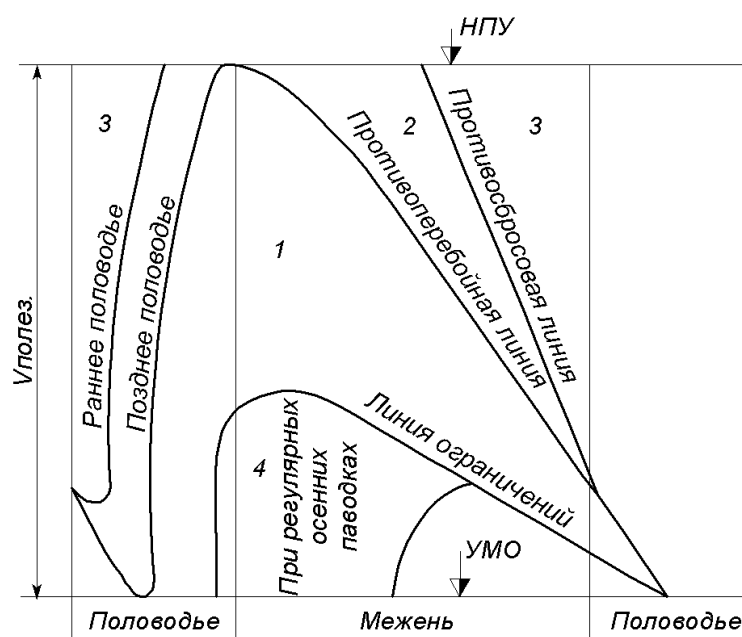


Рис.16. Вид диспетчерского графика при сезонном регулировании стока:
 1 – зона гарантированной отдачи; 2 – зона повышенной отдачи; 3 – зона полной производительности установки; 4 – зона ограничений

Расчет и построение элементов диспетчерских графиков начинается с ветви сработки противоперебойной линии, поскольку при таком порядке расчета, помимо основной задачи (построения противоперебойной линии) уточняются размеры сезонной емкости, предварительно установленные по формулам. Построенные указанным путем отдельные элементы сводятся в единый диспетчерский график, на основе которого осуществляются расчеты регулирования и эксплуатации водохранилища. При этом отдача из водохранилища назначается в зависимости от времени года и от запаса воды в водохранилище на данную дату ппуска. В процессе регулирования речного стока по длительному наблюдению или смоделированному ряду возможны некоторые уточнения зон диспетчерского графика с учетом реального распределения стока как внутри года, так и по годам.

Глава 6

Многолетнее регулирование стока

Многолетнее регулирование стока является наиболее совершенным. Заключается оно в перераспределении стока из многоводных лет и периодов в маловодные. Основными признаками многолетнего регулирования является превышение зарегулированного годового стока над стоком расчетного маловодного года заданной обеспеченности, а при более глубоком регулировании – превышение зарегулированного стока за n лет над стоком расчетного маловодного периода той же длительности. Теоретическим пределом многолетнего регулирования является полное выравнивание стока до среднемноголетнего. В этом случае холостые сбросы отсутствуют, и при правильной эксплуатации водохранилища весь сток реки, за исключением испарения и фильтрации, может быть полезно использован для выработки энергии и других хозяйственных нужд. Многолетнее регулирование стока позволяет гарантировать отдачу потребителям объема воды, превышающего сток маловодного года заданной обеспеченности водоотдачи. При этом виде регулирования создаются переходящие от года к году запасы воды.

Если при сезонном регулировании цикл работы водохранилища наполнение–сработка замыкается в пределах одного водохозяйственного года, то при многолетнем регулировании этот цикл продолжается несколько лет. Маловодный период, в течение которого наполненное водохранилище полностью срабатывается, принято называть *критическим периодом сработки* водохранилища.

Объем водохранилища, предназначенный для многолетнего перераспределения стока, то есть выравнивания годовых величин стока, называется *многолетней составляющей полезного объема водохранилища*, а его относительное значение обозначается β_{mn} и определяется как

$$\beta_{mn} = V_{mn}/W_2, \quad (74)$$

где V_{mn} – многолетняя составляющая полезного объема водохранилища, W_2 – среднемноголетний объем годового стока.

Часть полезного объема водохранилища, которая добавляется к многолетней составляющей, предназначена для выравнивания внутри-сезонной неравномерности стока и называется *сезонной составляющей полезного объема водохранилища*. Она обозначается β_{sc} и определяется по уравнению

$$\beta_{sc} = V_{sc}/W_2, \quad (75)$$

где V_{sc} – сезонная составляющая объема. Сезонная составляющая полезного объема водохранилища определяется независимо от многолет-

ней при помощи специальных методов, аналогичных обобщенным методам расчета сезонного регулирования.

Таким образом, полезный объем водохранилища многолетнего регулирования определяется по формуле

$$V_{\text{полез}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{с.с}}, \quad (76)$$

или в относительных единицах

$$\beta_{\text{полез}} = \beta_{\text{мн}} + \beta_{\text{с.с}} \quad (77)$$

Такое деление полезного объема водохранилища на составляющие части является условным. В настоящее время имеются приемы расчета всего полезного объема без разделения его на составляющие части. Однако в практике водохозяйственного проектирования широкое внедрение нашли методы отдельного определения многолетней и сезонной составляющей полезного объема водохранилища.

6.1. Расчеты многолетнего регулирования обобщенными методами теории вероятностей и математической статистики

Практическая реализация методов теории вероятностей и математической статистики на практике достаточно часто сводится к использованию многочисленных номограмм, связывающих объем, отдачу и обеспеченность. При этом под объемом подразумевается многолетняя составляющая полезного объема водохранилища, а под отдачей – количество воды, которое можно получить с той или иной степенью обеспеченности.

Первые по времени такие номограммы при условии статистической независимости стока смежных лет разработал Я.Ф. Плешков (рис. 17). Позже И.В. Гуглием, а затем коллективом специалистов под руководством А.Ш. Резниковского были разработаны номограммы для ненулевых значений коэффициента автокорреляции годового стока. При этом в последнем случае использовалась последовательность не наблюдаемых, а сгенерированных методом Монте-Карло значений годового стока.

В целом, номограммы позволяют определить многолетнюю составляющую полезного объема водохранилища для заданных параметров годового стока ($Cv_2, Cs/Cv, r_1$), гарантированной отдаче α , нормируемой обеспеченностью P .

6.2. Расчеты многолетнего регулирования по интегральной кривой стока

Для решения основных задач многолетнего регулирования стока на интегральной кривой за длительный ряд (рис.18) отыскивается наиболее маловодный период. Расчеты осуществляются в отношении всего полезного объема водохранилища. *Первая задача* (по заданному расходу определить полезный объем водохранилища) решается проведением касательной к интегральной кривой в конце маловодья «ходом назад» с наклоном заданного расхода Q_p .

Наибольшее расстояние между проведенной касательной и интегральной кривой в пределах маловодья и определит потребный для осуществления многолетнего регулирования полезный объем водохранилища V по заданному расходу Q_p . В случае задания меньшего расхода Q_p' , полезный объем водохранилища составит V' .

Определяя таким образом V , проводят расчеты регулирования по остальным годам имеющегося ряда, для чего строят контрольную интегральную кривую, соответствующую наполненному водохранилищу. Интегральная кривая естественного стока соответствует пустому водохранилищу.

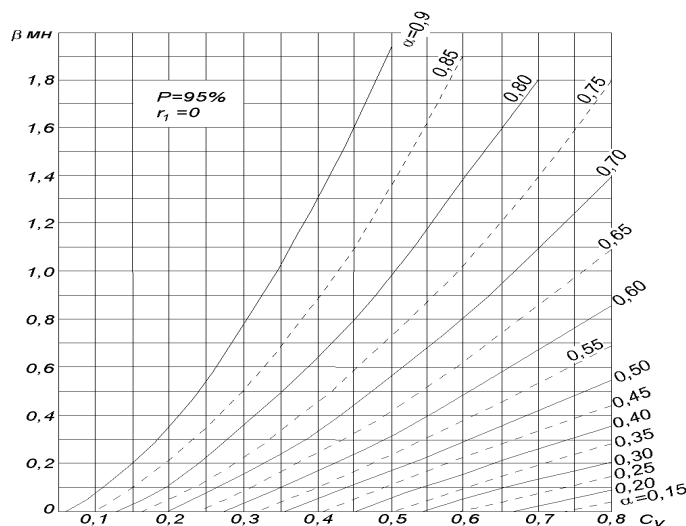


Рис. 17. Номограмма Я.Ф. Плешкова к определению многолетней составляющей полезного объема водохранилища для $C_s=2C_v$; $r_1=0$; $p = 95\%$

Решение *второй задачи* (по заданному полезному объему определить расход) также начинается с рассмотрения отобранного маловодья. На расстоянии, равном заданному объему V вниз от основной кривой строится контрольная интегральная кривая. В полосе между ними про-

водится прямая, которая является касательной к основной кривой в точке, соответствующей концу маловодья.

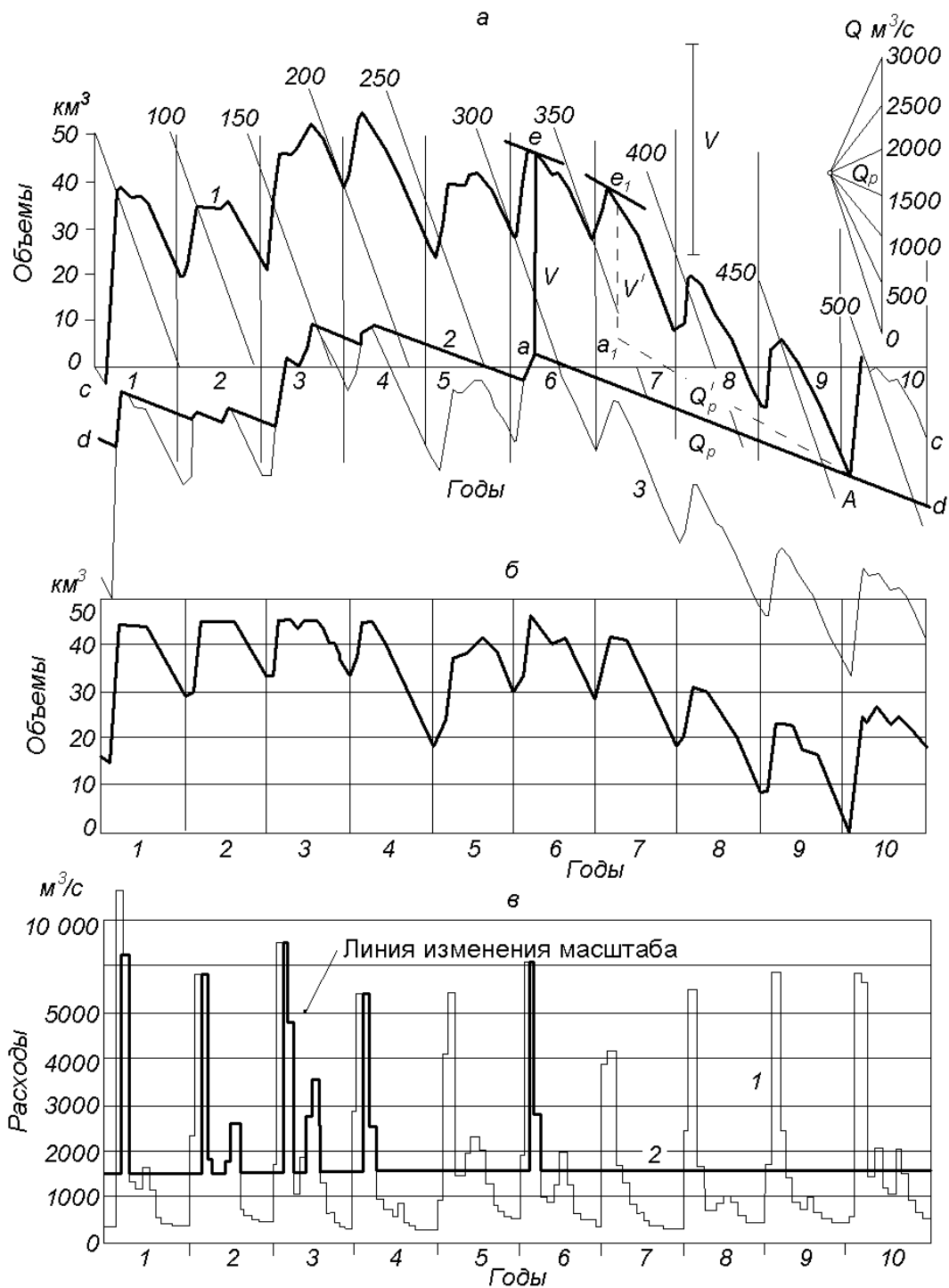


Рис. 18. Расчеты многолетнего регулирования:
 а – интегральные кривые: естественного стока (1), зарегулированного стока (2) и контрольная (3); б – график наполнений водохранилища;
 в – графики естественных (1) и зарегулированных (2) расходов

Наклоном этой касательной и определяется зарегулированный расход. Остальные построения аналогичны вышеуказанному. По интегральной кривой стока можно построить зависимость $Q_{зар} = f(V_{полез})$, или $\alpha_{зар} = f(V_{полез})$, где $V_{полез}$ – полезный объем водохранилища. Она рассчитывается путем определения необходимых $V_{полез}$ для нескольких значений $Q_{зар}$ ($Q_{мин} \leq Q_{зар} \leq Q_{макс}$). Вид такой зависимости асимптотически приближается к норме годового стока. Анализ интегральной кривой показывает, что в зоне многолетнего регулирования значительные приращения полезного объема водохранилища слабо влияют на величину зарегулированного расхода. Это объясняется тем, что с ростом полезного объема увеличивается период его сработки T . Поскольку приращение расхода $\Delta Q_{зар}$ обратно пропорционально величине T , то относительный эффект от приращения полезного объема понижается и в пределе стремится к нулю, когда T стремится к бесконечности

$$\Delta Q_{зар} = \Delta V/T = 0. \quad (78)$$

Однако это не означает, что высокая степень регулирования стока менее выгодна, чем низкая. Экономические показатели зависят от стоимости повышения подпора, которая изменяется в зависимости от топографии и геологии чаши водохранилища и других местных условий. Недостатками графической формы расчета регулирования стока является невысокая точность и определенная трудоемкость. Однако при рассмотрении в проекте ряда вариантов параметров водохранилищ эта форма расчетов удобна и вполне применима.

6.3. Табличные водохозяйственные расчеты многолетнего регулирования по календарному стоковому ряду

Расчеты многолетнего регулирования по календарным гидрологическим рядам проводятся в табличной форме по методике, аналогичной методике сезонного регулирования стока табличным способом. Расчеты многолетнего регулирования этим способом выполняются в той же последовательности, что и при сезонном регулировании. При этом расчеты начинаются с начала наиболее затяжного и глубокого маловодного периода, когда водохранилище принимается доверху наполненным за счет избыточного стока в предшествующий многоводный период. Результаты расчетов вписываются в таблицу, форма которой приведена в разделе по сезонному регулированию стока. Единственная разница заключается в том, что водохранилище многолетнего регулирования срабатывается до УМО не ежегодно, как при сезонном регулировании, а в конце расчетного маловодного периода. В годы повышен-

ной водности сработка водохранилища многолетнего регулирования стока наблюдается в пределах сезонной составляющей полезного объема. При проектировании режимов работы ГЭС, входящих в энергетические системы, работы гидроэнергетических каскадов, то есть в условиях, когда выбор правильного решения затрудняется обилием факторов, требующих учета, и сложностью их взаимодействия, наглядность календарного метода приобретает особую ценность. Существенным недостатком при использовании натуральных рядов наблюдений является их недостаточная представительность с точки зрения чередования маловодных и многоводных лет.

6.4. Диспетчерские графики при многолетнем регулировании стока и принципы их построения

Назначение диспетчерских графиков управления работой водохранилищ, описание его зон и характерных линий дано выше. Важной особенностью диспетчерских графиков при многолетнем регулировании стока (рис.19) является то, что основные линии диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока охватывают не всю полезную емкость водохранилища, а только ее сезонную составляющую и проводятся от НПУ до уровня обязательной предполоводной сработки, соответствующему сработанной $V_{с.с.}$.

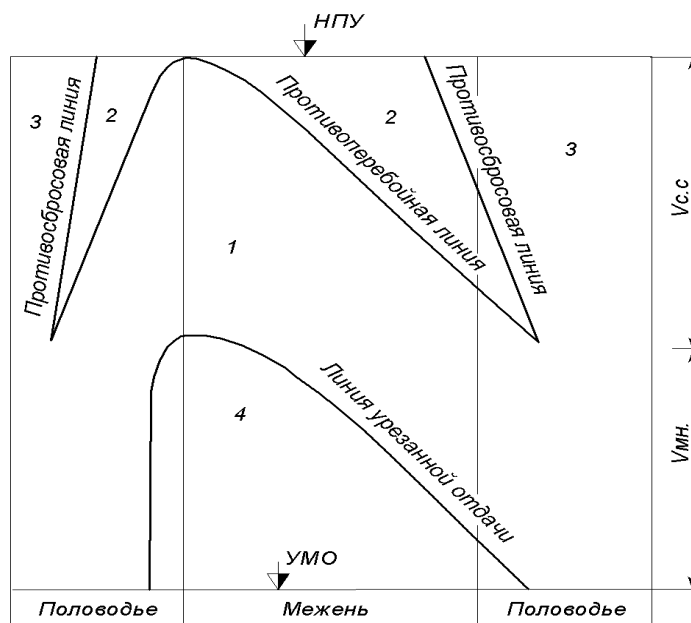


Рис. 19. Вид диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока:
 1 – зона гарантированной отдачи; 2 – зона повышенной отдачи;
 3 – зона полной производительности установки; 4 – зона ограничений

Характеристика стока фаз, используемого для расчета характерных линий диспетчерского графика, приведена в табл. 9. Порядок расчета и построения линий диспетчерского графика при многолетнем регулировании тот же, что и при сезонном регулировании.

Таблица 9

Сток фаз, используемый для расчета основных линий диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока

Наименование линий графика	Сток фаз	Отдача	Порядок расчета
1. Противоперебойная а) ветвь сработки	межень года со стоком, равным отдаче (величине $Q_{ср.}$)	гарантированная	с конца межени «ходом назад» от уровня ежегодной сработки или сработанной сезонной составляющей $V_{полезн.}$
б) ветвь наполнения	половодье года со стоком, равным отдаче	гарантированная	с конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполненного $V_{полезн.}$
2. Противосбросовая а) ветвь сработки	многоводная межень (как правило, зимняя) обеспеченностью P	полная пропускная способность установки	с конца межени «ходом назад» от уровня ежегодной сработки или сработанной сезонной составляющей $V_{полезн.}$
б) ветвь наполнения	половодье обеспеченностью	полная пропускная способность установки	с конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполненного $V_{полезн.}$
3. Зона ограничений	межень года со стоком, равным отдаче	гарантированная	с конца межени «ходом назад» от уровня УМО или сработанного $V_{полезн.}$

Глава 7

Каскадное регулирование стока

Совокупность водохранилищ и гидроэлектростанций, последовательно расположенных ступенями вдоль течения какой-либо реки, носит название каскада. Каскады водохранилищ (гидроэлектростанций) могут располагаться как на основной реке, так и на ее притоках. Условия работы каскадно расположенных водохранилищ отличаются от условий изолированных (одиночных) водохранилищ. Эти различия заключаются в следующем: суммарный используемый сток в створах нижерасположенных водохранилищ уменьшается на величину потерь воды из вышерасположенных водохранилищ (испарение, объемы воды на водоснабжение и орошение и так далее), а также перераспределен во времени, то есть наблюдается снижение в период половодья и повышение в период межени.

Перераспределение стока вышерасположенными водохранилищами благоприятно сказывается на работе нижерасположенных водохранилищ, так как емкость в последних создается, как правило, только для частичного регулирования стока боковой приточности. При сомкнутых бьефах нижележащая установка подпирает вышерасположенную и, тем самым, оказывает влияние на ее напоры. В связи со взаимным влиянием работающих в каскаде установок определение их параметров и разработка режима эксплуатации производится в условиях их совместной работы. Известны два вида каскадного регулирования стока:

1) независимое, когда каждая установка рассматривается как самостоятельный источник, снабжающий водой и энергией определенных потребителей; 2) компенсирующее, когда режим работы каждого составляется так, чтобы достигался наибольший суммарный эффект каскада.

С целью получения водноэнергетического эффекта от каскадного регулирования стока, выраженного в повышении суммарной гарантированной (минимальной) мощности или выработки энергии по каскаду, в проектной практике принимается компенсирующее регулирование. При этом водноэнергетический эффект компенсирующего каскадного регулирования стока складывается из двух составляющих: 1) эффекта за счет асинхронности стока на разных реках бассейна, являющейся результатом несовпадения фаз колебания стока основной реки (рек) и ее притоков; 2) эффекта за счет компенсации боковой приточности и неустойчивой энергоотдачи менее зарегулированных ГЭС на других водотоках попусками из водохранилищ-компенсаторов – собственно эффект компенсирующего регулирования стока. С формированием крупных

энергетических систем наблюдается объединение гидроэлектростанций и каскадов ГЭС с различной степенью регулирования стока и расположенных на реках с асинхронным режимом стока. Это создает водохозяйственные и гидрологические предпосылки для организации и проведения межбассейного компенсирующего электрического регулирования (по проводам), смысл которого аналогичен каскадному компенсирующему регулированию стока.

Глава 8

Регулирование стока половодий и паводков

Основной задачей расчета регулирования стока высоких половодий и летне-осенних паводков является определение максимальных уровней водохранилища и максимальных расходов воды в нижнем бьефе. Регулирование половодий осуществляется объемом водохранилища, предназначенным для ежегодной обязательной сработки и наполнения, а именно: 1) при сезонном регулировании – полным полезным объемом; 2) при многолетнем – сезонной составляющей полезного объема. Следовательно, для регулирования стока весеннего половодья, время наступления и объем которого прогнозируется с достаточной заблаговременностью, используется тот же полезный объем водохранилища, что и для повышения меженного стока. Летне-осенние паводки, время наступления и объем которых не поддаются надежному прогнозированию, пропускаются при наполненном водохранилище, то есть с отметки НПУ. Для дополнительной срезки расчетных половодий и регулирования летне-осенних паводков используется объем форсировки, заключенный в диапазоне уровней водохранилища от НПУ до ФПУ (форсированный подпорный уровень). Величина форсировки уровней над НПУ колеблется от 1 м (Бухтарминский гидроузел на р. Иртыше) до 5 м (Вилуйский гидроузел на р. Вилуе), а объем форсировки может достигать 15 % от полезного объема водохранилища. Объем водохранилища над НПУ предназначается только для срезки расчетных максимальных расходов и не используется для повышения низкого меженного стока. Поэтому после прохождения пика половодья или паводка необходимо произвести его сработку (на спаде половодья).

Пропуск половодий и паводков через гидротехнические сооружения регламентируется нормативными документами [10, 11, 23]. В соответствии с этими документами, ежегодная вероятность превышения максимальных расходов воды устанавливается в зависимости от класса сооружений для двух расчетных случаев – основного и поверочного.

Пропуск расчетного расхода воды для основного расчетного случая должен обеспечиваться, как правило, при нормальном подпорном уровне верхнего бьефа через эксплуатационные водосбросные устройства при полном их открытии, все гидротурбины ГЭС и через другие водопропускные сооружения. Пропуск расчетного расхода воды для паводочного расчетного случая надлежит обеспечивать при наивысшем технически и экономически обоснованном форсированном подпорном уровне всеми водопропускными сооружениями гидроузла, включая эксплуатационные водосбросы, гидротурбины ГЭС, водозаборные сооружения, судоходные шлюзы, рыбопропускные сооружения и резервные водосбросы.

Исходными данными для проведения пропуска половодий и паводков являются расчетный гидрограф притока, основные элементы которого (максимальный расход, объем основной волны и всего половодья или паводка) отвечают заданной вероятности превышения: кривая объемов или интерполяционная таблица объемов водохранилища в зависимости от подпорных уровней; вариантно задаваемые кривые пропускной способности гидротехнических сооружений.

Кривая объемов водохранилища соответствует горизонтальной поверхности воды и называется *статической кривой объемов*. Расчеты пропуска высоких вод с использованием статических кривых объемов водохранилища значительно упрощаются. Однако они допустимы только для гидроузлов, подпор которых у плотины значительно превышает подъем воды в реке при прохождении высоких половодий и паводков в естественных условиях. При этом негоризонтальность водной поверхности водохранилища незначительна и учет ее практически не оказывает влияния на точность проводимых расчетов.

Сброс воды из водохранилища производится через отверстия, предназначенные для пропуска полезно используемых расходов воды (гидроэлектростанция, шлюз, забор воды на водоснабжение и орошение) $Q_{нл}$, и через отверстия, предназначенные для пропуска избыточной воды (водосливы и водоспуски) $Q_{вс}$. Трансформация гидрографов весенне-летних половодий рассчитывается по уравнению неразрывности вида

$$\Delta V = (Q_{нл} - Q_{сбр}) \times \Delta t, \quad (79)$$

где ΔV – приращение объема водохранилища за расчетный интервал времени Δt ; $Q_{нл}$ и $Q_{сбр}$ – соответственно средние значения приточных и сбросных расходов за рассматриваемый интервал Δt ; $Q_{сбр}$ – сумма расходов через ГЭС или другие отверстия, полезно использующие воду, и расходы через водослив или водоспуск ($Q_{сбр} = Q_{нл} + Q_{вс}$); Δt – расчетный

интервал времени в секундах. Расчетный интервал времени (интервал осреднения расходов) принимается, как правило, равным одним суткам или $0,0864 \times 10^6$ с. На малых водотоках аридной зоны пропуск паводков осуществляется по среднечасовым расходам, то есть $\Delta t = 1$ ч.

Расчеты пропуска половодий выполняются, как правило, по срезочной схеме, которая сводится к следующему: от отметки ежегодной сработки водохранилища до отметки НПУ в зависимости от интенсивности наполнения водохранилища в нижний бьеф гидроузла сбрасывается расход воды либо гарантированный, либо соответствующий полной пропускной способности ГЭС. Полное раскрытие водосброса предусматривается при наполнении водохранилища до НПУ. Однако в ряде случаев для снижения величины форсировки уровней над НПУ при пропуске расчетного половодья допускается открытие водосброса при отметке ниже НПУ. Расходы притока определяются по расчетному гидрографу. Так как приращение уровней у плотины на текущие Δt неизвестно, расчет пропуска половодья осуществляется методом последовательного приближения (подбора) в следующей последовательности: задается уровень у плотины на конец Δt $Z_{кз}$; определяется средний уровень $Z_{ср} = (Z_n + Z_{кз})/2$; по $Z_{ср}$ определяется средний расход водосброса $Q_{вс}$; рассчитывается суммарный расход стока из водохранилища $Q_{сбр} = Q_{пл} + Q_{вс}$; разность расходов притока и стока дает расход аккумуляции (приращение) $Q_{ак} = Q_{пр} - Q_{сбр}$; приращение объема водохранилища $\Delta V_{ак} = Q_{ак} \times \Delta t$; наполнение водохранилища на конец Δt ; $V_k = V_n + \Delta V_{ак}$; по V_k с кривой объемов водохранилища снимается Z_k . Если Z_k не совпадает с $Z_{кз}$, расчет повторяется до совпадения этих величин. В результате расчетов пропуска половодий (паводка) различной обеспеченности и определения при этом максимальных зарегулированных расходов воды строятся кривые обеспеченности максимальных естественных и зарегулированных расходов вод в створе гидроузла.

При сооружении водохранилищ на равнинных реках, когда величина подпора у плотины соизмерима с естественным подъемом уровня при прохождении половодий и паводков, негоризонтальность водной поверхности значительна. Неучет ее может привести к завышению ФПУ водохранилища или количества водопропускных отверстий.

В этом случае расчеты пропуска высоких вод производятся по динамической кривой объемов водохранилища. Расчет и построение кривой объемов с учетом негоризонтальности водного зеркала является задачей речной гидравлики.

Для случая открытого поверхностного водосброса и прохождения высоких паводочных и паводочных расходов при НПУ кривые динамических объемов могут быть построены следующим способом: 1) все протяжение водохранилища (от створа плотины до места выклинивания подпора) разбивается на ряд расчетных участков; 2) для каждого участка рассчитывается и строится кривая статических объемов и опорная кривая по методу Н.М. Бернадского; 3) для заданных уровней у плотины, (как правило, в пределах от НПУ до ФПУ) и расхода воды $Q_{плт}$ (без трансформации) с учетом его изменения на протяжении водохранилища по опорным кривым Н.М. Бернадского устанавливаются уровни воды в начале и конце расчетных участков; 4) по уровням воды в середине этих участков определяются соответствующие статические объемы по участкам. Сумма этих объемов принимается равной объему водохранилища V при данном очертании кривой свободной поверхности и относится к заданным $Z_{плт}$ и $Q_{плт}$. Объемы водохранилища при одном значении $Q_{плт}$, но разных уровнях у плотины $Z_{плт}$ дают возможность построить одну кривую динамических объемов водохранилища, а с учетом изменения и $Q_{плт}$ – семейство кривых динамических объемов водохранилища.

Глава 9

Эксплуатация водохранилищ

9.1. Мероприятия, осуществляемые при создании и эксплуатации водохранилищ

Создание и эксплуатация водохранилищ вызывает многообразные и значительные изменения в хозяйстве и природе более или менее обширных территорий. В целях предотвращения нежелательных последствий и максимального использования положительного эффекта создания водохранилища в период строительства гидроузлов и в последующий период их эксплуатации проводятся комплексы мероприятий.

При создании водохранилищ, помимо строительства плотины и связанных с ней сооружений, требуется проведение больших работ по переселению жителей, переустройству и переносу затрагиваемых объектов хозяйства, по охране природы и подготовке водохранилища к использованию. Мероприятия, проводимые в зоне водохранилища и в нижнем бьефе гидроузла, подразделяются на две группы: 1) мероприятия по предотвращению, компенсации или смягчению нарушений, вносимых водохранилищами в природные условия и хозяйственную жизнь регионов; 2) мероприятия по подготовке к рационально-

му использованию водных, биологических и других ресурсов реки в верхнем и нижнем бьефах.

В состав мероприятий первой группы входят:

1) инженерная защита территорий и отдельных объектов (обвалование территории совместно с отводом вод с нее, укрепление берегов и откосов земляных сооружений, устройство волноломных и волноотбойных сооружений, подсыпка или намыв берегов, дренаж подтопляемых территорий, планировка дна и берегов водохранилища, гидроизоляционные и иные работы по локальной защите и приспособлению объектов к новым гидрогеологическим условиям);

2) восстановление фонда сельскохозяйственных угодий путем освоения неиспользуемых земель, интенсификация использования имеющихся сельскохозяйственных угодий, восстановление теряемой сельскохозяйственной продукции земельнохозяйственное переустройство в новых условиях:

3) восстановление населенных мест и основных их фондов;

4) переустройство промышленных предприятий;

5) восстановление или переустройство инфраструктуры;

6) восстановление рекреационных и санитарно-курортных объектов;

7) сохранение исторических и архитектурных памятников;

8) восстановление лесных, рыбных, охотничьих и других ресурсов, изъятие из затопляемой плодородного почвенного слоя, запасов древесины, торфа, полезных ископаемых или обеспечение условий их дальнейшего использования;

9) предотвращение ухудшения качества воды: очистка ложа от деревьев и кустарников, удаление загрязняющих веществ, строительство очистных сооружений и так далее.

Использование водохранилищ как новых водоемов требует проведения комплекса мероприятий общего и отраслевого характера (вторая группа мероприятий). В интересах отдельных отраслей проводятся:

1) транспортное освоение водохранилищ;

2) рыбохозяйственное освоение водохранилищ;

3) строительство водозаборных сооружений в интересах ирригации, водоснабжения и так далее;

4) устройство рекреационных объектов;

5) инженерное обустройство акваторий и береговых зон в целях рационального использования каждого из участков водохранилища;

б) мероприятия эксплуатационного характера (рыбохозяйственные, сельскохозяйственные, судоходные, санитарные попуски и другие).

9.2. Организация эксплуатации водохранилищ

Для улучшения организации использования водохранилищ в России (а ранее – в СССР) осуществляются следующие мероприятия [1]:

1) разработка основных положений правил использования водных ресурсов водохранилищ, их согласование и утверждение; 2) разработка детальных правил эксплуатации, инструкций, диспетчерских графиков и так далее; 3) разработка и осуществление конкретных годовых, сезонных и других режимов наполнения и сработки водохранилищ, работы водозаборных сооружений, гидроэлектростанций и так далее на основе прогноза поступления воды в водохранилища, учета современной хозяйственной ситуации.

Организационные формы систем эксплуатации водохранилищ на земном шаре разнообразны. Например, в России крупные комплексные гидроузлы, имеющие в своем составе гидроэлектростанции, эксплуатируются РАО ЕЭС. При этом интересы других водопользователей удовлетворяются в соответствии с нормативными документами специальными комиссиями. Собственно организация и проведение работ по благоустройству и улучшению технического и экологического состояния крупнейших водохранилищ осуществляется управлениями эксплуатации водохранилищ. Общая координация и государственный контроль за состоянием водохранилищ возложены на органы Министерства природных ресурсов России.

За рубежом организация водохранилищ и гидроузлов различна и зависит от социально-экономических условий, уровня развития экономики, степени зависимости от крупного капитала. Например, в США примерно половина водохранилищ эксплуатируются Инженерным корпусом, Бюро мелиорации, Управлением долины Теннесси, а остальные водохранилища – преимущественно акционерными обществами. Такое же сочетание государственного и частнокапиталистического управления использованием водохранилищ характерно и для других развитых стран.

В процессе эксплуатации водохранилища необходимо стремиться к комплексному рациональному использованию его водных, земельных и биологических ресурсов, для чего проводится:

1) акваториальное районирование – выделение акваторий и участков береговой зоны в соответствии с намечаемыми целями;

2) планировка водохранилища – совокупность действий в целях упорядочивания пространственной структуры водоема и разработки конкретных схем размещения и функционирования рекреационных, промышленных, сельскохозяйственных и селитебных зон;

3) техническое обустройство водохранилищ – совокупность водохозяйственных, инженерных, экологических и организационных мероприятий, осуществляемых с целью реализации разработанной планировочной схемы. В последнем случае, вследствие разнообразия возможных мер воздействия на водоемы возникает необходимость оптимизации состава и последовательности этих мер (табл.10).

Таблица 10

Система мероприятий по обустройству водохранилищ

Тип мероприятий	Целевая установка	Используемые средства воздействия	Возможные мероприятия
Водохозяйственные	Достижение оптимального режима стока и уровней водоема	Управляющие системы гидротехнических сооружений	Изменение уровня воды, глубины навигационной, предзимней и зимней сработок водохранилища
Инженерно-технические	Обеспечение необходимых условий для хозяйственной деятельности на отдельных участках акватории и береговой зоны	Создание инженерных сооружений, использование технических устройств	Строительство защитных и других дамб, насосных установок, укрепление берегов, дноуглубление, строительство очистных сооружений и др.
Экологические	Создание условий для воспроизводства и охраны биологических ресурсов	Направленное и контролируемое изменение структуры, функций и продуктивности биогеоценозов	Изъятие излишних масс органики, внесение удобрений, аэрация воды, улучшение воспроизводства и местообитания
Организационные	Комплексное и рациональное природопользование в районах водохранилищ	Законодательные акты, ведомственные постановления, инструкции, нормативы	Регламентация деятельности предприятий, хозяйств, отдельных граждан. Установление водоохраных зон

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Перечислите мероприятия, проводимые в зоне водохранилища и в нижнем бьефе гидроузла.
2. Перечислите мероприятия, проводимые в России для улучшения организации использования водохранилищ.

3. Укажите цели водохозяйственных, инженерно-технических, экологических и организационных мероприятий по обустройству водохранилищ.

Глава 10

Водохранилища и окружающая природная среда

10.1. Некоторые особенности водохранилищ как природно-техногенного объектов

Создание водохранилищ и регулирование ими стока значительно преобразует естественный гидрологический режим реки, что влечет за собой изменения и многих других природных процессов и условий. Эти изменения проявляются по-разному в верхних и нижних бьефах гидроузлов и совсем иначе – в районах их водохозяйственного влияния, то есть в зонах потребления стока. Можно выделить следующие районы воздействия водохранилищ на окружающую среду:

- 1) само водохранилище и прилегающие территории;
- 2) район, в пределах которого сказываются последствия регулирования водохранилищем жидкого, твердого, химического и биологического стока реки для природы и хозяйства в нижнем бьефе гидроузла, включая дельту реки и взморье;
- 3) район изъятия стока из реки с подразделением на: а) подрайон изъятия стока на ограниченном участке реки, при котором использованная вода на некотором расстоянии ниже плотины возвращается в ту же реку; б) подрайон уменьшения стока в результате безвозвратной переброски воды из водохранилища в другой речной бассейн;
- 4) район дополнительного стока (орошаемые массивы, обводняемые реки и так далее).

На степень и направленность изменений окружающей среды в верхних бьефах гидроузлов, то есть в пределах водохранилища, оказывают влияние, в первую очередь, его размеры, конфигурация, морфология чаши, состав слагающих дно и берега пород, режим эксплуатации, климатические условия района. На изменения в нижнем бьефе гидроузла, в основном, влияют степень преобразования стока в многолетнем, сезонном, недельном и суточном режимах, а затем и другие указанные выше факторы, а в зонах сокращения стока – степень его изъятия в целом и по сезонам года, величина боковой приточности и физико-географические условия долины.

Влияние водохранилищ на окружающую среду, по мнению многих исследователей, чрезвычайно разнообразно, может проявляться

прямо и косвенно, может быть положительным и отрицательным, постоянным и временным, нарастающим, постоянным по годам или затухающим. В результате затопления территорий происходит изменение гидрографии регионов, причем иногда очень существенное. Значительно увеличивается удельный вес площади поверхностных водных объектов. При многолетнем регулировании стока уровни воды в водохранилищах в разные годы находятся на неодинаковых максимальных отметках, что приводит к своеобразному нестабильному ходу процессов в береговой зоне, осложняет судоходство и эксплуатацию водозаборов, причалов и других сооружений. При длительных ветрах одного направления наблюдаются сгонно-нагонные изменения уровней воды, которые резко проявляются на мелководных водохранилищах. Их продолжительность бывает от нескольких часов до нескольких суток, а общий перекоп водной поверхности может превышать 1 м. Амплитуда сейшевых колебаний уровня, вызываемых резкими перепадами атмосферного давления над разными районами крупных водохранилищ, достигает нескольких десятков сантиметров.

В результате стоковых, дрейфовых и компенсационных течений в водохранилищах формируется нестационарная система транзитно-циркуляционных течений, существенно неоднородная в разных частях водохранилища. Наиболее гидродинамически активные зоны приурочены к бывшим речным руслам, зоны с водоворотной циркуляцией – к затопленным поймам и первым террасам речных долин, застойные зоны – к обширным, не имеющим притоков мелководным заливам, водообмен в которых происходит только при глубокой сработке и наполнении водохранилищ. Проточность водохранилищ, обусловленная, в основном, постоянными стоковыми течениями, влияет на интенсивность турбулентного перемешивания воды, минерализацию, гидрохимические и гидробиологические процессы. Проточность водохранилищ меняется по годам и сезонам в зависимости от их водности и степени использования водных ресурсов. Объем и динамика водных масс определяют влияние водохранилища на температурный режим атмосферы над акваторией и прибрежной территорией. От морфологических особенностей водохранилища (длина, ширина, глубины и конфигурация) во многом зависят величина и направление ветрового волнения, которые, в свою очередь, влияют на переформирование дна и берегов, кислородный режим, возможность существования прибрежной растительности и так далее.

Характерной особенностью водохранилищ является формирование в них различных по своим физическим, химическим и биологиче-

ским характеристикам водных масс, структура и конфигурация которых подвержена сезонным изменениям. Поэтому, говоря о состоянии водохранилищ, особенно, качестве вод, необходимо дифференцировано рассматривать его отдельные части. В целом же, роль водохранилищ в формировании качества вод двойка. С одной стороны, несомненно положительная роль процессов самоочищения, усиливающихся за счет седиментации, отстаивания, разбавления и деструкции. С другой стороны, особенности водохранилищ, например, замедленный водообмен, термическая и кислородная стратификация, ускоряют эвтрофикацию и усиливают интенсивность антропогенных воздействий, делая водохранилища более уязвимыми для загрязнения, чем реки. При этом необходимо отметить, что ориентировочная оценка последствий создания водохранилища на качество вод может быть проведена с помощью стандартных методов, используемых при нормировании сбросов загрязняющих веществ в водохранилище и реку [18 – 20]. Некоторые из этих методов рассмотрены в разделе 10.2.

Таким образом, водохранилища – принципиально иные, чем озера и реки, водные объекты, обладающие специфическими особенностями гидрохимического, гидробиологического, гидрофизического и водного режимов, которые не могут трактоваться только как положительные или отрицательные.

10.2. Разбавление сточных вод в водохранилищах

Большинство водохранилищ является приемником сточных и ливневых вод с прилегающей территории. С учетом этого уже при проектировании водохранилищ следует обращать внимание на вопросы определения допустимых сбросов загрязняющих веществ в целях предотвращения в будущем экологических проблем, связанных с загрязнением поверхностных вод и невозможностью их хозяйственного использования. При этом базовое уравнение для определения предельно допустимых сбросов (ПДС) имеет вид:

$$\text{ПДС} = C_{\text{см.ок}} q_{\text{см}}, \quad (80)$$

где $C_{\text{см.ок}}$ – допустимая концентрация загрязняющего вещества в сточных водах (поступающих в водохранилище), рассчитываемая по формуле (81); $q_{\text{см}}$ – расход сточных вод:

$$C_{\text{см.ок}} = n \cdot \left(\text{ДК} \cdot \exp(-k_C \cdot t) - C_\phi \right) / C_\phi. \quad (81)$$

где C_ϕ – фоновая концентрация вещества в створе водоема, неподверженном влиянию рассматриваемого источника; k_C – константа самоочищения; t – время добегания водных масс, содержащих загрязняющие

вещества; n – кратность общего разбавления, определяемая в общем случае по формуле:

$$n = n_o \cdot n_n, \quad (82)$$

где n_o и n_n – кратности основного и начального разбавления. Основное разбавление происходит благодаря турбулентному обмену в водном объекте, а начальное – вследствие увлечения окружающей жидкости турбулентным струйным потоком, образующимся при истечении сточных вод из оголовка выпуска. Границей начального разбавления является сечение, где разность скоростей струйного потока и окружающей среды становится незначительной [18–20]. Практические методы расчета общего, основного и начального разбавления приведены в [32].

10.2.1. Расчет начального и основного разбавления по методу М.А. Руффеля

Кратность начального и основного разбавления по методу гидрогеолога М.А. Руффеля может быть вычислена в случаях сброса сточных вод в: 1) мелководную часть или в верхнюю треть глубины водоема и распространении загрязненной струи вдоль берега под воздействием поверхностного течения, имеющего одинаковое с ветром направление; 2) в нижнюю треть глубины водоема и при распространении загрязненной струи к береговой полосе против выпуска под воздействием донного компенсационного течения, имеющего направление, обратное направлению ветра.

Кратность начального разбавления определяется:

- 1) при выпуске в мелководье или верхнюю треть глубины водоема:

$$n_n = \frac{q_{cm} + 0.00215 \cdot v_{\text{в}} \cdot h_{\text{ср.в}}^2}{q_{cm} + 0.000215 \cdot v_{\text{в}} \cdot h_{\text{ср.в}}^2}; \quad (83)$$

- 2) при выпуске в нижнюю треть глубины водоема:

$$n_n = \frac{q_{cm} + 0,00158 \cdot v_{\text{в}} \cdot h_{\text{ср.в}}^2}{q_{cm} + 0,000079 \cdot v_{\text{в}} \cdot h_{\text{ср.в}}^2}, \quad (84)$$

где $v_{\text{в}}$ – скорость ветра над водой в месте выпуска сточных вод, м/с;
 $h_{\text{ср.в}}$ – средняя глубина (м) водоема вблизи выпуска на участке протяженностью L_3 в зависимости от средней глубины водоема $h_{\text{ср}}$ (табл. 11).

Кратность основного разбавления рассчитывается:

- 1) при выпуске в мелководье или верхнюю треть глубины водоема

$$n_o = 1 + 0,412 \cdot \bar{X}^{0,627+0,0002 \cdot \bar{X}}, \quad (85)$$

где $\bar{X} = \frac{X}{\Delta x_r}$; $\Delta x_r = 6,53 \cdot h_{cp,6}^{1,167}$; X – расстояния от выпуска до контрольного створа, м;

2) при выпуске в нижнюю треть глубины водоема

$$n_o = 1,85 + 2,32 \cdot \bar{X}^{(0,41+0,0064 \cdot \bar{X})}, \quad (86)$$

где $\bar{X} = \frac{X}{\Delta x_r}$; $\Delta x_r = 4,41 \cdot h_{cp,6}^{1,167}$.

Общая кратность разбавления вычисляется на основе полученных значений n_n и n_o по формуле (1.26), по формуле (1.28) – допустимая концентрация рассматриваемого вещества в сточных водах.

Таблица 11

Протяженность загрязненной зоны водоема

Средняя глубина водоема h_{cp} , м	Протяженность загрязненной зоны L_z , м
3–4	100
5–6	150
7–8	200
9–10	250

В целом, недостатки данного метода вытекают из условий, для которых он разработан: формула (3.27) применима для участков не более 20 км, формула (3.28) – не более 0,5 м; расчеты проводятся для открытых участков водоемов с относительно прямолинейной береговой линией.

10.2.2. Расчет общего разбавления по методу Н.Н. Лапшева

Метод Н.Н. Лапшева применим для рассеивающих и сосредоточенных выпусков сточных вод при скорости их истечения более или равной 2 м/с, расположении выпуска на некотором удалении от берега в месте с относительной глубиной водоема $h/d_{0,cm} > 30$, где $d_{0,cm}$ – диаметр выпускного отверстия. Кратность (наименьшая) общего разбавления на расстоянии X от выпуска стоков в водоем может быть рассчитана по выражению:

$$n = L \cdot \left(\frac{0,2 \cdot X}{d_{0,cm}} \right)^{5,4}, \quad (87)$$

где $L=1$, если выпуск сосредоточенный. Для рассеивающего выпуска величина L находится по формуле:

$$L = 0,74 \cdot \left(\frac{X}{l_1} + 2,1 \right)^{-0,4}, \quad (88)$$

где l_1 – расстояние между оголовками выпуска. Параметр ζ вычисляется в зависимости от преобладающих факторов движения воды в водоеме. Так, если это движение определяется стоком, расчет ζ проводится по формуле (3.31), а если ветром (или известны скорости стоковых течений) – то по формуле (3.32):

$$\zeta = \frac{L_g \cdot \omega_0}{0,000015 \cdot \beta_g \cdot V_{cm} + L_g \cdot \omega_0}, \quad (89)$$

$$\zeta = \frac{v_g}{0,000015 \cdot v_{cm} + v_g}, \quad (90)$$

где L_g – длина водоема от места выпуска в направлении стокового течения, м; ω_0 – суммарная площадь выпускных отверстий, м²; β_g – период обмена воды в водоеме, годы; V_{cm} – годовой объем сточных вод, поступающих в водоем, м³; v_{cm} – скорость истечения сточных вод (на выпуске), м/с; v_g – скорость течения, м/с. Параметр μ рассчитывается по формуле:

$$\mu = 0,875 + \frac{0,325 \cdot h}{360 + \frac{v_g}{v_{cm}} \cdot 10^5}. \quad (91)$$

10.2.3. Расчет общего разбавления на основе аналитического решения уравнения диффузии

Расчет общего разбавления может быть получен и непосредственно по концентрациям рассматриваемого вещества в водоеме и сточных водах по формуле:

$$n = \frac{C_{cm} - C_\phi}{C_{x,max} - C_\phi}, \quad (92)$$

где $C_{x,max}$ – максимальная концентрация вещества в расчетном створе (ниже по течению притока природных или сточных вод), определяемая по уравнению:

$$C_r = C_{cm} \cdot \exp \left[- \frac{k_c \cdot r_c^2}{2 \cdot \left(D_c - \frac{q_{cm}}{\varepsilon_r \cdot h_{cp}} \right)} \right], \quad (93)$$

где ε_c – угол сектора распространения сточных вод (при выпуске вдали от берега $\varepsilon_c = 2 \cdot \pi$, при выпуске у прямолинейного берега $\varepsilon_c = \pi$, $\pi = 3,14$); h_{cp} – средняя глубина водоема; r_c – расстояние от выпуска сточных вод до контрольного створа; D_c – коэффициент турбулентной диффузии, определяемый по формуле:

$$D_c = \frac{\left(\mathcal{G} \cdot h_{вл,1\%} + \pi \cdot v_{вл} \cdot h_{cp} \right) \cdot d_3^{\frac{1}{3}}}{b_B \cdot h_{cp}^{\frac{1}{3}}}, \quad (94)$$

\mathcal{G} – фазовая скорость волн, м/с; $h_{вл,1\%}$ – высота волны 1%-й обеспеченности, м; $v_{вл}$ – среднее значение скорости переноса, м/с; b_B – эмпирический коэффициент ($b_B \approx 700$); d_3 – эффективный диаметр донных отложений (значение, ограничивающее 10 % наиболее крупных частиц), м. Фазовая скорость волн рассчитывается по формуле (95), а средняя скорость переноса, обусловленная ветровым течением, – по формуле (96).

$$\mathcal{G} = \begin{cases} \sqrt{\frac{g \cdot L_{вл}}{2 \cdot \pi}} & \text{при } h_{cp} > 0,5 \cdot L_{вл}, \\ \sqrt{g \cdot \left(h_{cp} + h_{вл,1\%} \right)} & \text{при } h_{cp} < 0,5 \cdot L_{вл} \end{cases}, \quad (95)$$

где $L_{вл}$ – длина волны, м;

$$v_{вл} = \theta \cdot v_{вет,2} \cdot \sqrt{3 + 10 \cdot h_{вл,1\%}}, \quad (96)$$

$v_{вет,2}$ – скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью, м/с; θ – коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента Шези по табл. 12. В свою очередь, коэффициент Шези определяется по формуле Штриклера:

$$C_{ш} = 33 \cdot \left(\frac{h_{cp}}{d_3} \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (97)$$

Таблица 12

Значения коэффициента θ [7]

$C_{ш}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\theta \cdot 10^2$	0.10	0.18	0.27	0.34	0.42	0.50	0.55	0.60	0.46	0.68

Следует отметить, что при залповом поступлении сточные воды могут вытеснять воды исследуемого объекта. При этом зона смешения имеет линейный размер r_0 :

$$r_0 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot q_{cm}}{\pi \cdot h_{cp}}}, \quad (98)$$

где $\Gamma = 2$, если выпуск сточных вод расположен у берега; иначе $\Gamma = 0,5$.

10.3. Воздействие водохранилищ на природную среду прилегающих территорий

Водохранилища оказывают влияние, практически, на все компоненты лито-, гидро-, атмо- и биосфер, образующих природную среду прилегающих территорий, то есть на геодинамические условия, рельеф, режим подземных вод, климат, почвы, растительность, животный мир и ландшафт, в целом [1]. Влияние водохранилищ, даже самых крупных, на климат распространяется на сравнительно небольшую территорию. При этом микроклимат отдельных районов определяется увеличением суммарной радиации и радиационного баланса, большей теплоемкостью водохранилищ по сравнению с сушей, а само влияние неодинаково в различных природных зонах. Так, в зоне недостаточного увлажнения оно менее значительно, чем в зоне избыточного увлажнения. Весной водохранилища оказывают охлаждающее воздействие на прибрежные территории, а во второй половине теплого периода – отепляющее.

Значительно и многообразно влияние водохранилищ на уровень и режим подземных вод. Река до создания водохранилища – это как бы водоприемник грунтовых потоков. С заполнением водохранилища грунтовые, трещинно-грунтовые, частично трещинно-пластовые и трещинно-карстовые воды подпираются, и уровень их поднимается до таких отметок, при которых они вновь стекают в водохранилище. До этого момента они непрерывно накапливаются и пополняются за счет просачивания из водохранилища. При этом уклон потока грунтовых вод и скорость их движения, как правило, уменьшаются, что также способствует повышению их уровня. В результате, дренажная роль водотока в целом уменьшается. Подпор грунтовых вод распространяется в зависимости от местных условий и происходит в зоне шириной от нескольких десятков метров до многих километров от берега водохранилища. Уровень грунтовых вод вблизи водохранилищ испытывает колебания в течение года, снижаясь при сработке водохранилища и повышаясь при его заполнении; чем ближе к урезу, тем больше амплитуда этих колебаний. Подъем грунтовых вод к поверхности земли вызывает подтопле-

ние фундаментов зданий, подземных коммуникаций, сельскохозяйственных и лесных площадей, а при выходе на поверхность – их заболачивание, а иногда – засоление. При этом следует отметить, что наряду с отрицательными последствиями подъема уровня грунтовых вод в ряде районов, где уровень вод в естественном состоянии находится на большой глубине, происходит увеличение запасов используемых грунтовых вод и улучшение условий произрастания растительности.

Создание крупных водохранилищ в определенной степени повлияло на современные тектонические процессы, в частности, на возникновение небольших землетрясений, что в отдельных случаях может приводить к деформации ложа водохранилища, усилению переформирования берегов и их подтоплению. С созданием водохранилищ начинается формирование рельефа его берегов под преимущественно гидродинамическим действием водоема и трансформированных гидроморфологических процессов (ветровое волнение, высота и морфология берегов, ледовый режим, перемещение наносов вдоль берегов, характер пород, слагающих берега, наличие и тип растительности).

Еще одно возможное последствие регулирования речного стока заключается в изменении почвенного и растительного покрова прилегающей береговой зоны. Принято выделять следующие основные зоны влияния водохранилища на почвенно-растительный покров: 1) постоянного, периодического и эпизодического затопления; 2) заболачивания; 3) сильного, умеренного и слабого подтопления; 4) активного и эпизодического климатического влияния. Размеры территории, на которой происходят изменения почвенного и растительного покрова, могут быть весьма значительными, особенно у равнинных водохранилищ. Ширина отдельных зон колеблется от нескольких метров до нескольких километров.

В зоне периодического затопления формируются болотные и торфяно-глеевые почвы с высокой степенью заторфованности и большим содержанием закисных форм железа (Fe^{2+}). В зоне подтопления грунтовые воды подходят близко к поверхности, здесь степень увлажнения почв определяется не только глубиной залегания грунтовых вод, но и величиной их капиллярного подъема, которая в зависимости от механического состава грунтов может колебаться от 0.5–1.0 до 6.0 м.

В зоне умеренного подтопления (уровень грунтовых вод на глубине от 1 до 2 м) доминирует процесс так называемого олуговения подзолистых почв, когда в них повышается содержание гумуса, азота, фосфора, кальция и соединений железа, в верхнем горизонте почв появляются охристые пятна и прожилки. В зоне слабого подтопления (уровень

грунтовых вод на глубине 2–4 м) увеличивается подвижность гумусовых веществ и железа, происходит оглеение почвы.

Постоянное затопление территории приводит к полной гибели существовавшей ранее наземной растительности. В зоне мелководного постоянного затопления и на части территории зоны временного подтопления формируется полоса гидрофильных и гигрофильных ассоциаций. На их развитие большое влияние оказывает уровенный режим водохранилищ, защищенность от волнения, характер и состав прежней растительности, а также рельеф и грунты дна, химический состав вод и так далее. В зонах подтопления древесно-кустарниковая и травянистая растительность по-разному реагирует на изменение увлажненности. Деревья и кустарники более чутко, чем травы, реагируют на подъем грунтовых вод и большей частью гибнут при сильном подтоплении. В зонах умеренного и слабого подтопления водное и минеральное питание улучшается, вследствие чего увеличиваются прирост древесины и общая масса некоторых видов трав. При этом необходимо отметить, что изменение почвенного, растительного покрова и водного режима территории приводит и к изменению фауны, поскольку меняются условия обитания и кормовая база.

10.4. Зоны влияния водохранилищ на окружающую среду и хозяйственную деятельность

Значение водохранилищ для отраслей хозяйства, в интересах которых они создаются, и отраслей, связанных с использованием водных ресурсов, очень велико. По степени и характеру воздействия водохранилищ в отечественной теории и практике регулирования стока принято выделять на прилегающих территориях следующие зоны [1]:

- 1) зона прямого воздействия в верхнем бьефе:
 - 1.1) зона постоянного затопления принимается обычно в пределах уреза воды при НПУ с учетом кривой подпора обеспеченностью 10 %;
 - 1.2) зона периодического временного затопления (между НПУ и линией уреза воды с учетом подпора при прохождении паводков обеспеченностью 0.3 % для железных дорог, 1 % – для населенных пунктов, 5 % – для сельхозугодий);
 - 1.3) зона эпизодического временного затопления с обеспеченностью, меньшей, чем указано выше (п.1.2); эта зона учитывается только в особых случаях, например, при обосновании ФПУ;
 - 1.4) зона повышения уровня грунтовых вод (подтопления); предельно допустимой глубиной залегания уровня грунтовых вод считается глу-

бина 1 м для сельскохозяйственных угодий, 2 м – для сельских населенных пунктов, 3 м – для городов и поселков городского типа;

1.5) зона переформирования берегов водохранилищ; в проектах учитывается перенос объектов из зоны переработки берегов, прогнозируемой на 10-летний период; в зоне прогнозируемой переработки за 50 лет ограничивается капитальное строительство;

1.6) зона климатического влияния (учитывается пока лишь в особых случаях);

2) зона косвенного влияния в верхнем бьефе:

2.1) зона, выбывающая из прежнего хозяйственного использования по производственно-экономическим соображениям;

2.2) зона отчуждения под объекты, строительство которых вызывается созданием или эксплуатацией водохранилища;

3) зона влияния в нижнем бьефе:

3.1) зона влияния многолетнего и сезонного регулирования стока рек;

3.2) зона влияния недельного и суточного регулирования стока рек;

3.3) зона полного или частичного изъятия стока из реки (при отводе воды из водохранилищ в деривационные водоводы, каналы переброски стока и так далее).

Все перечисленные выше зоны воздействия водохранилищ на природу и хозяйство прилегающих районов образуют сложные сочетания: на одну и ту же территорию могут оказывать влияние и временные затопления, и подтопление, и изменение климата, и многолетнее, сезонное, недельное и суточное регулирование стока. В зависимости от сочетания зон в верхнем бьефе можно выделить несколько крупных комплексных ареалов воздействия водохранилищ:

1) ареал сильного влияния включает зоны постоянного затопления, переформирования берегов, часть зоны подтопления (ширина этого ареала составляет в среднем 0,2–1,0 км);

2) ареал умеренного и слабого влияния водохранилищ охватывает остальную часть зоны подтопления, зону систематического климатического влияния (ширина ареала от 2–3 км до 10–15 км).

В нижнем бьефе зона влияния регулирования стока охватывает участок или всю долину реки, ее протяженность может составлять от нескольких километров для малых, до 300–1000 км для крупных водохранилищ.

В целом, влияние водохранилищ на окружающую среду, население и хозяйственную деятельность исключительно многообразно и до конца не изучено. В частности, в настоящее время, как это ни странно, отсутствуют обобщенные сведения о крупномасштабных изменениях

природной среды и хозяйственного комплекса. Достаточно спорными остаются и подходы к оценке влияния регулирования стока на отдельные компоненты среды и элементы их режима, что стало хорошо заметно, например, при обсуждении целесообразности создания водохранилищ на рр. Томи и Катуни. Таким образом, существует необходимость существенного углубления наших знаний о водохранилищах и механизмах взаимодействия в биогеоценозах разного уровня – от локальных до общепланетарного.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Укажите районы воздействия водохранилищ на окружающую среду.
2. Назовите факторы, определяющие качество вод водохранилища.
3. Перечислите основные зоны влияния водохранилищ на прилегающие территории.
4. Перечислите гидрологические и гидрохимические параметры, необходимые для расчета допустимых концентраций в сточных водах, сбрасываемых в водохранилища, а также методы их определения.
5. Дайте определения понятий ПДС и ПДК.
6. Объясните смысл определения кратности разбавления общего, основного и начального.

Список литературы

1. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водохранилища. – М.: Мысль, 1987. – 325 с.
2. Авакян А.Б., Шарапов В.А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. – М.: Энергия, 1977. – 398 с.
3. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 444 с.
4. Арсеньев Г.С. Практикум по водному хозяйству и водохозяйственным расчетам. – Л.: ЛГМИ, 1989. – 195 с.
5. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. – Л.: ЛПИ, 1985.–108 с.
6. Богословский Б.Б. Озероведение. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 335 с.
7. Водный кодекс Российской Федерации. ФЗ от 03.06.2006 г. № 73. Ред. по состоянию на 15.04.2007 г. – Новосибирск: Сиб. Унив. изд-во, 2007. – 61 с.
8. Водное хозяйство и мелиорация. – Т.5: Водное хозяйство. – М.: Агропромиздат, 1985.
9. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ: учебное пособие / под ред. Р.С. Штенгелова. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
10. Гидротехнические сооружения речные. СНиП 11-50-74 с изменением Госстроя СССР от 10 июля 1984 г. № 108. – М.: Госстрой СССР, 1984.
11. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003. Приняты постановлением Госстроя России от 30.06.2003 г. № 137. – М.: Госстрой России, 2006.
12. Горев Л.Н., Никаноров А.М., Пелешенко В.Л. Региональная гидрохимия. – Киев: Выща шк., 1989. – 280 с.
13. Климентов П.П., Пыхачев Г.Б. Динамика подземных вод. – М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по горному делу, 1961. – 516 с.
14. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеоздат, 1952. – 392 с.
15. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
16. Лучшева А.А. Практическая гидрология. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 440 с.
17. Маркин В.Н., Раткович Л.Д., Соколова С.А. Обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне реки: учебное пособие. – М.: МГУП, 2006. – 77 с.

18. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) вредных веществ в поверхностные водные объекты со сточными водами. – Харьков: ВНИИВО, 1990. – 109 с.
19. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А.В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 175 с.
20. Методические указания по разработке нормативов предельно допустимых сбросов вредных веществ в поверхностные водные объекты. – М.: Министерство природных ресурсов РФ, 1999. – 19 с.
21. Михайлов Л.Е. Гидрогеология. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 264 с.
22. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник. – М.: Высш. шк., 2005. – 463 с.
23. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004.
24. Павлов А.Н., Юровский Ю.Г. Практикум по курсу «Гидрогеология». Раздел: «Гидрогеологические расчеты»: учебное пособие. – Л.: Изд-во ЛПУ, 1977. – 60 с.
25. Плешков Я.Ф. Регулирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 560 с.
26. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
27. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения. – М.: ИВП РАН, 1993. – 430 с.
28. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 352 с.
29. Раткович Л.Д., Соколова С.А. Водохозяйственная система с водохранилищем многолетнего регулирования стока и каналом межбассейновой переброски: учебное пособие. – М.: МГУП, 2006. – 68 с.
30. Россия: речные бассейны / под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург: Изд-во «Аэрокосмоэкология», 1999. – 520 с.
31. Рыбное хозяйство водохранилищ: справочник / А.И. Исаев, Е.И. Карпова, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропроиздат, 1989. – 254 с.
32. Савичев О.Г., Базанов В.А., Скугарев А.А. Оценка допустимых сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты суши. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2006. – 82 с.
33. Савкин В.М. Эколого-географические изменения в бассейнах рек Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.
34. СниП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и водоснабжение. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 128 с.

35. Справочник по гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 240 с.
36. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс, 4-е изд., испр. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
37. Шарапов В.А. Влияние регулирования стока рек водохранилищами на природу и хозяйство районов в нижних бьефах / Вопросы географии, сб. 73. Водные ресурсы и их комплексное использование. – М.: Изд-во «Мысль», 1968. – С. 136–152.
38. Шварцев С.Л. Основы гидрогеологии. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
39. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учеб. для вузов. – В 2-х кн.: Кн. 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 367 с.
40. Яковлев С.В., Губий И.Г., Павлинова И.И., Родин В.Н. Комплексное использование водных ресурсов: учебн. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. – 384 с.

Приложение. Основные сведения из теории вероятностей и математической статистики

I. Событие. Под событием в теории вероятностей понимается любой факт, который может произойти или не произойти в результате опыта. Говорят, что события образуют полную группу, если произойдет хотя бы одно из них. События называются несовместными в данном опыте, если невозможно появление каких-либо двух из них, и равно-возможными, если ни одно из событий объективно не является более возможным, чем другое. Суммой нескольких событий называется событие, состоящее в появлении хотя бы одного из них, произведением нескольких событий – событие, заключающееся в совместном появлении всех событий.

II. Вероятность события. Вероятность события $P(A)$ – численная мера степени объективной возможности этого события, на практике характеризуется частотой (эмпирической вероятностью), то есть отношением числа опытов m , в которых данное событие A произошло, к общему числу опытов n .

$$P(A) = \frac{m}{n}. \quad (1)$$

Вероятность суммы несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (2)$$

Если события A_1, A_2, \dots, A_n образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей определяется выражением:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = 1. \quad (3)$$

Вероятность суммы совместных событий равна:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n). \quad (4)$$

В частности, для суммы двух совместных событий

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 A_2). \quad (5)$$

Вероятность события A , определяемая при условии, что имеет место событие B , называется условной вероятностью события A и обозначается $P(A/B)$. Вероятность произведения событий A_i ($i=1, 2, \dots, n$) и B определяется формулой полной вероятности

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) P(B|A_i). \quad (6)$$

Для независимых событий $P(A/B) = P(A)$ выполняется равенство

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (7)$$

Обобщением указанных выше правил является формула Байеса:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i)P(B|A_i)}. \quad (8)$$

Оценка вероятности дается либо в долях от единицы (от 0 до 1), либо в процентах (от 0 до 100 %). На практике для расчета эмпирической вероятности формулой (1) обычно не пользуются, так как при любом объеме выборки n всегда будет иметь место $P = 1$ (или 100 %), что является весьма грубой оценкой. Поэтому для лучшего приближения к теоретическому значению используется ряд формул (9–11), среди которых наиболее широкое распространение в ряде областей отечественной науки получила формула (9). Формула С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля:

$$P = \frac{m}{n+1}. \quad (9)$$

Формула Н.Н. Чегодаева:
$$P = \frac{m-0.3}{n+0.4}. \quad (10)$$

Формула А. Хазена:
$$P = \frac{m-0.5}{n}. \quad (11)$$

III. Случайная величина. Случайная величина – величина, которая в результате ряда опытов в одинаковых условиях может принять то или иное значение, причем не известно заранее, какое именно. Различают случайные величины дискретного (когда все возможные значения случайных величин можно перечислить заранее) и непрерывного (когда случайная величина может принять значение из некоторого интервала) типов.

IV. Закон распределения случайной величины. Случайная величина будет описана с вероятностной точки зрения, если указаны вероятности каждого события, то есть задан закон распределения случайной величины. Функция $\mathfrak{F}(x)$, определенная для всех x на действительной прямой как $\mathfrak{F}(x) = P(\xi < x)$, называется функцией распределения случайной величины ξ , при этом выполняются условия:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \mathfrak{F}(x) = 0, \quad (12)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \mathfrak{F}(x) = 1. \quad (13)$$

Существует большое количество функций распределения (характеристика наиболее важных из них приведена далее), среди которых исключительное значение имеет так называемое нормальное распреде-

ление. Это объясняется тем, что при большом объеме выборки n распределение суммы $\xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$ стремится к нормальному (центральная предельная теорема). Если функция распределения непрерывна и дифференцируема, то функция (14) называется плотностью распределения вероятностей:

$$f(x) = \frac{d\mathfrak{F}(x)}{dx}, \quad (14)$$

$$\mathfrak{F}(x) = P(\xi < x) = P(-\infty < \xi < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx. \quad (15)$$

Величина $f(x)dx$ называется элементом вероятности. График плотности распределения $f(x)$ называется кривой распределения. Основные свойства $f(x)$:

$$f(x) \geq 0, \quad (16)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, \quad (17)$$

Для дискретной случайной величины аналогичной плотности распределения характеристикой является ряд распределения (графически – многоугольник распределения). В статистических расчетах достаточно часто оперируют с вероятностью превышения (обеспеченностью) $F(x) = P(\xi > x)$, связанной с вероятностью $\mathfrak{F}(x)$ соотношением:

$$F(x) = 1 - \mathfrak{F}(x). \quad (18)$$

Эмпирическая обеспеченность находится по ряду, ранжированному по убыванию, эмпирическая вероятность – по ряду, ранжированному по возрастанию. Приведем краткое описание некоторых законов распределения вероятностей, нашедших широкое распространение в теории и практике расчетов регулирования стока.

Дискретные распределения

1. *Биномиальное распределение.* Если производится n испытаний, в которых возможно два несовместных события A и \bar{A} с вероятностями p и $1-p$, соответственно, то вероятность $P(\xi = m)$ того, что событие A наступит ровно m раз, определяется формулой

$$P(\xi = m) = C_n^m p^m (1-p)^{n-m}, \quad n \geq 1, \quad 0 < p < 1, \quad m = 0, \dots, n. \quad (19)$$

Функция биномиального распределения имеет вид

$$\mathfrak{F}(x) = \begin{cases} \sum_{m=1}^l C_n^m p^m (1-p)^{n-m}, & l < x \leq l+1 \\ 1, & x > n \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}. \quad (20)$$

Параметры биномиального распределения $\theta = np$, $D = np(1-p)$, $C_v = \sqrt{\frac{1-p}{np}}$.

2. *Распределение Пуассона.* В случае, когда каждый отдельный «успех» маловероятен и является редким событием в схеме Бернулли, при $n \rightarrow \infty$ и $np \sim \lambda$ допускается приближение

$$\boxed{\phantom{P(X=x) = \frac{\lambda^x \exp(-\lambda)}{x!}}}. \quad (21)$$

Функция распределения Пуассона запишется в виде

$$\mathfrak{F}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \sum_{m=0}^l \frac{\lambda^m \exp(-\lambda)}{m!}, & l < x \leq l+1 \end{cases} \quad (22)$$

Параметры распределения Пуассона $\lambda = \theta = D$, $C_v = C_s = \lambda^{-0.5}$.

Непрерывные распределения

1. *Равномерное распределение.* Случайная величина ξ имеет равномерное распределение на отрезке $[a, b]$ ($a < b$), если

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a, b] \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases} \quad (23)$$

Функция равномерного распределения:

$$\boxed{\phantom{f(x) = \frac{1}{b-a} \text{ for } x \in [a, b]}}}. \quad (24)$$

Параметры равномерного распределения $\theta = 0,5(a+b)$, $D = \frac{(b-a)^2}{12}$.

2. *Экспоненциальное (показательное) распределение.* Если случайная величина подчиняется закону распределения Пуассона, то вероятность того, что некоторое событие не произойдет, определяется по формуле (21) с параметром $m = 0$. Тогда вероятность противоположного события, состоящего в том, что это событие произойдет хотя бы раз, в пределе стремится к экспоненциальному

$$\mathfrak{F}(\xi < x) = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (25)$$

Плотность экспоненциального распределения:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \lambda \times \exp(-\lambda x), & x \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

Параметры экспоненциального распределения $\theta = \lambda^{-1}$, $D = \lambda^{-2}$.

3. *Нормальное и функциональные распределения.* При $n \rightarrow \infty$ и $np \rightarrow \infty$ имеет место асимптотическое приближение:

$$P(\xi = m) = C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \approx \frac{\exp(-\frac{y^2}{2})}{\sqrt{2\pi}} \Delta y, \quad (27)$$

где $y = \frac{m - pn}{\sqrt{np(1-p)}}$, $\Delta y = \frac{1}{\sqrt{np(1-p)}}$ ($-\infty < x < \infty$).

Другая запись формулы плотности нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\theta)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (28)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-\theta)^2}{2\sigma^2}\right) dx. \quad (29)$$

Нормальное распределение симметрично относительно математического ожидания, что обуславливает совпадение значений m_x , M_e и M_o .

Достаточно часто в геохимии, гидрогеологии и других науках используются функционально нормальные распределения, когда функция исследуемой величины подчиняется закону Гаусса. В частности, широкое распространение получило логнормальное распределение с заменой $y = \ln(x)$ и параметрами $\bar{y} = \ln(\bar{x}) - \frac{\sigma_x^2}{2}$, $\sigma_y^2 = \ln\left(\frac{\sigma_x^2}{\bar{x}^2} + 1\right)$. Возможно применение и других нормализующих преобразований.

4. *Распределение χ^2 («хи-квадрат»)*. Случайная величина, представляющая собой сумму нормально распределенных величин $\chi^2 = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$ с параметрами $\theta_\xi = 0$ и $\sigma_\xi = 1$ и числом степеней свободы n , подчиняется распределению χ^2

$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{\frac{n}{2}-1} \exp\left(-\frac{x}{2}\right), \quad 0 < x < \infty. \quad (30)$$

Параметры распределения χ^2 : $\theta = n$, $D = 2n$.

5. *Гамма-распределение*. Распределение χ^2 представляет собой случай гамма-распределения (распределения Пирсона III-го типа), плотность распределения которого имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{\beta^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} \exp(-\beta x), & x > 0 \end{cases}, \quad (31)$$

где $\Gamma(\lambda)$ -гамма-функция.

Гамма-функция достаточно часто появляется в тех случаях, когда рассматриваются суммы квадратов или квадратичные формы нормально распределенных случайных величин. Функция гамма-распределения определяется выражением (32):

$$F(x) = \frac{\beta^\lambda}{\Gamma(\lambda)} \int_{x_0}^{\infty} x^{\lambda-1} \exp(-\beta x) dx. \quad (32)$$

Параметры гамма-распределения $\lambda = \frac{4\mu_2^3}{\mu_3^2} = \frac{4}{Cs^2}$, $\beta = \frac{2\mu_2}{\mu_3} = \frac{2}{Cv \times Cs}$.

При $\lambda = \beta = Cv^{-2} Cs = 2Cv$. Кривая распределения Пирсона III типа широко используется во многих областях науки, однако при этом обладает существенным недостатком – при $Cs < 2Cv$ она уходит в область отрицательных значений, что в ряде случаев противоречит физической сущности исследуемых величин. Частично эта проблема решается путем введения новой переменной, в результате чего, например, получено распределение Крицкого-Менкеля. При этом новая переменная определяется равенством $y = ax^b$, параметры a и b подбираются так, что для средних значений выполняется $\bar{x} = a\bar{y}^b$.

6. *Распределение Стьюдента*. Если ξ – нормально распределенная случайная величина с $\theta = 0$ и $\sigma = 1$, и ζ – случайная величина, имеющая распределение χ^2 с числом степеней свободы n , то случайная величина $\eta = \frac{\xi}{\sqrt{\frac{\zeta}{n}}}$ подчиняется распределению Стьюдента. Плотность распределения Стьюдента:

$$f(x) = \frac{\Gamma(\frac{n+1}{2})}{\Gamma(\frac{n}{2})\sqrt{\pi n}} \left(1 + \frac{\eta^2}{n}\right)^{-\frac{1}{2}(n+1)}. \quad (33)$$

Параметры распределения Стьюдента: $\theta = 0$, $D = n/(n-2)$.

7. *Распределение Фишера-Снедекора*. Если ξ и ζ – независимые случайные величины с χ^2 -распределениями с числами степеней свободы n_1 и n_2 , то случайная величина $\eta = \frac{\xi \times n_2}{\zeta \times n_1}$ имеет распределение Фишера-Снедекора с плотностью вероятности:

$$\quad (34)$$

Параметры распределения Фишера-Снедекора:

$$\theta = \frac{n_2}{n_2 - 2}, \quad D = \frac{2n_2^2(n_1 + n_2 - 2)}{n_1(n_2 - 2)^2(n_2 - 4)}.$$

Закон распределения является исчерпывающей характеристикой случайной величины, однако в ряде случаев бывает достаточно указать числовые характеристики, выражающие некоторые существенные чер-

ты распределения случайной величины. В качестве таких характеристик рассматриваются моменты распределения различных порядков.

Начальным моментом $m_k[x]$ k -го порядка дискретной случайной величины ξ называют сумму:

$$m_k[\xi] = \sum_i x_i^k p_i, \quad (35)$$

где x_i – все возможные значения случайной величины, а p_i – соответствующие им вероятности. Для непрерывной случайной величины суммирование заменяется интегрированием

$$m_k[\xi] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx. \quad (36)$$

Первый начальный момент $m_1[x]$ называется *математическим ожиданием* случайной величины ξ и обозначается $M[\xi]$ или m_x . Математическое ожидание обладает следующими свойствами:

- 1) $M[1]=1$;
- 2) $M[c\xi]=cM[\xi]$, $c = const$;
- 3) для любых ξ_1 и ξ_2 с математическими ожиданиями M_1 и M_2 соответственно выполняется $M[\xi_1+\xi_2] = M_1+M_2$;
- 4) если ξ_1 и ξ_2 - независимые случайные величины, то $M[\xi_1\xi_2]=M_1M_2$.

Математическое ожидание является характеристикой положения случайной величины на числовой оси. При большом объеме выборки *среднее арифметическое*, рассчитываемое по формуле (37), будет сходиться к ее математическому ожиданию ($p_i \rightarrow n^{-1}$):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (37)$$

Иногда в целях получения лучшего соответствия закона распределения эмпирического ряда некоторым теоретическим схемам осуществляется преобразование исходной совокупности [Рождественский, Чеботарев, 1974]. Например, для преобразования ряда x_1, x_2, \dots, x_n в ряд $lg x_1, lg x_2, \dots, lg x_n$ среднее арифметическое m_{lgx} равно

$$m_{lgx} = \lg G = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n}. \quad (38)$$

Тогда величина G представляет собой *среднее геометрическое*.

$$G = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}, \quad x > 0. \quad (39)$$

Для преобразования ряда x_1, x_2, \dots, x_n в ряд $\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \dots, \frac{1}{x_n}$ со средним арифметическим $m_{1/x}$.

$$m_{1/x} = \frac{1}{H} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{n}. \quad (40)$$

H – среднее гармоническое.

$$H = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}. \quad (41)$$

Кроме математического ожидания случайной величины иногда используются и другие характеристики положения, в частности *мода* и *медиана* [Вентцель, 1969].

Медиана – характеристика центра группирования, которая равна значению члена ранжированного по убыванию или возрастанию ряда, занимающего среднее положение. Для ряда объемом $2m+1$ – $Me = x_{m+1}$, для ряда с объемом $2m$ – $Me = 0,5(x_m + x_{m+1})$.

Мода – наиболее вероятная (наиболее часто встречающаяся) величина в данном статистическом ряду, представляющая собой наибольшую ординату кривой распределения в случае одновершинного распределения. При наличии нескольких вершин кривая распределения будет иметь соответственно и несколько мод. Для одновершинных распределений, близких к симметричному, мода может быть приближенно рассчитана по формуле

$$Mo = \bar{x} + 3(Me - \bar{x}). \quad (42)$$

Центральным моментом $\mu_k[x]$ k -го порядка случайной величины ξ называют начальный момент k -го порядка центрированной случайной величины $\xi^* = \xi - m_x$:

$$\mu_k[\xi] = m_k[\xi^*] = M[(\xi - m_x)^k]. \quad (43)$$

Для дискретной случайной величины:

$$\mu_k[\xi] = \sum_i (x_i - m_x)^k p_i. \quad (44)$$

Для непрерывной случайной величины:

$$\mu_k[\xi] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^k f(x) dx. \quad (45)$$

Между начальными и центральными моментами существуют следующие соотношения:

$$\mu_2 = m_2 - m_1^2, \quad (46)$$

$$\mu_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3, \quad (47)$$

$$\mu_4 = m_4 - 4m_3m_1 + 6m_2m_1^2 - 3m_1^4. \quad (48)$$

Центральный момент 2-го порядка называется дисперсией и обозначается $D[\xi]$ или D_x . Дисперсия случайной величины служит мерой ее

рассеяния. Она характеризует разброс значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Дисперсия имеет размерность квадрата величины, поэтому в ряде случаев удобнее использовать другую характеристику рассеяния – среднее квадратическое отклонение σ (размерность величины)

$$\sigma = \sqrt{D_x}. \quad (49)$$

Сопоставление рядов с разными абсолютными значениями случайных величин удобно проводить с помощью коэффициента вариации C_v :

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}. \quad (50)$$

Дисперсия обладает следующими свойствами: 1) $D[1]=0$; 2) $D[c\xi]=c^2D[\xi]$, $c = const$; 3) для независимых случайных величин ξ_1 и ξ_2 с дисперсиями D_1 и D_2 , соответственно, выполняется $D[\xi_1+\xi_2]= D_1+D_2$ ($\sigma[\xi_1 + \xi_2] = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$).

В качестве других характеристик рассеивания (изменчивости) используются амплитуда (размах) A , среднее абсолютное отклонение d и вероятное отклонение Δ

$$A = x_{max} - x_{min}, \quad (51)$$

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}, \quad (52)$$

$$\Delta = 0.5(x_{25} - x_{75}), \quad (53)$$

где x_{25} и x_{75} – первая и третья квартили (квартили - значения величин в ранжированном по убыванию ряду, делящие выборку на 4 равных части; более общей характеристикой является квантиль – характерное значение величины заданной вероятности). Для условий нормального распределения имеют место следующие соотношения:

$$d = \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0.8\sigma, \quad (54)$$

$$\Delta = 0,674\sigma. \quad (55)$$

Рассмотренные меры положения и рассеяния не полностью описывают свойства статистических рядов. В качестве характеристики асимметричности распределения используется коэффициент асимметрии C_s :

$$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (56)$$

Для характеристики степени сглаженности (островершинности) рассматриваемого распределения, по сравнению с нормальным, используется коэффициент эксцесса ε . Уклонение этого параметра от нуля

свидетельствует об имеющихся отличиях:

$$\varepsilon = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (57)$$

Для системы случайных величин, также как и для одной случайной величины, в качестве числовых характеристик используются начальные и центральные моменты распределения. Начальным моментом m_{k_1, k_2, \dots, k_n} порядка $k_1 + k_2 + \dots + k_n$ системы n случайных величин $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ называется математическое ожидание произведения $\xi^{k_1} \times \xi^{k_2} \times \dots \times \xi^{k_n}$:

$$m_{k_1, k_2, \dots, k_n} = M[\xi^{k_1} \xi^{k_2} \dots \xi^{k_n}]. \quad (58)$$

Центральным моментом $\mu_k[x]$ порядка $k_1 + k_2 + \dots + k_n$ системы n случайных величин $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ называется математическое ожидание произведения центрированных величин:

$$\mu_{k_1, k_2, \dots, k_n} = M[\prod_{i=1}^n (\xi - m_x)^{k_i}]. \quad (59)$$

Второй смешанный момент системы двух случайных величин, определяемый по формуле (45), называется корреляционным моментом или ковариацией (согласно (45), дисперсию можно рассматривать как корреляционный момент случайной величины с самой собой):

$$\mu_{1,2} = \text{cov}(x, y) = M[(\xi - m_x)(\eta - m_y)]. \quad (60)$$

Для независимых случайных величин $\text{cov}(x, y) = \mu_1[\xi]\mu_1[\eta] = 0$. Величина r_{xy} называется коэффициентом корреляции случайных величин ξ и η :

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (61)$$

Для независимых случайных величин $r_{xy} = 0$. Это необходимое условие независимости, но недостаточное. Для расчетов коэффициента корреляции удобно использовать формулу:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)}}. \quad (62)$$

В тех случаях, когда требуется оценить внутрирядную связь (для временных рядов), для вычисления коэффициента автокорреляции используется формула:

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+\tau} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x}_1)^2 \times \sum_{i=\tau}^n (x_i - \bar{x}_2)^2}}, \quad (63)$$

где $\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} x_i}{n-\tau}$, $\bar{x}_2 = \frac{\sum_{i=\tau}^n x_i}{n-\tau}$.

В целом вид зависимости для определения коэффициента корреляции зависит от закона распределения случайной величины. В частности, формула (63) получена для нормально распределенных величин. При изучении статистических рядов с другими распределениями расчетные формулы значительно усложняются, поэтому на практике этот факт либо игнорируется (что не корректно, особенно при небольшом объеме выборки), либо используются аппроксимационные функции.

Перечисленные выше статистики являются точечными оценками (определяются одним числом) и должны удовлетворять требованиям состоятельности, несмещенности и эффективности:

- 1) состоятельной называется оценка, стремящаяся по вероятности к оцениваемому параметру с увеличением объема выборки;
- 2) несмещенной называется оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемому параметру при любом объеме выборки;
- 3) эффективной называется оценка, обладающая минимальной дисперсией при фиксированном числе наблюдений.

Выборочные дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициенты вариации и асимметрии, полученные по формулам (46, 49, 50, 56), представляют собой смещенные оценки, смещенность которых частично устраняется при введении множителя $n/(n-1)$ при расчете дисперсии и использовании формулы (65) при вычислении C_s :

$$D = \frac{n}{n-1} D_s, \quad (64)$$

$$C_s = (1 + \frac{8.5}{n}) C_{s_s}, \quad (65)$$

где D_s и C_{s_s} – смещенные выборочные оценки.

Для оценивания статистик используют следующие методы: 1) метод моментов; 2) графический метод и его модификации (с использованием клетчаток вероятностей определенного распределения); 3) метод наибольшего правдоподобия (на практике используются номограммы для конкретного распределения). В некоторых случаях для получения приближенных оценок параметров статистического ряда возможны аппроксимации вида (55–56), полученные из первых членов разложения функции $\psi(\xi)$ в ряд Тейлора:

$$M[\psi(\xi)] \approx \psi(m[\xi]) + 0.5\psi''(m[\xi])D, \quad (66)$$

$$D[\psi(\xi)] \approx \{\psi'(m[\xi])\}^2 D. \quad (67)$$

Например, при $\psi(\xi) = \xi^a$ $M[\xi^a] \approx m_x^a$, $\sigma[\xi^a] \approx |a| \sigma m_x^{a-1}$.

Вследствие случайности выборок точечные оценки также имеют случайный характер. При изменении выборки значение статистик варьирует в некотором диапазоне со средним квадратическим отклонением («стандартная ошибка»):

1) для среднего арифметического при отсутствии внутрирядной связанности

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (68)$$

при наличии внутрирядной связанности

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1 + \frac{2r}{n(1-r)} \left(n - \frac{1-r^n}{1-r}\right)}{1 - \frac{2r}{n(n-1)(1-r)} \left(n - \frac{1-r^n}{1-r}\right)}}; \quad (69)$$

при небольших коэффициентах автокорреляции ($r < 0.5$) вместо формулы (69) допускается применение зависимости

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}}; \quad (70)$$

2) для коэффициента вариации C_v при отсутствии внутрирядной связанности

$$\sigma_{C_v} = \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + C_v^2}; \quad (71)$$

при наличии внутрирядной связанности в случае $C_s = 2C_v$

$$\sigma_{C_v} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2} \left(1 + \frac{3C_v \times r^2}{1+r}\right)}; \quad (72)$$

3) для коэффициента асимметрии при $C_s = 2C_v$ и отсутствии внутрирядной связанности

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n} (1 + C_v^2)}; \quad (73)$$

4) для коэффициента корреляции (формула Романовского)

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}} \sqrt{1 + \frac{11r^2}{2n} + \frac{75r^2 - 13}{2n^2}}; \quad (74)$$

при $n > 25$ допускается использование зависимости

$$\sigma_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (75)$$

В практике статистических расчетов, кроме точечных оценок, широкое распространение получили интервальные оценки параметров генеральной совокупности, являющиеся более информативными характеристиками, поскольку содержат в себе точность и надежность оценки. Пусть получена выборочная оценка Π^* параметра Π генеральной сово-

купности. Точность выборочной оценки тем выше, чем меньше модуль $|П-П^*|$. Если имеется число δ , характеризующая точность оценки, то с *доверительной вероятностью* β можно говорить о том, что условие $|П-П^*| < \delta$ выполняется, или $P\{|П-П^*| < \delta\} = \beta$.

Доверительная вероятность задается самим исследователем. Обычно используются значения β , равные 0,950; 0,990; 0,999 (или 95 %; 99 %; 99,9 %). Величину $\alpha = 1 - \beta$, определяющую вероятность того, что истинное значение оказалось за пределами доверительного интервала, называют *уровнем значимости*. Процедура получения интервальных оценок обычно базируется на знании закона распределения случайной величины.

Если случайная величина подчиняется нормальному закону распределения и известно значение дисперсии σ^2 генеральной совокупности, то доверительный интервал для среднего арифметического определяется выражением:

$$\left(\bar{x} - Z_{\frac{1+\beta}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \theta < \bar{x} + Z_{\frac{1+\beta}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \quad (76)$$

где $Z_{\frac{1+\beta}{2}}$ – квантиль нормального распределения (в частности, для $\beta=0.95$ $Z_{\frac{1+\beta}{2}} = 1.96$), θ – среднее арифметическое генеральной совокупности, а \bar{x} – его выборочная оценка. Если дисперсия генеральной совокупности неизвестна, то доверительный интервал для σ определяется условием

$$P\left\{ \sqrt{n-1} \frac{s}{b} \leq \sigma \leq \sqrt{n-1} \frac{s}{a} \right\} = \beta, \quad (77)$$

где s^2 – выборочная оценка дисперсии, a и b – квантили «хи-квадрат»-распределения с числом степеней свободы $(n-1)$. Например, для $\beta=0.95$ $a^2 = \chi_{0.025}^2(n-1)$, $b^2 = \chi_{0.975}^2(n-1)$.

Доверительный интервал для случая, когда случайная величина подчиняется нормальному закону и известны только выборочные оценки \bar{x} и s , границы доверительного интервала определяются следующим образом: 1) границы доверительного интервала (θ_l, θ_r) для среднего арифметического при $\beta = 0.95$

$$\theta_l = \bar{x} + t_{0.025} \frac{s}{\sqrt{n}} ; \theta_r = \bar{x} + t_{0.975} \frac{s}{\sqrt{n}} ; \quad (78)$$

2) границы доверительного интервала (σ_l, σ_r) для среднего квадратического отклонения при $\beta=0.95$

$$\sigma_l = \sqrt{n-1} \frac{s}{\chi_{0.975}^2}; \quad \sigma_r = \sqrt{n-1} \frac{s}{\chi_{0.025}^2}, \quad (79)$$

где t_p – p -квантиль распределения Стьюдента с $(n-1)$ степенями свободы, $p = 0,025, 0,975$; χ_p^2 – p -квантиль распределения «хи-квадрат» с $(n-1)$ степенями свободы, $p = 0,0025, 0,975$. Тогда с доверительной вероятностью β выполняется условие $\theta_l \leq \theta \leq \theta_r$, и с той же вероятностью – $\sigma_l \leq \sigma \leq \sigma_r$ (но это не значит, что эти условия выполняются с вероятностью β^2).

В ряде случаев доверительный интервал можно построить, не затрагивая исходного распределения. Пусть k_p – квантиль уровня p функции распределения $\mathfrak{F}(x)$ ($\mathfrak{F}(x)=p$). Интервал (x_{ll}, x_{rr}) для $ll < rr$ является свободным от распределения доверительным интервалом с коэффициентом доверия $I_p(ll, n-2+1) - I_p(rr, n-rr+1)$. Значения $I_p(u, v)$ содержатся в таблицах неполной бета-функции.

Оглавление

Введение	3
Глава I. Основные сведения о регулировании стока и водохранилищах	4
1.1. Общая характеристика водопользования и водопотребления	4
1.2. Необходимость регулирования речного стока	9
1.3. Основные понятия о регулировании стока и водохранилищах	10
1.4. Классификация водохранилищ	16
1.4.1. Классификация по видам регулирования	16
1.4.2. Классификация по размеру водохранилища	21
1.4.3. Классификация по генезису	22
1.4.4. Классификация по местоположению	24
1.4.5. Классификация по конфигурации	24
1.4.6. Классификация по водообмену	25
1.4.7. Гидрохимическая классификация	25
1.4.8. Гидробиологическая классификация	25
1.5. Водоохранилища мира и России	27
Глава 2. Общая методика расчета водохранилищ	29
2.1. Гидрологические данные	29
2.2. Топографические данные	32
2.3. Общая характеристика методов расчета	34
2.4. Расчеты к обоснованию основных параметров водохранилища и режима его эксплуатации	39
2.5. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности	40
Глава 3. Заиление водохранилищ	41
Глава 4. Потери воды из водохранилищ	44
4.1. Потери воды на испарение	44
4.2. Потери воды на фильтрацию	49
4.2.1. Фильтрация воды под плотиной	49
4.2.2. Способы построения гидродинамических сеток	54
4.2.3. Фильтрация воды в обход плотины	57
4.2.4. Фильтрация из водохранилищ	58
4.3. Потери воды на шлюзование	62
4.4. Потери воды на ледообразование	63
Глава 5. Сезонное (годовое) регулирование стока	64
5.1. Обобщенные методы расчета регулирования стока	65
5.2. Расчеты регулирования по интегральным кривым стока	67
5.3. Табличные водохозяйственные расчеты по календарному	

стоковому ряду	70
5.4. Методы расчета сезонного регулирования стока на переменную водоотдачу по диспетчерским правилам	72
Глава 6. Многолетнее регулирование стока	75
6.1. Расчеты многолетнего регулирования обобщенными методами теории вероятностей и математической статистики	76
6.2. Расчеты многолетнего регулирования по интегральной кривой стока	77
6.3. Табличные водохозяйственные расчеты многолетнего регулирования по календарному стоковому ряду	80
6.4. Диспетчерские графики при многолетнем регулировании стока и принципы их построения	81
Глава 7. Каскадное регулирование стока	82
Глава 8. Регулирование стока паводков и паводков	84
Глава 9. Эксплуатация водохранилищ	87
9.1. Мероприятия, осуществляемые при создании и эксплуатации водохранилищ	87
9.2. Организация эксплуатации водохранилищ	88
Глава 10. Водоохранилища и окружающая природная среда	90
10.1. Некоторые особенности водохранилищ как природно-техногенных объектов	90
10.2. Разбавление сточных вод в водохранилищах	93
10.2.1. Расчет начального и основного разбавления по методу М.А. Руффеля	94
10.2.2. Расчет общего разбавления по методу Н.Н. Лапшева	95
10.2.3. Расчет общего разбавления на основе аналитического решения уравнения диффузии	96
10.3. Воздействие водохранилищ на природную среду прилегающих территорий	97
10.4. Зоны влияния водохранилищ на окружающую среду и хозяйственную деятельность	100
Список литературы	103
Приложение. Основные сведения из теории вероятностей и математической статистики	106

Учебное издание

САВИЧЕВ Олег Геннадьевич
КРАСНОЩЁКОВ Сергей Юрьевич
НАЛИВАЙКО Нина Григорьевна

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Учебное пособие

Научный редактор, доктор наук *О.Г. Савичев*
Редактор *Е.О. Фукалова*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 06.08.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурока».


Печать RISO. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л.

Заказ . Тираж 50 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

