

В.М. САКОВИЧ

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российский государственный гидрометеорологический университет



В. М. Сакович

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Практическое пособие

УДК 556.18:626/627(076)

ББК 26.222.07я73

C15

Рецензент:

Сольский Станислав Викторович, доктор технических наук, профессор
(Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
имени Б. Е. Веденеева)

Сакович, Владимир Михайлович.

C15 Водное хозяйство и регулирование речного стока : практическое пособие /
В. М. Сакович; М-во науки и высшего образования Российской Федерации,
Российский гос. гидрометеорологический ун-т. — Казань : Бук, 2024. — 104 с. —
Текст : электронный.

ISBN 978-5-907839-85-4.

Даются подробные рекомендации по выполнению практических расчетных и расчетно-графических работ, которые выполняются студентами магистратуры Направления подготовки 05.04.05 Прикладная гидрометеорология, направленность (профиль) «Инженерная гидрология и рациональное использование водных ресурсов». Методические указания предназначены студентам-гидрологам.

Могут использоваться студентами других направлений подготовки при изучении дисциплин из области водного хозяйства и водохозяйственных расчетов.

УДК 556.18:626/627(076)

ББК 26.222.07я73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практическое пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Водное хозяйство и регулирование речного стока», которую изучают студенты, обучающиеся в магистратуре по направлению подготовки 05.04.05 Прикладная гидрометеорология, направленность (профиль) «Инженерная гидрология и рациональное использование водных ресурсов».

Целью освоения дисциплины «Водное хозяйство и регулирование речного стока» является подготовка специалистов, владеющих знаниями, необходимыми для решения задач по обеспечению водными ресурсами хозяйственной, бытовой и социальной сфер деятельности человека, обладающих компетенциями позволяющими самостоятельно решать задачи по обоснованию основных параметров водохранилищ и гидроэлектростанций, определению характеристик зарегулированного водного режима рек и водохранилищ, обеспечению безопасности гидротехнических сооружений, выработке правил управления водными ресурсами в условиях многоцелевого их использования. При изучении дисциплины, студенты осваивают теоретический материал, а также практические методы и приемы инженерных расчетов в области водохозяйственного и гидроэнергетического проектирования.

Задачей практической части дисциплины «Водное хозяйство и регулирование речного стока» является освоение студентами основных методов водохозяйственных и водноэнергетических расчетов, а именно: разработки водохозяйственных балансов речных бассейнов; регулирования речного стока с определением основных параметров водохранилища и характеристик зарегулированного водного режима; определения и обоснования параметров энергоотдачи гидроэлектростанций; расчета пропуска половодий и паводков через водохранилища.

Практическое пособие подготовлено с ориентацией на возможность самостоятельного выполнения практических заданий в условиях дистанционного формата обучения, а также на его использование студентами заочной формы обучения.

В пособие дается содержание, последовательность и подробное пошаговое описание производимых расчетов. Все практические работы содержат описание цели и задач работы, перечень необходимых исходных данных, требования к содержанию теоретической ча-

сти, расчетную часть с необходимыми иллюстрациями и заключение (результаты).

Перед выполнением расчетной части студенты должны проработать определенные разделы теории и ответить на контрольные вопросы. В конце пособия приводится список литературы, необходимой для изучения настоящей дисциплины.

Для каждой работы предусматривается индивидуальный вариант исходных данных, по которому студент выполняет расчет.

1. Разработка водохозяйственного баланса речного бассейна

Цель работы: освоить методику расчета водохозяйственного баланса речного бассейна и анализа результатов расчета.

Задачи: 1) Рассчитать водохозяйственный баланс реки в расчетном створе для двух характерных по водности лет: крайне маловодного года обеспеченностью 95 % по величине годового стока и среднего по водности года.

При расчете используются условные значения основных хозяйственных составляющих в приходной и расходной частях баланса;

2) Установить периоды (сезоны) избытков и дефицита стока, вычислить величину дефицитов и определить основные причины их возникновения;

3) Сделать вывод (дать рекомендацию) о возможных гидролого-водохозяйственных мероприятиях, которые позволят ликвидировать или уменьшить выявленный дефицит стока. *Например, рекомендовать изменение режима наполнения и сброски водохранилища или изменение величины полезного объема водохранилища; изменение режима или полный отказ от переброски стока в другой речной бассейн, осуществление мероприятий по переброске стока из других речных бассейнов и т.п.*

Исходные данные:

1) Значения среднемесячных расходов воды ($Q_{j,i}$, м³/с) в расчетном створе за репрезентативный период продолжительность N водохозяйственных лет в табличном виде (табл. 1.1, графы 1–14). Данные о стоке реки в расчетном створе сгруппированы по водохозяйственным годам.

Продолжительность периода N в учебном задании ограничивается 10–13 годами.

2) Значения основных хозяйственных составляющих приходной и расходной частей водохозяйственного баланса за каждый месяц года (W_j , млн. м³) в табл. 1.2. *(В учебном задании используются условные численные значения хозяйственных составляющих баланса).*

3) Величина полезного объема водохранилища ($V_{плз.}$) указана в заголовке к табл. 1.2.

4) Расчетная обеспеченность (P %), устанавливающая условия по водности года, по которому производится при расчет водохозяй-

ственного баланса.

Река, створ и N -летний период рассматриваются как вариант учебного задания. Расчетная обеспеченность, значения хозяйственных составляющих баланса и размер полезного объема водохранилища определяют дополнительные условия при расчете водохозяйственного баланса для конкретного варианта.

Общие положения к выполнению работы

Работа состоит из трех последовательных частей и заключения.

В первой части (теоретической) дается краткое описание понятия «водохозяйственный баланс» и принципов его расчета.

Во второй части (подготовительной) осуществляется подготовка данных для расчета водохозяйственного баланса. Производится обработка исходных данных о речном стоке, вычисляются значения расходных и приходных составляющих водохозяйственного баланса, которые в исходных данных не приведены: режим наполнения и сработки водохранилища, отдача воды ниже расчетного створа (комплексный попуск).

В третьей, (расчетной), части работы осуществляется расчет водохозяйственного баланса речного бассейна для двух различных по водности лет. Расчет осуществляется при первоначально заданном режиме наполнения–сработки водохранилища. Результаты расчета анализируются и, при наличии сезонных дефицитов речного стока, предлагается второй вариант водохозяйственного баланса, в котором, за счет изменения режима наполнения–сработки водохранилища достигается ликвидация или, по крайней мере, уменьшение выявленных дефицитов располагаемых водных ресурсов. Во втором варианте баланса для уменьшения или ликвидации дефицитов кроме изменения режима наполнения–сработки водохранилища, на основании сделанного анализа возможно также предложить изменение величины полезного объема водохранилища и сделать соответствующий расчет.

В заключении приводятся результаты расчета и анализа водохозяйственного баланса получившиеся при первоначальном и откорректированном втором вариантах режима регулирования стока. При сохранении дефицита стока, делаются выводы о том, какие дополнительные гидролого-водохозяйственные мероприятия можно осуществить для окончательной ликвидации установленного дефицита стока.

Образец-макет работы с расчетными таблицами приводится в конце раздела 1.

Последовательность выполнения работы

1.1. Понятие «водохозяйственный баланс» и принципы его расчета. (Теоретическая часть)

Для выполнения теоретической части работы необходимо изучить литературу, а также использовать материалы лекционных и практических занятий. В учебнике [1], раздел 5.1, даны основные теоретические сведения необходимые для выполнения практического задания. Наиболее полная информация о методике расчета водохозяйственного баланса содержится в [5].

В теоретической части работы рекомендуется дать определение понятия «водохозяйственный баланс», указать цели его расчета и условия водности, расчетные интервалы времени, для которых рассчитывается баланс; привести общий вид уравнения баланса; перечислить основные составляющие приходной и расходной частей баланса и используемые единицы измерения; перечислить виды балансов; описать возможные варианты результатов расчета и т.д.

1.2. Подготовка данных для расчета водохозяйственного баланса

В этой части работы производится расчет значений приходных и расходных составляющих водохозяйственного баланса, сведения о которых отсутствуют в исходных данных.

1.2.1. Вычисление естественного стока реки в расчетном створе в условиях средней водности и остромаловодных условиях обеспеченностью $P = 95 \%$

Последовательность вычислений:

1) По исходным данным о среднемесячных расходах воды вычисляется среднегодовой расход (Q_i) за каждый водохозяйственный год и формируется ряд среднегодовых расходов продолжительностью N лет (графа 15 табл. 1.1).

Для каждого месяца вычисляется средний месячный расход за N -летний период ($Q_{j,ср.}$ – строка «Средний» табл. 1.1) и делается выборка наибольшего ($Q_{j,нб.}$ – строка «Наибольший» табл. 1.1) и наимень-

шего среднемесячных расходов ($Q_{j, \text{нм}}$ – строка «Наименьший» табл. 1.1).

2) По ряду среднегодовых расходов (графа 15 табл. 1.1) методом моментов определяются основные статистические характеристики годового стока реки в расчетном створе (табл. 1.3):

$Q_{\text{ср.мн.}}$ – средний многолетний расход за расчетный период N лет;

Cv – коэффициент вариации годового.

Для оценки асимметрии ряда годового стока принимается соотношение $Cs = 2Cv$.

(В учебной работе, из-за нецелесообразности расчета коэффициента асимметрии Cs по очень короткому ряду, используется наиболее характерное для годового стока больших и средних рек России соотношение коэффициентов Cs и Cv).

3) Определяется модульный коэффициент годового стока ($k_{p\%}$) заданной расчетной обеспеченности $P = 95 \%$ и затем вычисляется средний годовой расход заданной расчетной обеспеченности $Q_{95\%}$. *(В учебном задании расчет ведется для остромаловодных условий обеспеченностью $P = 95 \%$. При расчетах для других условий по водности вычисляется расход другой обеспеченности, обычно $P = 50 \%$, $P = 75 \%$, $P = 95 \%$ [5]).*

Для определения модульного коэффициента $k_{95\%}$ и, соответственно, расхода $Q_{95\%}$ используются таблицы трехпараметрического гамма-распределения (распределение Крицкого–Менкеля) или таблицы распределения Пирсона III-го типа [6].

4) Для расчета водохозяйственного баланса в условиях различной водности выбираются два года-модели: средний по водности год и крайне маловодный год.

Выбор модели среднего по водности года осуществляется по значениям среднегодовых расходов (графа 15 табл. 1.1). Выбирается год со среднегодовым расходом (Q_i) близким к среднему многолетнему расходу ($Q_{\text{ср.мн.}}$). В качестве модели маловодного года выбирается год со среднегодовым расходом (Q_i) наиболее близким к годовому расходу расчетной обеспеченности ($Q_{95\%}$).

Выбираемые годы используются в качестве моделей, отражающих особенности внутригодового распределения стока в среднем по водности году и маловодном году. Поэтому, если при выборе моделей, несколько лет имеют среднегодовой расход близкий к среднему многолетнему $Q_{\text{ср.мн.}}$ или к расходу расчетной обеспеченности $Q_{95\%}$, то в качестве модели целесообразно выбрать год с наиболее неравно-

мерным внутригодовым распределением стока.

5) По выбранному году-модели, с водностью близкой к средней многолетней (в примере это 1994–1995 в/х год), вычисляются объемы естественного притока речных вод к расчетному створу за каждый месяц водохозяйственного года и за год в целом (табл. 1.4). (В учебном задании, для условий средней водности, расчет водохозяйственного баланса ведется по фактическому году-модели, без приведения стока к обеспеченности $P=50\%$).

В строке 1 табл. 1.4 приводятся среднемесячные (Q_j) и среднегодовой (Q_i) расходы воды выбранного года-модели из таблицы исходных данных. В строку 2 табл. 1.4 занесены вычисленные объемы стока за каждый месяц водохозяйственного года (W_j) и за год в целом (W_i).

Объем речного стока за год вычисляется по формуле:

$$W_i = 31,56Q_i, \quad (1.1)$$

где W_i – объем стока за год, в млн. м³; Q_i – средний годовой расход воды в расчетном створе, в м³/с; 31,56 – количество миллионов секунд в году, в млн. сек.

Объем речного стока за каждый месяц вычисляется по формуле

$$W_j = 2,63Q_j, \quad (1.2)$$

где W_j – объем стока за j -ый месяц, в млн. м³; Q_j – средний за месяц расход воды в расчетном створе, в м³/с; 2,63 = 31,56/12 – среднее количество миллионов секунд в месяце, в млн. сек.

Правильность вычислений рекомендуется проверить по сумме объемов стока за 12 месяцев, которая должна равняться объему годового стока: $W_i = \sum_{j=1}^{12} W_j$.

6) По выбранному маловодному году-модели (в примере это 1992–1993 в/х год) вычисляются месячные и годовой объемы естественного притока речных вод к расчетному створу в условиях низкой водности (табл. 1.5).

Для остромаловодных условий объемы месячного и годового притока вычисляются с приведением фактического стока года-модели к заданной расчетной обеспеченности ($P = 95\%$) (табл. 1.5).

В строке 1 табл. 1.5 записаны фактические среднемесячные (Q_j) и среднегодовой (Q_i) расходы воды выбранного года-модели из табли-

цы исходных данных. В строке 2 таблицы 1.5 записаны приведенные к расчетной обеспеченности среднемесячные ($Q_{j,пр.}$) и приведенный среднегодовой ($Q_{i,пр.}$) расходы воды.

Для приведения к расчетной обеспеченности, расходы Q_j и Q_i из строки 1 умножаются на коэффициент приведения $K_{пр.}$:

$$Q_{j,пр.} = Q_j K_{пр.} \quad \text{и} \quad Q_{i,пр.} = Q_i K_{пр.}$$

Коэффициент приведения вычисляется по формуле:

$$K_{пр.} = \frac{Q_{P\%}}{Q_{i,м}}, \quad (1.3)$$

где $Q_{P\%}$ – среднегодовой расход заданной расчетной обеспеченности (см. пункт 1.3); $Q_{i,м}$ – среднегодовой расход маловодного года, взятого в качестве модели.

Значение коэффициента $K_{пр.} = 556/639 = 0,89$ указывается в заголовке таблицы 1.5.

Строка 3 таблицы 1.5 содержит значения объемов стока за каждый месяц маловодного года ($W_{j,95\%}$) и за весь год ($W_{i,95\%}$), приведенные к расчетной обеспеченности $P = 95 \%$. Эти объемы стока вычисляются по формулам (1.1) и (1.2) и расходам воды приведенным к расчетной обеспеченности из строки 2 табл. 1.5.

1.2.2. Расчет значений приходной и расходной составляющих водохозяйственного баланса, связанных с работой водохранилища

Определение ежемесячных объемов речного стока используемых для наполнения водохранилища и отдаваемых из него в первоначальном варианте водохозяйственного баланса осуществляется по принятым для учебного задания условным правилам наполнения и сработки полезного объема водохранилища. Эти правила приняты едиными для среднего по водности года и для маловодного года.

Величина полезного объема водохранилища ($V_{плз.}$) указана в табл. 1.2 с исходными данными к учебному заданию.

В первоначальном варианте баланса наполнение и сработка водохранилища осуществляется по следующим правилам:

1) Весь полезный объем полностью заполняется в период многоводной фазы (половодье) и полностью сбрасывается в период маловодной фазы (межень) водохозяйственного года.

Календарные сроки многоводной и маловодной фаз стока устанавливаются при анализе особенностей внутригодового распределения стока в расчетных годах-моделях по данным табл. 1.4 и 1.5.

К многоводной фазе относится непрерывный весенне-летний период в начале водохозяйственного года, когда средние месячные расходы превышают или равны среднегодовому расходу ($Q_j \geq Q_i$);

К маловодной фазе относится весь меженный период от начала летне-осенней межени, когда средние месячные расходы стали меньше среднегодового расхода ($Q_j < Q_i$), и до конца зимней межени, включая период осенних паводков.

Рекомендация. Если, в месяц перехода от многоводной фазы к маловодной, расход формально меньше среднегодового, но численно достаточно близок к нему, то такой месяц целесообразно отнести к многоводному периоду. Т. е. отклонение в пределах 15–20 % оценивается как приблизительное равенство расходов и меженный период следует выделять со следующего более явно выраженного маловодного месяца.

2) Режим наполнения водохранилища задается в зависимости от продолжительности многоводной фазы в расчетном году.

При длительности многоводной фазы 2 месяца:

50 % $V_{\text{плз}}$. заполняется в первый месяц и

50 % $V_{\text{плз}}$. во второй месяц половодья.

При длительности многоводной фазы 3 месяца:

30 % $V_{\text{плз}}$. заполняется в первый месяц,

50 % $V_{\text{плз}}$. во второй месяц и

20 % $V_{\text{плз}}$. в третий месяц половодья.

При длительности многоводной фазы 4 и более месяцев:

30 % $V_{\text{плз}}$. заполняется в первый месяц,

40 % $V_{\text{плз}}$. во второй месяц,

30 % $V_{\text{плз}}$. в третий месяц и

0 % $V_{\text{плз}}$. в четвертый и последующие месяцы многоводного периода.

Объемы речного стока, используемые для наполнения водохранилища ($W_{\text{нап.}j}$), относятся к расходным составляющим водохозяйственного баланса.

3) Сработка водохранилища осуществляется в следующем режиме: весь полезный объем водохранилища сбрасывается равномерно в течение маловодной фазы.

В соответствии с этим положением правил величина отдачи воды из водохранилища для каждого месяца межлетнего периода ($W_{отд,j}$) вычисляются по формуле

$$W_{отд,j} = \frac{V_{плз.}}{n_M},$$

где n_M – число месяцев в межленном периоде рассматриваемого расчетного года.

Объемы воды, отдаваемые из водохранилища при его сработке ($W_{отд,j}$), относятся к приходным составляющим водохозяйственного баланса.

Рассчитанные объемы наполнения и сработки водохранилища в среднем по водности году и в крайне маловодном году приведены в табл. 1.6.

В рассматриваемом примере для среднего по водности года (1994/95 в/х год) продолжительность многоводной фазы составила 2 месяца, для маловодного года (1992/93 в/х год) – 3 месяца. Для сработки водохранилища и в том и в другом году принят период продолжительностью 9 месяцев (с августа по апрель). В среднем по водности году в июле месяце водохранилище уже не наполнялось, т.к. было полностью заполнено за май-июнь, но еще и не срабатывалось, т.к. июль был относительно многоводный и явно выраженный межлетний период начался с августа.

В дальнейшем, при анализе результатов расчета водохозяйственного баланса, первоначально установленный режим наполнения–сработки водохранилища корректируется с целью ликвидации или минимизации выявленных дефицитов стока (второй вариант баланса).

1.2.3. Расчет комплексного попуска ниже расчетного створа

В учебном задании комплексный попуск, т. е. транзитный сток отдаваемый нижнего расчетного створа, определяется объемами воды, обеспечивающими санитарно-экологическое состояние реки ниже расчетного створа и объемами воды необходимыми для обеспечения условий судоходства (навигационный попуск).

Ежемесячные объемы воды санитарно-экологического попуска ($W_{j,c-э}$) принимаются в соответствии с рекомендациями для экологи-

ческих попусков ниже створов гидроузлов (с поправками для учебного задания) по следующим правилам:

1) Месячные объемы отдачи воды ниже расчетного створа, необходимые для соблюдения санитарно-экологических требований, определяют по данным о стоке реки в крайне маловодный год расчетной обеспеченности 95 %, т. е. по значениям стока модельного маловодного года, приведенным к обеспеченности 95 %, ($W_{j,95\%}$ из строки 3 табл. 1.5)

2) В месяцы многоводной фазы объем санитарно-экологического попуска ($W_{j,c-3}$ в строке 3 таблицы 1.7) принимается в размере 75 % от объема естественного стока маловодного года, приведенного к 95%-ной обеспеченности (строка 1 табл. 1.7), но не больше 50 % от среднего многолетнего объема стока соответствующего месяца $W_{j,ср.мн}$ (строка 2 табл. 1.7);

Значение $W_{j,ср.мн}$ вычисляется по формуле (1.2) и среднему многолетнему расходу за j -ый месяц, ($Q_{j,ср.мн}$ из строки «Средний» табл. 1.1).

3) Для каждого месяца маловодной фазы объем санитарно-экологического попуска ($W_{j,c-3}$ в строке 3 табл. 1.7) принимается равным среднему за маловодный период объему месячного стока в маловодном году 95 %-ной обеспеченности, т. е. среднему из значений $W_{j,95\%}$ в строке 3 табл. 1.5 за месяцы маловодной фазы.

Принцип выделения в году многоводной и маловодной фаз изложен в пункте 1.2.2.

Вычисленные по этим правилам объемы санитарно-экологического попуска ($W_{j,c-3}$) заносятся в строку 3 табл. 1.7.

Значения ежемесячных объемов воды навигационного попуска ($W_{j,нав.}$) даны в исходных данных (табл. 1.2) и заносятся в табл. расчета комплексного попуска (строка 4 табл. 1.7).

Значения объемов комплексного попуска на каждый месяц ($W_{j,кп}$ в строке 5 табл. 1.7), принимаемые для расчета водохозяйственного баланса, определяются как максимальное значение из объема навигационного попуска ($W_{j,нав.}$ в строке 4 табл. 1.7) и объема санитарно-экологического попуска ($W_{j,c-3}$ в строке 3 табл. 1.7) в соответствующем месяце:

$$W_{j,кп} = \max(W_{j,нав.}; W_{j,c-3}).$$

Годовой объем комплексного попуска ($W_{j,кп}$ в строке 6 табл. 1.7)

вычисляется как сумма объемов попусков за все месяцы водохозяйственного года:

$$W_{i, \text{кп}} = \sum_{j=1}^{12} W_{j, \text{кп}}.$$

1.3. Расчет водохозяйственных балансов реки в расчетном створе

1.3.1. Расчет первоначального варианта водохозяйственного баланса

После подготовки исходных данных производится расчет водохозяйственного баланса речного бассейна. Баланс составляется в табличной форме для двух условий водности: остромаловодные условия обеспеченностью 95 % (табл. 1.8) и средние по водности условия (табл. 1.9).

Все составляющие элементы баланса, полученные как исходные данные и подготовленные в ходе предварительных расчетов (раздел 1.2), объединяются в две группы: приходные составляющие (Приход) и расходные составляющие (Расход).

По приходным элементам баланса вычисляется суммарный приход (строка «Итого ($\Sigma\Pi$)» таблиц 1.8 и 1.9) как сумма всех приходных составляющих за каждый месяц ($\Sigma\Pi_j$ в графах 2–13) и за год в целом ($\Sigma\Pi_r$ в графе 14).

По расходным элементам вычисляется суммарный расход (строка «Итого (ΣP)» табл. 1.8 и 1.9) также как сумма всех расходных составляющих за каждый месяц (ΣP_j) и за год в целом (ΣP_r).

Ниже, отдельной строкой «Баланс (Б)», в каждой таблице приводятся результирующие значение баланса водных ресурсов за каждый месяц (B_j) и в целом за водохозяйственный год (B_r). Результат расчета баланса (строка «Баланс (Б)» в табл. 1.8 и 1.9) вычисляется как разница между суммарным приходом и суммарным расходом за каждый месяц и за год в целом:

$$B_j = \Sigma\Pi_j - \Sigma P_j;$$

$$B_r = \Sigma\Pi_r - \Sigma P_r.$$

Положительное значение баланса ($B \geq 0$) оценивается как избыток (достаточность) водных ресурсов. Значение Б в этом случае позволя-

ет оценить величину резерва воды: резерв $P = B$.

Отрицательное значение баланса ($B < 0$) оценивается как нехватка водных ресурсов. В этом случае значение B определяет величину дефицита водных ресурсов: дефицит $D = -B$

При необходимости в таблицу расчета водохозяйственного баланса добавляется строка 17 «Сезонный дефицит», в которой приводится величина суммарного дефицита речного стока за сезон, если такой выявлен в результате расчетов. К сезону с дефицитом стока относят непрерывный период дефицита воды продолжительностью два и более месяца.

По результатам расчетов водохозяйственного баланса, складывающегося в условиях остромаловодного года и в условиях среднего по водности года, проводится анализ.

В процессе анализа определяется наличие или отсутствие дефицитов водных ресурсов (стока) за год в целом ($B_г$) и внутри года ($B_в$) в маловодных условиях 95 %-й обеспеченностью по стоку и в условиях средней по водности. Устанавливаются величины избытков или дефицитов в целом за год, указываются значения и календарные сроки дефицитов воды внутри маловодного и среднего по водности года, анализируются причины возникновения дефицитов и оценивается возможность их ликвидации.

По результатам анализа делается разработка второго (откорректированного) варианта водохозяйственного баланса.

1.3.2. Расчет откорректированного варианта водохозяйственного баланса

При разработке второго варианта водохозяйственного баланса решается задача ликвидации или уменьшения выявленных дефицитов стока. Для достижения этого следует руководствоваться следующими рекомендациями.

Для минимизации или даже ликвидации установленных дефицитов стока внутри года, при условии положительного баланса в целом за год, необходимо в первую очередь рассмотреть возможность корректировки правил наполнения–сработки водохранилища.

При дефиците стока в месяцы многоводной фазы (половодья), следует так изменить первоначально заданные правила (режим) наполнения водохранилища, чтобы ликвидировать или минимизиро-

вать дефицит стока в многоводные месяцы. Это достигается за счет сокращения или увеличения продолжительности наполнения водохранилища и изменения объемов аккумуляции воды в многоводные месяцы.

Если изменение режима наполнения водохранилища не позволяет полностью ликвидировать дефицит водных ресурсов в многоводные месяцы, то в выводах следует дать рекомендацию о необходимости уменьшения полезного объема водохранилища до величины, обеспечивающей отсутствие дефицитов в многоводный период года, а также необходимости уменьшения других расходных составляющих баланса или привлечения дополнительных источников водных ресурсов.

При дефиците водных ресурсов в месяцы меженного периода, также следует внести коррективы в первоначально заданные правила сработки водохранилища. Для ликвидации или минимизации выявленных дефицитов необходимо уменьшить объемы сработки, или совсем не срабатывать водохранилище, в месяцы отсутствия дефицита стока. За счет сохраненного запаса воды можно увеличить объемы сработки в меженные месяцы с дефицитом стока. При этом применяется наиболее оптимальный режим сработки запасов воды в водохранилище.

Изменяя режим работы водохранилища нужно помнить, что суммарный объем наполнения в многоводный период и суммарный объем сработки за весь меженный период должны оставаться равными полезному объему водохранилища.

При разработке откорректированного варианта водохозяйственного баланса также следует оценить роль объемов и режима перераспределения стока между бассейнами. Рассматривается целесообразность их изменения или даже отказа от перераспределения стока при дефиците в целом за маловодный, а тем более за средний по водности год.

После корректировки режима наполнения–сработки водохранилища и режима перераспределения стока рассчитываются вторые варианты водохозяйственных балансов для остромаловодных и средних по водности условий. В откорректированном варианте изменяются соответствующие составляющие баланса и результаты расчета с учетом сделанных изменений приводятся в табличном виде (табл. 1.10 и 1.11, вариант 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении описываются результаты расчета водохозяйственного баланса, полученные при первоначально заданных правилах регулирования стока (режиме наполнения–сработки водохранилища): отсутствие или наличие дефицита в целом за год и в отдельные месяцы и сезоны года; периоды и объемы дефицита в разных по водности условиях.

При наличии дефицитов стока в отдельные месяцы и сезоны года делается анализ и вносятся изменения в режим регулирования (наполнения–сработки водохранилища) и отдачи воды в другие бассейны, которые позволяют ликвидировать или уменьшить дефициты стока. Приводятся результаты расчета водохозяйственного баланса по второму варианту режима наполнения–сработки водохранилища.

При сохранении дефицитов стока указываются периоды и объемы дефицита водных ресурсов в остромаловодном году и в году средней водности, причины формирования дефицита. Даются предложения о возможных гидролого-водохозяйственных путях ликвидации дефицита воды. При этом следует оценить:

- необходимость, возможность и достаточность увеличения степени сезонного регулирования стока, т. е. полезного объема водохранилища (*при сезонном дефиците в маловодном году и отсутствии дефицита в целом за маловодный год*);

- необходимость и возможность перехода к многолетнему регулированию стока (*при дефиците стока в маловодном году и положительном балансе и достаточном резерве водных ресурсов в среднем по водности году*);

- необходимость организации межбассейнового перераспределения стока (*при дефиците как маловодном, так и среднем по водности году*).

ОБРАЗЕЦ-МАКЕТ практической работы

«Разработка водохозяйственного баланса речного бассейна» содержит формы титульного листа работы, таблиц исходной информации, расчетных таблиц и пример заключения по результатам анализа водохозяйственного баланса. Теоретическая часть в образце не показана.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Российский государственный гидрометеорологический
университет»
(РГГМУ)

Кафедра инженерной гидрологии

Задание № __
Разработка водохозяйственного баланса
реки Вилой в створе п. Чернышевский
(данные о стоке за период с 1990/1991 по 1999/2000 водохозяйствен-
ные годы)

Выполнил:
Студент группы ПГ-М.....
Фамилия И.О.

Проверил:
Фамилия И.О. преподавателя

Санкт-Петербург
год

Исходные данные
 Таблица 1.1 – Среднемесячные и среднегодовые расходы воды
 р. Вилой в створе п. Чернышевский
 за период с 1990/1991 по 1999/2000 водохозяйственные годы

№ п/п	В/х год	Среднемесячные расходы воды, м ³ /с												Q _{ср.} за год
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1990/91	7430	1740	279	287	537	440	84,0	18,0	6,00	4,00	3,00	8,00	903
2	1991/92	2930	4120	905	981	540	174	25,0	13,0	9,00	5,00	4,00	3,00	809
3	1992/93	5170	1600	632	88	78,0	53,0	12,0	8,00	6,00	5,00	5,00	6,00	639
4	1993/94	2220	3700	451	732	748	175	41,0	15,0	9,00	5,00	3,00	4,00	675
5	1994/95	3220	4780	375	71	60,0	66,0	15,0	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	716
6	1995/96	1300	4370	903	182	520	342	86,0	30,0	10,0	7,00	5,00	6,00	647
7	1996/97	3000	4840	560	394	864	237	41,0	11,0	8,00	7,00	7,00	12,0	832
8	1997/98	3000	1240	662	880	1510	649	128	27,0	9,00	7,00	4,00	5,00	677
9	1998/99	2810	6900	1570	229	698	191	68,0	24,0	12,0	10,0	7,00	6,00	1044
10	1999/00	4980	1890	708	312	446	96,0	24,0	10,0	6,00	4,00	2,00	3,00	707
Средний		3606	3518	705	416	600	242	52,0	16,0	8,00	6,00	4,00	5,00	765
Наибольший		7430	6900	1570	981	1510	649	128	30,0	12,0	10,0	7,00	12,0	1044
Наименьший		1300	1240	279	71,0	60,0	53,0	12,0	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	639

Таблица 1.2 – Условные значения приходных и расходных составляющих водохозяйственного баланса р. Вилой в створе п. Чернышевский.
Полезный объем водохранилища $V_{плз.} = 3200$ млн. м³

Составляющие ВХБ, млн. м ³	Месяцы											
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV
	Приходные											
Подземные и шахтные воды	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Переброска (+) из других бассейнов	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Расходные											
Забор воды на промышленные нужды	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Забор воды на коммунальное хозяй- ство	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Забор воды на орошение и др. с/х нуж- ды	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Дополнительное испарение с вдхр.	5	15	20	15	5	5	–	–	–	–	–	–
Переброска (–) в другие бассейны	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Навигационный попуск	800	800	800	800	800	800	–	–	–	–	–	–

Таблица 1.3 – Основные статистические характеристики годового стока
 р. Виллой в створе п. Чернышевский.
 Период 1990/1991 – 1999/2000 водохозяйственные годы.
 (Расчетная обеспеченность по условиям водности $P = 95\%$)

Средний многолетний расход воды	$Q_{\text{ср.мн}}, \text{м}^3/\text{с}$	765
Среднеквадратическое отклонение	СКО, $\text{м}^3/\text{с}$	131
Коэффициент вариации	C_v	0,17
Коэффициент асимметрии	$C_s = 2C_v$	0,34
Модульный коэффициент расчетной обеспеченности	$k_{95\%}$	0,74
Средний годовой расход воды расчетной обеспеченности	$Q_{95\%}, \text{м}^3/\text{с}$	566

Таблица 1.4 – Сток р. Виллой в створе п. Чернышевский
в условиях средней водности (Без приведения к обеспеченности 50 %).

Модель: 1994/95 водохозяйственный год

Сток	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Расход, м ³ /с	3220	4780	375	71,0	60,0	66,0	15,0	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	716
Объем, млн. м ³	8469	12571	986	187	158	174	39	11	5	5	5	5	22615

Таблица 1.5 – Сток р. Виллой в створе п. Чернышевский
в остромаловодных условиях (Приведенный к обеспеченности 95 %).

Модель: 1992/93 водохозяйственный год. $K_{пр.} = 0,89$

Сток	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Расход, м ³ /с	5170	1600	632	88,0	78,0	53,0	12,0	8,00	6,00	5,00	5,00	6,00	639
Расход, м ³ /с приведенный к $P = 95\%$	4600	1424	562	78,0	69,0	47,0	11,0	7,00	5,00	4,00	4,00	5,00	566
Объем, млн м ³ приведенный к $P = 95\%$	12100	3745	1479	206	183	124	28	19	14	12	12	14	17935

Таблица 1.8 – Водохозяйственный баланс р. Вилой в створе п. Чернышевский
в остромаловодных условиях. Вариант 1.

Модель: 1992/93 водохозяйственный год. Сток приведен к обеспеченности $P = 95 \%$

Элементы баланса, млн. м ³	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Приход													
Естественный приток	12100	3745	1479	206	183	124	28	19	14	12	12	14	17935
Подземные шахтные воды	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1200
Сработка водохранилища	–	–	–	356	356	356	356	356	355	355	355	355	3200
Переброска стока в бассейн (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Итого ($\Sigma\Pi$)	12200	3845	1579	662	639	580	484	475	469	467	467	469	22335
Расход													
Забор воды на промышл. нужды	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	600
Забор на коммунальное хоз-во	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	120
Забор на орошение и др. с/х нужды	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Наполнение водохранилища	960	1600	640	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3200
Потери воды на доп. испарение	5	15	20	15	5	–	–	–	–	–	–	–	60
Переброска стока из бассейна (–)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Комплексный попуск	4740	2800	926	800	800	800	70	70	70	70	70	70	11286
Итого (ΣP)	5765	4475	1651	875	865	860	130	130	130	130	130	130	15271
Баланс (Б): избыток (+), дефицит (–)	6435	–630	–72	–213	–226	–280	354	345	339	337	337	339	7064
Сезонный дефицит				–1421									

Таблица 1.10 – Водохозяйственный баланс р. Вилой в створе п. Чернышевский
в остромаловодных условиях. Вариант 2.

Модель: 1992/93 водохозяйственный год. Сток приведен к обеспеченности $P = 95 \%$

Элементы баланса, млн. м ³	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Приход													
Естественный приток	12100	3745	1479	206	183	124	28	19	14	12	12	14	17935
Подземные шахтные воды	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1200
Сработка водохранилища	–	–	0	650	650	650	209	209	208	208	208	208	3200
Переброска стока в бассейн (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Итого ($\Sigma\Pi$)	12200	3845	1579	956	933	874	337	328	322	320	320	322	22335
Расход													
Забор воды на промышл. нужды	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	600
Забор на коммунальное хоз-тво	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	120
Забор на орошение и др. с/х нужды	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Наполнение водохранилища	2800	400	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3200
Потери воды на доп. испарение	5	15	20	15	5								60
Переброска стока из бассейна (–)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Комплексный попуск	4740	2800	926	800	800	800	70	70	70	70	70	70	11286
Итого (ΣP)	7605	3275	1011	875	865	860	130	130	130	130	130	130	15271
Баланс (Б): избыток (+), дефицит (–)	4595	570	568	81	68	14	207	198	192	190	190	192	7064

Таблица 1.11 – Водохозяйственный баланс р. Вилюй в створе п. Чернышевский
в условиях средней водности. Вариант 2.

Модель: 1994/95 водохозяйственный год. Без приведения к обеспеченности $P = 50\%$

Элементы баланса, млн. м ³	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Приход													
Естественный приток	8469	12571	986	187	158	174	39	11	5	5	5	5	22615
Подземные шахтные воды	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1200
Сработка водохранилища	–	–	0	650	650	650	209	209	208	208	208	208	3200
Переброска стока в бассейн (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Итого (ΣП)	8569	12671	1086	937	908	924	348	320	313	313	313	313	27015
Расход													
Забор воды на промышлен. нужды	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	600
Забор на коммунальное хозяйство	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	120
Забор на орошение и др. с/х нужды	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Наполнение водохранилища	1600	1600	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3200
Потери воды на доп. испарение	5	15	20	15	5	–	–	–	–	–	–	–	60
Переброска стока из бассейна (–)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Комплексный попуск	4740	2800	926	800	800	800	70	70	70	70	70	70	11286
Итого (ΣР)	6405	4475	1011	875	865	860	130	130	130	130	130	130	15271
Баланс (Б): избыток (+), дефицит (–)	2164	8196	75	62	43	64	218	190	183	183	183	183	11744

Заключение

При расчете водохозяйственного баланса р. Виллой в створе п. Чернышевский с первоначально принятым режимом наполнения–сработки водохранилища (Вариант 1) установлено:

1) В целом за год баланс складывается положительно со значительными избытками стока в среднем по водности году и в маловодном году. В остромаловодных условиях избытки составляют 7060 млн. м³. В условиях средней водности избытки стока увеличиваются в полтора раза, до 11700 млн. м³.

2) Внутри как маловодного, так и среднего по водности года наблюдаются периоды сезонного дефицита водных ресурсов.

В маловодном году выявлен дефицит стока в период с июня по октябрь (5 месяцев). В остромаловодных условиях ($P = 95\%$) сезонный дефицит водных ресурсов составил 1420 млн. м³. Причем, дефицит наблюдается на спаде половодья в достаточно многоводные месяцы июнь и июль.

В среднем по водности году продолжительность периода с дефицитом стока сокращается до 3-х месяцев. Дефицит наблюдается в период с августа по октябрь, величина дефицита 713 млн. м³ (в 2 раза меньше по сравнению с маловодным годом). На спаде половодья, в многоводном июне и относительно многоводном июле, дефицита воды нет.

3) Выявленные периоды дефицита воды внутри года связаны с существенной внутригодовой неравномерностью стока реки Виллой и первоначально заданными правилами регулирования стока

Для ликвидации сезонных дефицитов необходимо изменить режим наполнения–сработки водохранилища. Увеличивать полезный объем водохранилища в этих целях необходимости нет.

Водохозяйственный баланс р. Виллой в створе Чернышевский, складывающийся после изменения режима наполнения и сработки водохранилища (вариант 2), представлен в табл. 1.10 (остромаловодные условия) и в табл. 1.11 (условия средней водности).

Заполнение всего полезного объема водохранилища следует осуществлять в первые 1–2 месяца половодья (в мае–июне, в зависимости от сроков начала и хода половодья). В июле водохранилище работает по притоку: без наполнения и сработки. Такой режим работы позволяет полностью заполнить водохранилище и избежать дефицитов стока в относительно многоводные летние месяцы на спаде половодья.

Дефицит стока в меженные летне-осенние месяцы связан с требованиями по обеспечению условий судоходства (навигационные попуски).

Для ликвидации дефицита стока в начале меженного периода (август – октябрь) необходимо изменить режим сработки водохранилища. Следует увеличить объемы сработки в августе–октябре до 650 млн. м³ в месяц. При этом объемы отдачи воды из водохранилища в остальные месяцы меженного периода (ноябрь–апрель) уменьшается до 208 млн. м³ в месяц.

4) При ежемесячной отдаче из водохранилища 208 млн. м³ транзитный сток в холодный период года с ноября по апрель, складывающийся из избытков воды (ежемесячный объем 183–218 млн. м³) и комплексного попуск (70 млн. м³), составляет 250–290 млн. м³ в месяц, что соответствует среднемесячным расходам порядка 95–110 м³/с.

Для увеличения транзитного стока в зимний период, например в целях гидроэнергетики, возможно рассмотреть вариант с увеличением полезного объема водохранилища. Объемы естественного стока реки в период половодья позволяют это сделать. Избытки стока в мае–июне, при измененном режиме работы водохранилища, составляют не менее 5000 млн. м³ даже в крайне маловодных условиях.

2. Расчет сезонного регулирования стока балансовым табличным способом для двух различных по водности лет

Цель работы: освоить методику расчета полезного объема водохранилища по данным о стоке реки в расчетном створе.

Задачи: 1) Определить величину полезного объема водохранилища ($V_{\text{плз.}}$) по заданному (назначенному) значению гарантированного расхода ($Q_{\text{гар.}}$) и его расчетной обеспеченности (P %).

2) Произвести расчет сезонного регулирования стока для двух характерных по водности лет: остромаловодного года обеспеченностью 95 % и среднего по водности года.

Исходные данные:

1) Значения среднемесячных расходов воды ($Q_{j,i}$, м³/с) в расчетном створе за репрезентативный период продолжительность N водохозяйственных лет.

В учебных заданиях и в рассматриваемом примере используется ряд ограниченный продолжительностью 10–13 водохозяйственных лет (табл. 2.1).

Общие положения к выполнению работы

Работа состоит из трех последовательных частей и заключения.

В первой части (теоретической) дается описание понятий водохранилища и его параметров, регулирования стока, видов регулирования, гарантированного расхода и т.п.

Во второй части по заданному значению гарантированного расхода и его обеспеченности рассчитывается величина полезного объема водохранилища, необходимого для осуществления регулирования стока на установленную отдачу.

В третьей части работы осуществляется расчет сезонного регулирования стока реки для двух различных по водности лет.

В заключении приводятся результаты расчетов и дается описание особенностей зарегулированного водного режима в маловодном и среднем по водности году.

Последовательность выполнения работы

2.1. Регулирование стока и параметры водохранилищ. (Теоретическая часть)

Для выполнения теоретической части работы необходимо изучить материалы глав 6,7 и 8 (разделы 8.1 и 8.4) учебника [1], лекционных занятий и кратко изложить сведения по следующим вопросам:

- 1) Определение и основные параметры водохранилища, их краткое описание.
- 2) В чем заключается процесс регулирования стока, и какой параметр определяет регулирующие возможности водохранилища.
- 3) Виды регулирования стока и принципы определения полезного объема водохранилища.
- 4) Дать определение понятию гарантированный расход и его расчетной обеспеченности.
- 5) Вид и основные составляющие уравнения водного баланса водохранилища, лежащего в основе расчета регулирования стока

2.2. Расчет полезного объема водохранилища

Величина полезного объема водохранилища определяется по значению дефицита (нехватки) речного стока по сравнению с необходимой для обеспечения требований водопользователей величиной. Расчет осуществляют в следующей последовательности.

1) Для определения величины полезного объема ($V_{\text{плз.}}$) водохранилища необходимо знать значение гарантированного расхода ($Q_{\text{гар.}}$) и значение его расчетной обеспеченности. Гарантированный расход это наименьший зарегулированный расход, который будет обеспечиваться в результате регулирования речного стока водохранилищем с заданной вероятностью (обеспеченностью, P %).

В учебном задании значение гарантированного расхода условное и принимается равным среднегодовому расходу реки в расчетном створе обеспеченностью $P = 95$ %, т. е.

$$Q_{\text{гар.}} = Q_{95\%}.$$

Расчетная обеспеченность гарантированного расхода назначается равной 95 %, т. е.

$$P(Q_{\text{гар.}}) = 95 \%.$$

Эти условия соответствуют наивысшей степени сезонного регулирования стока – годичному регулированию.

Значение расхода $Q_{95\%}$ вычисляется методами гидрологических расчетов, путем статистической обработки исходных данных о стоке реки в расчетном створе (табл. 2.1).

Расчет статистических характеристик и среднегодового расхода $Q_{95\%}$ производится в соответствии с пояснениями к Практическому заданию №1 (раздел 1.2.1 пункты 1–3). При неизменности исходных данных используются результаты статистических расчетов из работы № 1.

В рассматриваемом примере, для р. Енисей в створе г. Саяногорск, расчетные характеристики годового стока приведены в табл. 2.2.

По результатам расчетов принимаем значение гарантированного расхода

$$Q_{\text{гар.}} = Q_{95\%} = 556 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2) По исходным данным о стоке реки для всех месяцев вычисляется превышение гарантированного расхода над среднемесячными расходами, называемое дефицит расхода ($Q_{\text{деф}}$):

$$Q_{\text{деф},j,i} = Q_{\text{гар.}} - Q_{j,i},$$

где $Q_{\text{деф},j,i}$ – дефицит расхода в j -м месяце i -го года; $Q_{j,i}$ – среднемесячный расход j -го месяца i -го года.

Результаты расчета дефицитов расхода показаны в табл. 2.3.

Исходные данные

Таблица 2.1 – Среднемесячные и среднегодовые расходы воды
р. Енисей в створе г. Саяногорск
за период с 1910/1911 по 1921/1922 водохозяйственные годы

№ п/п	В/х год	Среднемесячные расходы воды, м ³ /с												Q _{ср.} за год
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
1	1910/11	1330	1620	2700	1780	1140	589	289	119	47,2	25,7	20,5	207	822
2	1911/12	1040	1020	1770	2650	2050	772	233	88,7	23,7	9,30	7,40	161	819
3	1912/13	2240	2370	1230	1750	3050	1260	501	145	34,1	9,60	8,60	637	1103
4	1913/14	2320	1330	1590	2930	1840	832	375	139	33,2	14,3	12,2	298	976
5	1914/15	2510	2070	2410	4380	2540	812	228	35,4	9,30	5,20	5,90	70,8	1256
6	1915/16	2220	2840	2200	4630	2720	1090	592	193	40,5	16,0	13,1	144	1392
7	1916/17	3000	3450	1760	2670	1560	708	267	117	35,3	13,9	10,2	354	1162
8	1917/18	1470	2250	4080	2750	1630	845	400	154	37,6	15,4	13,2	201	1154
9	1918/19	973	1780	1330	911	1360	1070	483	147	50,7	25,1	17,0	23,1	681
10	1919/20	938	1480	1170	960	1720	893	239	96,4	33,6	18,2	14,2	107	639
11	1920/21	1410	734	1720	1270	1410	813	214	97,9	32,5	17,0	13,7	453	682
12	1921/22	1990	1630	1130	1040	1030	464	188	82,4	54,7	26,6	21,2	168	652
Средний		1787	1881	1924	2310	1838	846	334	118	36,0	16,5	13,1	235	945
Наибольший		3000	3450	4080	4630	3050	1260	592	193	54,7	28,6	21,2	637	1392
Наименьший		938	1020	1170	911	1140	589	228	35,4	9,30	5,20	5,90	23,1	639

Таблица 2.2 – Статистические характеристики годового стока р. Енисей в створе г. Саяногорск. Период с 1910/11 по 1921/22 водохозяйственные годы. (Расчетная обеспеченность $P = 95\%$)

Средний многолетний годовой расход воды	$Q_{\text{ср.мн.}}, \text{м}^3/\text{с}$	945
Коэффициент вариации	C_v	0,28
Коэффициент асимметрии	C_s	$C_s = 2C_v$
Модульный коэффициент расчетной обеспеченности	$k_{95\%}$	0,59
Средний годовой расход воды расчетной обеспеченности	$Q_{95\%}, \text{м}^3/\text{с}$	556

3) В каждом водохозяйственном году устанавливается меженный (лимитирующий) период с дефицитом речного стока, когда значения $Q_{\text{деф},j}$ больше нуля, т. е. положительные.

Лимитирующий период с дефицитом речного стока принимается непрерывным и включает все месяцы от первого месяца с дефицитом стока до последнего месяца с дефицитом стока. В этот период входят и месяцы с осенними паводками, даже если в них дефицита нет, т. е. значения $Q_{\text{деф},j}$ отрицательные. В табл. 2.3 периоды дефицита стока выделены цветом.

4) Для каждого года вычисляется сумма расходов дефицита за все месяцы установленного периода дефицита ($\sum Q_{\text{деф},j}$). Суммирование осуществляется с учетом возможного отрицательного знака значений $Q_{\text{деф},j}$ в месяцы осенних паводков:

$$\sum Q_{\text{деф},j} = \sum (Q_{\text{гар.}} - Q_j).$$

Таблица 2.3 – Среднемесячные дефициты расхода воды
 р. Енисей в створе г. Саяногорск
 за период с 1910/1911 по 1921/1922 водохозяйственные годы. $Q_{\text{гар.}} = 556 \text{ м}^3/\text{с}$

№ п/п	В/х год	Среднемесячные расходы воды, $\text{м}^3/\text{с}$												$\Sigma Q_{\text{деф.}}$ $\text{м}^3/\text{с}$
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
1	1910/11	-774	-1064	-2144	-1224	-584	-33	267	437	509	530	536	349	2628
2	1911/12	-484	-464	-1214	-2094	-1494	-216	323	467	532	547	549	395	2813
3	1912/13	-1684	-1814	-674	-1194	-2494	-704	55	411	522	546	547	-81	2081
4	1913/14	-1764	-774	-1034	-2374	-1284	-276	181	417	523	542	544	258	2465
5	1914/15	-1954	-1514	-1854	-3824	-1984	-256	328	521	547	551	550	485	2982
6	1915/16	-1664	-2284	-1644	-4074	-2164	-534	-36	363	516	540	543	412	2374
7	1916/17	-2444	-2894	-1204	-2114	-1004	-152	289	439	521	542	546	202	2539
8	1917/18	-914	-1694	-3524	-2194	-1074	-289	156	402	518	541	543	355	2515
9	1918/19	-417	-1224	-774	-355	-804	-514	73	409	505	531	539	533	2590
10	1919/20	-382	-924	-614	-404	-1164	-337	317	460	522	538	542	449	2828
11	1920/21	-854	-178	-1164	-714	-854	-257	342	458	524	539	542	103	2508
12	1921/22	-1434	-1074	-574	-484	-474	92	368	474	501	527	535	388	2885

Если в первом месяце водохозяйственного года наблюдается дефицит (значение $Q_{\text{деф},j} > 0$), то это значение дефицита учитывается в сумме $\sum Q_{\text{деф},j}$ за межлетний период дефицита предыдущего водохозяйственного года. (В таком году половодье началось позже и в первом месяце, по факту, еще продолжалась межень предыдущего водохозяйственного года).

Подсчитанные значения $\sum Q_{\text{деф},j}$ заносятся в графу 15 табл. 2.3 и затем используются для вычисления объема дефицита стока за каждый год (D_i).

5) В табл. 2.4 приводится информация о периодах дефицита стока в каждом году и вычисляются значения дефицита стока.

В графах 3 и 4 табл. 2.4 указываются принятые календарные сроки для периода дефицита и число месяцев в нем. В графу 5 заносится сумма дефицитов расхода $\sum Q_{\text{деф},j}$ за принятый период (из графы 15 табл. 2.3).

Таблица 2.4 – Расчет значений и координат кривой обеспеченности дефицитов стока р. Енисей в створе г. Саяногорск за период с 1910/1911 по 1921/1922 в/х годы

№ п/п	В/х год	Дефицитный период		$\sum Q_i$, м ³ /с	D , млн. м ³	$D_{\text{ранж}}$, млн. м ³	P , %
		Сроки	Число месяцев (n_M)				
1	1910/11	XI–IV	6	2628	6912	5473	7,7
2	1911/12	XI–IV	6	2813	7398	6244	15,4
3	1912/13	XI–III	5	2081	5473	6483	23,1
4	1913/14	XI–IV	6	2465	6483	6596	30,8
5	1914/15	XI–IV	6	2982	7843	6614	38,5
6	1915/16	XII–IV	5	2374	6244	6678	46,2
7	1916/17	XI–IV	6	2539	6678	6812	53,9
8	1917/18	XI–IV	6	2515	6614	6912	61,5
9	1918/19	XI–IV	6	2590	6812	7398	69,2
10	1919/20	XI–IV	6	2828	7438	7438	76,9
11	1920/21	XI–IV	6	2508	6596	7588	84,6
12	1921/22	X–IV	7	2885	7588	7843	92,3

В графе 6 вычисляются объемы дефицита стока за каждый водо-

хозяйственный год (D_i) и формируется ряд дефицитов за N лет.

Значение D_i вычисляется по формуле:

$$D_i = (\sum Q_{\text{деф},j,i}) n_m 2,63,$$

где D_i – дефицит речного стока по отношению к принятому значению $Q_{\text{гар}}$ в i -м водохозяйственном году, в млн. м³; n_m – число месяцев j в периоде дефицита стока; 2,63 – среднее количество миллионов секунд в месяце.

Примечание. Если в лимитирующем периоде дефицита стока имеются месяцы осенних паводков с избытками стока, необходимо произвести дополнительные расчеты. Кроме дефицита стока D за весь лимитирующий период необходимо вычислит объем дефицита отдельно за месяцы первой летне-осенней фазы межени (до избытков в осенние паводки) и объем дефицита за месяцы второй зимней фазы межени (после избытков в осенние паводки). Окончательно, за величину дефицита стока в таком году, принимается наибольшее из трех значений и информация в табл. 2.3 и 2.4 должна соответствовать этому значению.

6) По ряду значений дефицитов стока D_i , сформированному в графе 6 табл. 2.4, делается расчет координат эмпирической кривой обеспеченностей дефицитов стока.

Ряд дефицитов ранжируется в возрастающем порядке (в отличие от ранжирования по убыванию, принятого при гидрологических расчетах). Ранжированный ряд заносится в графу 7 табл. 2.4, а графе 8 указывается значение эмпирической обеспеченностей (P , %) членов ранжированного ряда. Значения P вычисляются по формуле

$$P = \frac{m}{N+1} 100\%,$$

где m – порядковый номер члена ранжированного ряда; N – длина ряда.

7) По значениям граф 7 и 8 строится кривая обеспеченности. Эмпирические точки наносятся в поле графика с декартовыми координатами (рис. 2.1). В использовании клетчатки вероятностей необходимости нет.

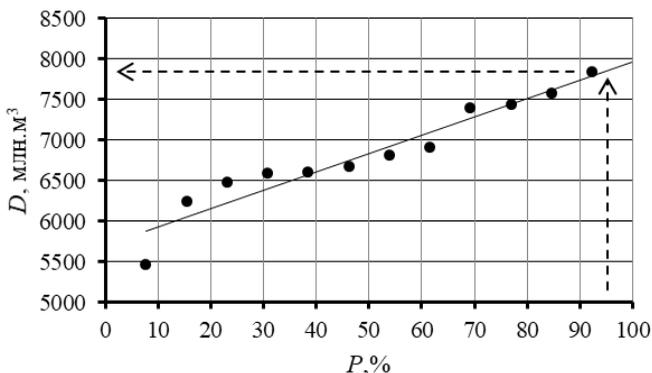


Рис. 2.1. Кривая обеспеченностей дефицитов стока р. Енисей в створе г. Саяногорск за период с 1910/1911 по 1921/1922 в/х годы.

8) Полезный объем водохранилища $V_{плз.}$, необходимый для обеспечения заданного гарантированного расхода с определенной вероятностью, равен величине дефицита стока, обеспеченность которой соответствует расчетной обеспеченности гарантированного расхода, т. е. $V_{плз.} = D_{P(Q_{гар.})}$.

Величину дефицита стока обеспеченностью, соответствующей расчетной обеспеченности гарантированного расхода $P(Q_{гар.}) = 95 \%$, определяем по сглаженной эмпирической кривой обеспеченностей (рис. 2.1).

Для рассматриваемого примера это значение $D_{95\%} = 7800$ млн. м³.

В учебном задании, в связи с использованием очень непродолжительного ряда, допускается линейная аппроксимация эмпирических точек при сглаживании кривой обеспеченности. Численное значение дефицита $D_{95\%}$ принимается округленным, с точность не более трех значащих цифр.

9) В результате, на реке Енисей в створе г. Саяногорск, для гарантированного расхода

$$Q_{гар.} = 556 \text{ м}^3/\text{с} \text{ обеспеченностью } P = 95 \%$$

необходимо водохранилище с полезным объемом $V_{плз.} = 7800$ млн. м³.

Если принять другую расчетную обеспеченность гарантированного расхода, то соответственно изменится и расчетная величина полезного объема:

$$\text{для обеспеченности } P(Q_{гар.}) = 90 \% \quad V_{плз.} = 7750 \text{ млн. м}^3;$$

$$\text{для обеспеченности } P(Q_{гар.}) = 80 \% \quad V_{плз.} = 7500 \text{ млн. м}^3.$$

2.3. Расчет сезонного регулирования для двух различных по водности лет

1) Для расчета из таблицы исходных данных о стоке реки в расчетном створе (табл. 2.1) выбирают два года-модели: маловодный год со среднегодовым расходом близким к среднегодовому расходу обеспеченностью $P = 95 \%$ и средний по водности год с расходом близким к среднемноголетнему.

В рассматриваемом примере, в качестве года-модели для маловодных условий взят самый маловодный 1919/1920 в/х год с расходом $Q_{\Gamma} = 639 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 2.5); для средних по водности условий взят 1913/1914 в/х год со среднегодовым расходом $Q_{\Gamma} = 976 \text{ м}^3/\text{с}$, наиболее близким к среднемноголетнему значению $Q_{\text{ср.мн.}} = 945 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 2.6).

Если исходные данные не изменились, годы-модели берутся из задания № 1.

2) Задаемся правилами регулирования, состоящими из 5 положений:

Положение 1. Регулирование осуществляется на постоянную отдачу, т. е. в период наполнения водохранилища (до полного заполнения полезного объема) и в период сработки водохранилища (до полного использования полезного объема) зарегулированный расход отдачи воды в нижний бьеф остается постоянным:

– в период наполнения водохранилища $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = \text{const}_1$;

– в период сработки водохранилища $Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}} = \text{const}_2$.

Положение 2. До момента полного заполнения полезного объема водохранилища зарегулированный расход периода наполнения ($Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = \text{const}_1$) не должен превышать расход максимальной пропускной способности ГЭС ($Q_{\text{ГЭС}}$), входящей в состав гидроузла.

Максимальная пропускная способность ГЭС является технической характеристикой турбин установленных на ГЭС.

В учебном задании принимается условное значение максимальной пропускной способности ГЭС равное удвоенному гарантированному расходу:

$$Q_{\text{ГЭС}} = 2Q_{\text{гар.}}$$

В рассматриваемом примере $Q_{\text{ГЭС}} = 2 \cdot 556 = 1112 \text{ (м}^3/\text{с)}$.

Положение 3. Полезный объем водохранилища должен быть пол-

ностью заполнен к концу многоводной фазы (половодья) каждого водохозяйственного года. Наполнение начинается с первого месяца многоводной фазы.

Положение 4. Полезный объем должен быть полностью сработан к концу маловодной фазы (межени) каждого водохозяйственного года. Сработка водохранилища начинается с первого месяца межени, в котором среднемесячный расход $Q_j < Q_{\text{гар.}}$.

2.3.1. Расчет сезонного регулирования в маловодном году, приведенном к расчетной обеспеченности $P = 95 \%$

1) Сток выбранного года-модели (1919/1920 в/х год) приводится к требуемой расчетной обеспеченности $P = 95 \%$. Процедура приведения стока описана в расчетном задании № 1, (раздел 1.2.1, пункт 6).

Результаты приведения стока р. Енисей в створе г. Саяногорск за 1919/1920 в/х год к обеспеченности $P = 95 \%$ представлены в табл. 2.5. В строке 1 – фактические расходы, в строке 2 – приведенные расходы, в строке 3 – приведенные к обеспеченности 95 % объемы стока за каждый месяц и за весь год. Коэффициент приведения $K_{\text{пр.}} = Q_{95\%}/Q_{\text{г.мод.}} = 556/639 = 0,87$.

2) Вычисляются зарегулированные расходы отдачи воды из водохранилища в период наполнения $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}}$ и в период сработки $Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}}$.

Исходя из принятых правил регулирования, расходы отдачи можно вычислить по формулам, отражающим водный баланс водохранилища в период его наполнения и сработки.

Для вычисления зарегулированных расходов необходимо в модельном году, в котором осуществляется расчет регулирования, выделить многоводную фазу (половодье) и маловодную фазу (межень).

К многоводной фазе относят период включающий месяцы от начала половодья и до начала межени, в которых среднемесячные расходы превышают среднегодовой расход или равны ему. В маловодном году, приведенном по стоку к расчетной обеспеченности, среднегодовой расход равен гарантированному расходу, поэтому к многоводной фазе относят месяцы с $Q_j \geq Q_{\text{гар.}}$.

Таблица 2.5 – Сток р. Енисей в створе г. Саяногорск
в маловодном 1919/20 водохозяйственном году.
Приведен к обеспеченности 95 %. $K_{пр.} = 0,87$

Сток	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Расход, м ³ /с	938	1480	1170	960	1720	893	239	96,4	33,6	18,2	14,2	107	639
Расход, м ³ /с приведенный к $P = 95\%$	816	1288	1018	835	1496	777	208	83,9	29,2	15,8	12,4	93,1	556
Объем, млн м ³ приведенный к $P = 95\%$	2146	3387	2677	2196	3934	2044	547	221	76,8	41,6	32,6	245	17548

Таблица 2.6 – Сток р. Енисей в створе г. Саяногорск
в среднем по водности 1913/14 водохозяйственном году.
(Без приведения к обеспеченности 50 %)

Сток	Месяцы												Год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
Расход, м ³ /с	2320	1330	1590	2930	1840	832	375	139	33,2	14,3	12,2	298	976
Объем, млн м ³	6102	3498	4182	7706	4839	2188	986	366	87	38	32	784	30807

К маловодной фазе относят межженный период года со среднемесячными расходами меньше гарантированного ($Q_j < Q_{\text{гар.}}$). Если межженный период прерывается осенними паводками, то месяцы осеннего паводочного стока, с расходами превышающими $Q_{\text{гар.}}$, включаются в маловодную фазу, т. е. она принимается непрерывной.

В рассматриваемом примере, в модельном 1919/1920 в/х году (табл. 2.5), к многоводной фазе отнесен период с мая по октябрь продолжительность 6 месяцев, а к маловодной фазе период с ноября по апрель также продолжительностью 6 месяцев. (В строках 2 и 3 табл. 2.5 выделенные периоды показаны цветом).

Следует иметь в виду, что расчет регулирования осуществляется в пределах реальных временных границ конкретного водохозяйственного года, который начинается с первого многоводного месяца и продолжается до последнего месяца маловодной фазы. Границы отдельного реального водохозяйственного года могут не совпадать с жестко закрепленными на все годы границами из таблицы исходных данных. Конкретный водохозяйственный год может начаться на месяц позже (при более позднем начале половодья) и иметь продолжительность не 12, а 11 месяцев, и наоборот, иметь продолжительность 13 месяцев, если зимняя межень в этом году длилась дольше чем обычно.

Зарегулированный расход отдачи в период наполнения водохранилища ($Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}}$), с учетом требований правил регулирования, вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = \frac{W_{\text{пол.}} - V_{\text{плз.}}}{n_{\text{пол.}} \cdot 2,63} = \frac{16384 - 7800}{6 \cdot 2,63} = 544 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

где $W_{\text{пол.}}$ – объем естественного речного стока (притока в водохранилище) за многоводную фазу – половодье (в млн. м^3); $V_{\text{плз.}}$ – полезный объем водохранилища (в млн. м^3); $n_{\text{пол.}}$ – продолжительность многоводной фазы (число месяцев); 2,63 – среднее количество млн. секунд в месяце.

Зарегулированный расход отдачи в период сработки водохранилища ($Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}}$) вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}} = \frac{W_{\text{меж.}} - V_{\text{плз.}}}{n_{\text{меж.}} \cdot 2,63} = \frac{1164 + 7800}{6 \cdot 2,63} = 575 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.2)$$

где $W_{\text{меж.}}$ – объем естественного речного стока (притока в водохранилище) за маловодную фазу – межень (в млн. м³); $n_{\text{меж.}}$ – продолжительность маловодной фазы (число месяцев).

По результатам расчета зарегулированных расходов возможны три случая соотношений между ними:

- $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} > Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}}$,
- $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}}$,
- $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} < Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}}$.

При первом и втором случаях вычисленные зарегулированные расходы в дальнейшем расчете регулирования принимаются без изменений.

Третий случай может возникнуть, когда в выбранном модельном году водный режим реки отличается повышенной внутригодовой равномерностью стока по сравнению с другими годами. В таком году требование обязательного заполнения и сработки всего полезного объема водохранилища приведет к чрезмерно большому перераспределению стока из многоводной фазы в маловодную, в результате чего сток многоводной фазы станет меньше стока маловодной фазы (и даже меньше гарантированного расхода).

Такой, третий, случай получился в рассматриваемом примере. Вычисленный по формуле 2.1 зарегулированный расход периода наполнения $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = 544 \text{ м}^3/\text{с}$ оказался меньше гарантированного расхода ($Q_{\text{гар.}} = 556 \text{ м}^3/\text{с}$) и меньше вычисленного по формуле 2.2 зарегулированного расхода периода сработки $Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}} = 575 \text{ м}^3/\text{с}$.

В таком году, при регулировании стока, необходимо принять решение о неполном заполнении (недозаполнении) полезного объема водохранилища. В этом случае, в процессе сезонного регулирования, водохранилище необходимо заполнить на величину, которая обеспечит полное выравнивание стока реки до среднегодового расхода и не приведет к излишне большому перераспределению стока из многоводной фазы в маловодную.

Величина наполнения водохранилища ($V_{\text{нап.}}$), обеспечивающая полное выравнивание стока в расчетном году вычисляется по следующей формуле:

$$V_{\text{нап.}} = \frac{W_{\text{пол.}} \cdot n_{\text{меж.}} - W_{\text{меж.}} \cdot n_{\text{пол.}}}{n_{\text{пол.}} + n_{\text{меж.}}} \quad (2.3)$$

В рассматриваемом примере

$$V_{\text{нап.}} = \frac{16385 \cdot 6 - 1163 \cdot 6}{12} = 7610 \text{ млн. м}^3.$$

В формуле 2.3, из-за несовпадения границ отдельного водохозяйственного года с жесткими границам, принятыми для всего ряда данных, сумма $(n_{\text{пол.}} + n_{\text{меж.}})$ не всегда равна 12. Например, если в году, по которому ведется расчет регулирования, наблюдалось позднее начало половодья, то его продолжительность может оказаться меньше 12 месяцев и сумма $(n_{\text{пол.}} + n_{\text{меж.}}) = 11$, а в году с затянувшейся меженью может превысить 12 и возможна сумма $(n_{\text{пол.}} + n_{\text{меж.}}) = 13$.

После вычисления $V_{\text{нап.}}$ делается пересчет зарегулированных расходов периода наполнения и периода сработки. Пересчет ведется по формулам 2.1 и 2.2, в которых значение полезного объема ($V_{\text{плз.}}$) заменятся на вычисленное по формуле 2.3 необходимое (достаточное) наполнение водохранилища ($V_{\text{нап.}}$). При правильных расчетах новые значения зарегулированных расходов должны равняться среднегодовому расходу расчетного модельного года.

В рассматриваемом примере:

$$Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}} = \frac{W_{\text{пол.}} - V_{\text{нап.}}}{n_{\text{пол.}} \cdot 2,63} = \frac{16384 - 7610}{6 \cdot 2,63} = 556 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}} = \frac{W_{\text{меж.}} - V_{\text{нап.}}}{n_{\text{меж.}} \cdot 2,63} = \frac{1164 + 7610}{6 \cdot 2,63} = 556 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.2')$$

3) После вычисления зарегулированных расходов делается расчет регулирования стока в модельном году.

Расчет осуществляется по уравнению водного баланса водохранилища за последовательные расчетные интервалы времени $\Delta t = 1$ месяц:

$$V_{\Delta t}^{\text{кон.}} = V_{\Delta t}^{\text{нач.}} + \Delta V_{\Delta t} = V_{\Delta t}^{\text{нач.}} + (Q_{\text{прит., } \Delta t} - Q_{\text{отд., } \Delta t}) \Delta t, \quad (2.4)$$

где $V_{\Delta t}^{\text{кон.}}$ – наполнение водохранилища в конце расчетного интервала времени Δt (млн. м³); $V_{\Delta t}^{\text{нач.}}$ – наполнение водохранилища в начале расчетного интервала времени Δt (млн. м³); $\Delta V_{\Delta t}$ – объем аккумуляции воды в водохранилище за расчетный интервал времени Δt (млн. м³); $Q_{\text{прит.},\Delta t}$ – средний за расчетный интервал времени Δt расход притока воды в водохранилище (м³/с); $Q_{\text{отд.},\Delta t}$ – средний за расчетный интервал времени Δt расход отдачи воды из водохранилища (м³/с).

Разница между расходом притока и расходом отдачи за расчетный интервал времени называют расходом аккумуляции

$$\Delta Q_{\Delta t} = (Q_{\text{прит.},\Delta t} - Q_{\text{отд.},\Delta t}) \quad (2.4)$$

Значения расхода аккумуляции (ΔQ) и объема аккумуляции воды в водохранилище (ΔV) могут иметь и положительный и отрицательный знак. Если в расчетном интервале времени (месяце) расход притока превышает расход отдачи ($Q_{\text{прит.},\Delta t} > Q_{\text{отд.},\Delta t}$), то расход и, соответственно, объем аккумуляции положительны и водохранилище наполняется. Если расход притока меньше расхода отдачи ($Q_{\text{прит.},\Delta t} < Q_{\text{отд.},\Delta t}$), то расход и объем аккумуляции отрицательны и запасы воды в водохранилище срабатываются.

При расчете регулирования расходы притока – это значения естественного речного стока в створе плотины водохранилища; расходы отдачи – вычисленные для периода наполнения и периода сработки водохранилища зарегулированные расходы отдачи.

Расчет регулирования стока реализуется в табличной форме (табл. 2.7).

Графа 1 таблицы является графой времени и в нее заносится последовательность расчетных интервалов времени Δt (последовательность месяцев водохозяйственного года).

В графу 2 записываются значения среднемесячных расходов притока, приведенные к расчетной обеспеченности $P = 95 \%$ (расходы из строки 2 табл. 2.5) *В учебном задании расчет регулирования осуществляется с использованием расходов притока «брутто» (без учета безвозвратных потерь речного стока на дополнительное испарение с водного зеркала водохранилища и временных потерь на ледообразование).*

В графу 3 заносятся вычисленные по формулам 2.1 и 2.2 значения расходов отдачи воды из водохранилища: для месяцев многоводной

фазы – зарегулированный расход периода наполнения ($Q_{зар.}^{нап.}$); для месяцев маловодной фазы – зарегулированный расход периода сработки ($Q_{зар.}^{срб.}$).

Таблица 2.7 – Расчет регулирования стока на постоянную отдачу в маловодном году. р. Енисей – г. Саяногорск.

Год-модель: 1919/1920 в/х год. Приведен к $P = 95 \%$;
 $\Delta t = 2,63$ млн. с; $V_{плз.} = 7800$ млн. м³; $V_{нап.} = 7610$ млн. м³

Месяц	Средний за Δt расход, м ³ /с		Аккумуляция		Наполнение полезного объема водохранилища на конец Δt , $V_{нап.}$, млн. м ³
	$Q_{прит.}$, м ³ /с	$Q_{отд.}$, м ³ /с	Расход ΔQ , м ³ /с	Объем ΔV , млн. м ³	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
V	816	556	260	684	684
VI	1288	556	732	1925	2609
VII	1018	556	462	1214	3823
VIII	835	556	279	734	4557
IX	1496	556	940	2472	7029
X	777	556	221	581	7610
XI	208	556	-348	-915	6695
XII	83,9	556	-472	-1242	5453
I	29,2	556	-527	-1385	4068
II	15,8	556	-540	-1421	2647
III	12,4	556	-544	-1430	1217
IV	93,1	556	-463	-1217	0

В рассматриваемом примере это одно то же значение $Q_{зар.}^{нап.} = Q_{зар.}^{срб.} = 556$ м³/с, т. к. для выбранного года-модели пришлось пересчитать наполнение водохранилища (из-за третьего случая соотношения зарегулированных расходов при первоначальном расчете по формулам 2.1 и 2.2).

Затем, последовательно от начала года к его концу, для каждого месяца в графе 4 вычисляется расход аккумуляции

$$\Delta Q = Q_{прит.} - Q_{отд.};$$

в графе 5 вычисляется объем аккумуляции

$$V = \Delta Q \cdot \Delta t = \Delta Q \cdot 2,63.$$

и в графе 6 вычисляется наполнение водохранилища как нарастающая сумма объемов аккумуляции:

$$V_{\text{нап.}} = \sum \Delta V.$$

Значения в графе 6 показывают величину наполнения полезного объема водохранилища на конец каждого месяца расчетного водохозяйственного года.

По наибольшему и наименьшему значениям наполнения в графе 6 можно контролировать правильность расчетов. Наибольшее значение наполнения не должно превышать величину полезного объема водохранилища. К концу многоводной фазы наполнение, должно равняться величине полезного объема ($V_{\text{плз.}}$) или, в случае пересчета наполнения (как в рассматриваемом примере), равняться вычисленной по уравнению 2.3 величине наполнения ($V_{\text{нап.}}$). В конце водохозяйственного года значение наполнения в графе 6 должно равняться нулю, т. к. накопленная ранее вода полностью срабатывается. Из-за погрешностей вычислений возможно незначительное отклонение от значения $V_{\text{плз.}}$ или $V_{\text{нап.}}$ в конце наполнения и от нуля в конце сработки. Погрешности возникают из-за округления чисел и их суммирования в графе 6. Поэтому в процессе расчетов целесообразно поддерживать более высокую, чем принято в гидрологии, точность вычисляемых значений стока и округлять результаты расчетов уже после их завершения.

При расчете наполнения водохранилища задается начальное наполнение водохранилища – наполнение на начало первого расчетного интервала (первого месяца водохозяйственного года) или, что то же самое, на конец интервала, предшествующего первому (последнего месяца в году, предшествовавшем расчетному). При сезонном регулировании начальное наполнение обычно принимается равным мертвому объему водохранилища.

В учебной работе расчет ведется относительно полезного объема водохранилища и начальное наполнение, т. е. заполнение $V_{\text{плз.}}$ на начало мая 1919/20 в/х года, принято равным нулю. Это следует из пункта 3 правил регулирования, согласно которому полезный объем должен быть полностью сработан к концу межени, т. е. к концу апреля, предшествующего 1918/19 в/х года.

4) По результатам расчета регулирования стока в маловодном году строятся совмещенные графики естественных и зарегулированных расходов и график наполнения–сработки водохранилища (рис. 2.2).

По данным граф 1, 2 и 3 (табл. 2.7) строятся гидрографы естественных ($Q_{\text{приг.}}$) и зарегулированных ($Q_{\text{отд.}}$) среднемесячных расходов (в виде диаграмм), которые визуальнo отражают изменение стока реки в маловодном году в результате регулирующего влияния водохранилища.

По данным граф 1 и 6 строится хронологический график изменения наполнения полезного объема водохранилища ($V_{\text{нап.}}$) в течение маловодного года.

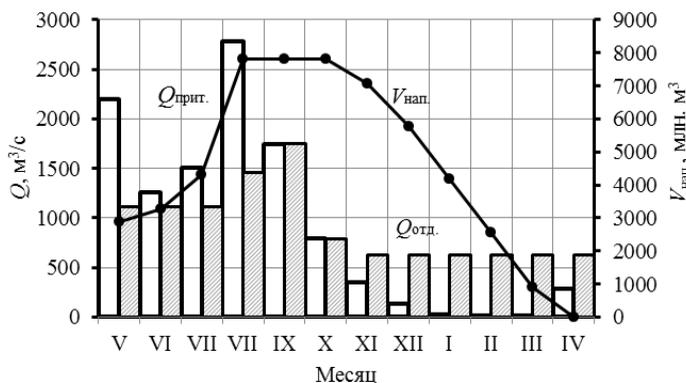


Рис. 2.2. Графики естественных и зарегулированных расходов р. Енисей в створе г. Саяногорск и наполнения водохранилища в маловодном 1919–1920 водохозяйственном году. (Сток приведен к обеспеченности $P = 95\%$).

При построении графиков на рис. 2.2 левая вертикальная ось – ось расходов; правая вертикальная ось – ось объема наполнения водохранилища.

2.3.2. Расчет сезонного регулирования в среднем по водности году (без приведения к обеспеченности $P = 50\%$)

1) Регулирование осуществляется для выбранного года-модели (1913/1914 в/х год) без приведения стока к обеспеченности $P = 50\%$.

В расчетном году по среднемесячным расходам (строка 2 табл. 2.6), вычисляют месячные и годовой объемы стока (строка 3).

2) По формулам 2.1 и 2.2 вычисляются зарегулированные расходы отдачи воды из водохранилища в период наполнения $Q_{зар.}^{нап.}$ и в период сработки $Q_{зар.}^{срб.}$.

Для вычисления в расчетном году выделяют многоводную и маловодную фазы стока. Принцип выделения тот же, что и в маловодном году (см. раздел 2.3.1 пункт 2). К многоводной фазе следует отнести месяцы со среднемесечным расходом, превышающим среднегодовой расход расчетного года или период, к концу которого полезный объем должен быть полностью заполнен. К маловодной фазе относят меженный период, в течение которого будет осуществляться сработка полезного объема, т. е. период со среднемесечными расходами меньше гарантированного. Между многоводной и маловодной фазами может оказаться период, в котором среднемесечные превышают гарантированный расход и близки к среднегодовому расходу. В этот период полезный объем уже полностью заполнен, но еще не используется для увеличения меженного стока, т. е. наполнение водохранилища остается постоянным. В табл. 2.6 выделенные периоды показаны цветом: многоводная фаза с мая по сентябрь ($n_{пол.} = 5$ месяцев), маловодная фаза с ноября по апрель ($n_{меж.} = 6$ месяцев).

Подсчитываются объемы речного стока за многоводный ($W_{пол.}$) и маловодный ($W_{меж.}$) периоды, а затем вычисляются зарегулированные расходы отдачи воды.

Зарегулированный расход периода наполнения

$$Q_{зар.}^{нап.} = \frac{W_{пол.} - V_{плз.}}{n_{пол.} \cdot 2,63} = \frac{26327 - 7800}{5 \cdot 2,63} = 1410 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.1'')$$

Вычисленное значение зарегулированного расхода превысило максимальную пропускную способность ГЭС ($Q_{зар.}^{нап.} > Q_{ГЭС}$), поэтому, в соответствии с пунктом 2 принятых правил регулирования, зарегулированный расход периода наполнения ограничивается максимальным расходом ГЭС: $Q_{зар.}^{нап.} = Q_{ГЭС} = 1112 \text{ м}^3/\text{с}$.

Зарегулированный расход периода сработки

$$Q_{зар.}^{срб.} = \frac{W_{меж.} - V_{плз.}}{n_{меж.} \cdot 2,63} = \frac{2293 + 7800}{6 \cdot 2,63} = 640 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.2'')$$

3) Расчет регулирования стока в среднем по водности году осуществляется в табличной форме (табл. 2.8). Расчет ведется последовательно от первого месяца водохозяйственного года (май 1913 года) до последнего (апрель 1914 года).

В графу 2 записывается среднемесячный расход притока воды в водохранилище ($Q_{\text{прит.}}$) из строки 1 табл. 2.6.

В графу 3 заносится значение расхода отдачи воды из водохранилища ($Q_{\text{отд.}}$), принятое для периода наполнения водохранилища (т. е. $Q_{\text{зар.}}^{\text{нап.}}$ или $Q_{\text{ГЭС}}$).

В графе 4 вычисляется расход аккумуляции ($\Delta Q = Q_{\text{прит.}} - Q_{\text{отд.}}$), а в графе 5 объем аккумуляции за расчетный месяц ($\Delta V = 2,63 \Delta Q$).

В графе 6 вычисляется общий (суммарный) объем аккумуляции воды от начала года, т. е. наполнение водохранилища на конец расчетного месяца ($V_{\text{нап.}} = \sum \Delta V$).

Таблица 2.8 – Расчет регулирования стока на постоянную отдачу в среднем по водности году.

р. Енисей – г. Саяногорск. Год: 1913/1914 в/х год.

$\Delta t = 2,63$ млн. с; $V_{\text{плз.}} = 7800$ млн. м³

Месяц	Средний за Δt расход, м ³ /с		Аккумуляция		Наполнение полезного объема водохранилища на конец Δt , $V_{\text{нап.}}$, млн. м ³
	$Q_{\text{прит.}}$, м ³ /с	$Q_{\text{отд.}}$, м ³ /с	Расход ΔQ , м ³ /с	Объем ΔV , млн. м ³	
1	2	3	4	5	6
V	2320	1112	1208	3177	3177
VI	1330	1112	218	573	3750
VII	1590	1112	478	1257	5008
VIII	2930	1868	1062	2792	7800
IX	1840	1840	0	0	7800
X	832	832	0	0	7800
XI	375	640	-265	-696	7104
XII	139	640	-501	-1317	5788
I	33.2	640	-606	-1595	4193
II	14.3	640	-625	-1645	2548
III	12.2	640	-627	-1650	898
IV	298	640	-342	-898	0

Объем аккумуляции воды в водохранилище не может превышать величину полезного объема водохранилища, потому в месяц, когда вычисляемое значение $V_{\text{нап.}}$ окажется больше $V_{\text{плз.}}$, значение

суммарного наполнения в графе 6 ограничивают величиной $V_{\text{плз.}}$. В табл. 2.8 это произошло в август, и вычисленное в графе 6 значение суммарного наполнения $V_{\text{нап.}} = 9789$ млн. м^3 заменено на значение $V_{\text{нап.}} = V_{\text{плз.}} = 7800$ млн. м^3 . В этом месяце, во избежание переполнения водохранилища, откроются эксплуатационные водосливы, т.е. начнутся холостые сбросы воды и расход отдачи увеличится. Он будет складываться из расходов воды через ГЭС и через водосливы. Поэтому, в месяц заполнения всего полезного объема, значения расхода отдачи и объема аккумуляции необходимо пересчитать.

Пересчет значений ΔV и $Q_{\text{отд.}}$ ведется «ходом назад» – от графы 6 к графе 3. После ограничения, в графе 6, объема наполнения величиной $V_{\text{плз.}}$, в графе 5 пересчитывается объем аккумуляции, как разница полезного объема и наполнения водохранилища на конец предыдущего месяца, т. е. определяем незаполненную часть полезного объема: $\Delta V_j = V_{\text{плз.}} - V_{\text{нап.,j-1}} = 7800 - 5008 = 2792$ млн. м^3 . Затем, в графе 4 вычисляется новое значение расхода аккумуляции: $\Delta Q_j = \Delta V_j / 2,63 = 2792 / 2,63 = 1062$ $\text{м}^3/\text{с}$; и в графе 3 вычисляется значение расхода отдачи с учетом работы водосливов: $Q_{\text{отд.,j}} = Q_{\text{прит.,j}} - \Delta Q_j = 2930 - 1062 = 1868$ $\text{м}^3/\text{с}$.

В последующие месяцы, если многоводная фаза не закончилась, до начала периода сработки, наполнение водохранилища остается постоянным и равным величине полезного объема (в табл. 2.8 это сентябрь и октябрь месяцы). Расчет регулирования в эти месяцы также ведется «ходом назад», но т.к. наполнение не меняется, то объем аккумуляции и расход аккумуляции будут равны нулю ($\Delta V = 0$ и $\Delta Q = 0$), а это значит, что расход отдачи в графе 3 будет равен расходу притока в графе 2 ($Q_{\text{прит.}} = Q_{\text{отд.}}$). В эти месяцы, если расход притока превышает $Q_{\text{ГЭС}}$, будут продолжаться холостые сбросы через водосливы (сентябрь). При расходах притока меньше $Q_{\text{ГЭС}}$ вся вода будет пропускаться через гидроагрегаты и использоваться полезно для выработки энергии (октябрь).

После начала маловодной фазы стока (ноябрь) в графу 3 заносится значение зарегулированного расхода периода сработки $Q_{\text{зар.}}^{\text{срб.}} = 640$ $\text{м}^3/\text{с}$ (639,6 $\text{м}^3/\text{с}$) и расчет ведется от графы 3 к графе 6, продолжаясь последовательно для всех месяцев до конца водохозяйственного года.

При правильных расчетах, в соответствии с пунктом 4 правил регулирования, объем наполнения в конце года должен быть равным

нулю. (Отклонения допустимы только в пределах погрешностей связанных с округлением чисел и их суммированием).

4) Результаты расчета регулирования стока в среднем по водности году, как и в маловодном, отображаются графически на рис. 2.3.

По данным граф 1, 2, 3 и 6 табл. 2.8 строятся совмещенные графики изменения в течение года естественных ($Q_{\text{приг.}}$) и зарегулированных ($Q_{\text{отд.}}$) расходов и график хода наполнения–сработки водохранилища ($V_{\text{нап.}}$).

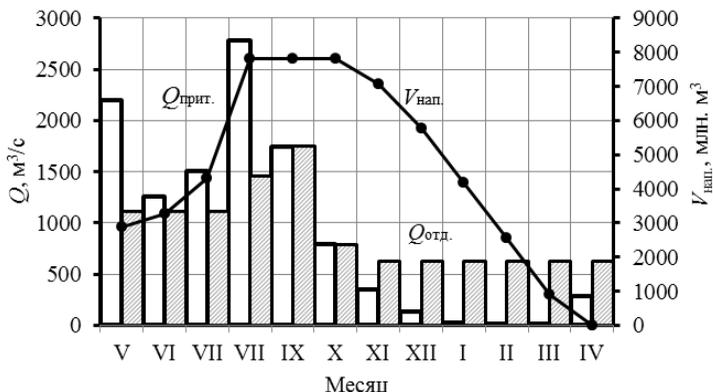


Рис. 2.3. Графики естественных и зарегулированных расходов р. Енисей в створе г. Саяногорск и наполнения водохранилища в среднем по водности 1913–1914 водохозяйственном году.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отражаются основные результаты расчета регулирования стока в маловодном и среднем по водности годах.

Приводится расчетное значение полезного объема водохранилища, необходимого для обеспечения заданного гарантированного расхода с установленной вероятностью.

Дается характеристика зарегулированного водного режима в маловодном и среднем по водности годах: сроки и продолжительность периодов наполнения и сработки водохранилища, особенности хода наполнения и сработки, величины зарегулированных расходов в период наполнения и сработки водохранилища, наличие фазы холостых сбросов, сроки и продолжительность периода работы водосливов,

изменение величин максимальных и минимальных естественных расходов притока в результате регулирования стока в маловодном и среднем по водности годах и другие особенности в изменении водного режима реки в результате регулирования стока.

3. Расчет и построение обобщенной водохозяйственной характеристики

Цель работы: освоить метод определения полезного объема водохранилища обобщенным способом (по статистическим характеристикам стока) и процедуру построения обобщенной водохозяйственной характеристики (зависимости полезного объема водохранилища от величины гарантированного расхода).

Задача: произвести расчет координат и построить график зависимости полезного объема водохранилища ($V_{плз.}$) от величины коэффициента регулирования стока (α) при заданной расчетной обеспеченности (P %) гарантированного расхода.

Исходные данные:

1) Средние месячные расходы воды ($Q_{j,i}$, м³/с) в расчетном створе реки за репрезентативный период продолжительностью N лет (табл. 3.1, графы 1–14).

Данные о стоке реки в расчетном створе сгруппированы по водохозяйственным годам. Продолжительность периода в учебном задании ограничивается 10–13 годами.

2) Заданное значение расчетной обеспеченности (P , %) гарантированного расхода отдачи воды из водохранилища. В учебном задании расчет ведется для обеспеченности $P(Q_{гар.}) = 95$ %.

Работа состоит из теоретической и расчетной частей.

Последовательность выполнения работы

3.1. Понятие «Обобщенная водохозяйственная характеристика» и методика ее расчета. (Теоретическая часть)

Для выполнения работы необходимо изучить материал учебника [2] (разделы 8.2, 9.1, 9.2) и практикума [3] (разделы 4.1, 4.2, 5.3, 6.1), использовать материалы лекционных и практических занятий.

В теоретической части необходимо дать описание понятий «Обобщенная водохозяйственная характеристика», полезный объем водохранилища ($V_{плз.}$), относительная величина полезного объема (β), гарантированный расход ($Q_{гар.}$), коэффициент регулирования (α).

Таблица 3.1 – Средние месячные расходы воды р. Волги в створе п. Поляны
за период с 1932/33 по 1941/42 водохозяйственные годы

№	Водохозяйственный год	Средние месячные расходы, м ³ /с												Средний расход	
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	за год	за месяць
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
1	1932–1933	12400	41700	16100	4890	3220	2590	3420	4680	2100	3100	2300	2000	8210	3140
2	1933–1934	12300	21700	11200	4890	3310	3940	5270	3700	2260	2500	2040	1850	6250	3310
3	1934–1935	6130	26700	11200	4700	3120	3200	2940	4430	2400	2250	1870	1740	5890	2960
4	1935–1936	10300	18900	10000	4580	5450	4650	7050	7500	3110	2910	2600	2410	6620	4470
5	1936–1937	4420	30400	10300	3190	1930	1740	2530	3270	1620	2420	1920	1670	5450	2250
6	1937–1938	12800	12900	7240	4230	3430	2540	2390	2080	1500	1640	1580	1560	4490	2330
7	1938–1939	9450	24400	8110	400	2340	1780	1760	2190	1570	1460	1300	1430	4980	1980
8	1939–1940	8810	25500	11400	4320	2480	2000	2640	2820	1500	2130	1630	1400	5550	2310
9	1940–1941	12000	25000	10800	6350	2860	2220	2430	2130	1800	2240	2000	1690	5960	2640
10	1941–1942	3890	25500	27700	9180	3970	3100	3690	3000	2930	2600	2740	2660	7580	3760
Средний		9250	25300	12400	5020	3210	2780	3410	3580	2080	2330	2000	1840	6100	2920
Наибольший		12800	41700	16100	9180	5450	4650	7050	7500	3110	3100	2740	2660	8210	4470
Наименьший		3890	12900	7240	3190	1930	1740	1760	2080	1500	1460	1300	1400	4490	1980

Следует указать условия, при которых осуществляется сезонное и многолетнее регулирование стока (исходя из соотношения гарантированного и среднегодового расходов, коэффициента регулирования и модульного коэффициента годового стока); описать метод (формулы и номограммы) вычисления относительных значений полезного объема водохранилища при сезонном регулировании, сезонной и многолетней составляющих полезного объема при многолетнем регулировании.

3.2. Расчет координат и построение графика обобщенной водохозяйственной характеристики

3.2.1. Расчет статистических характеристик годового и меженного стока

По данным таблицы среднемесячных расходов воды за расчетное N -летие устанавливаем маловодный (меженный) период водохозяйственного года в жестких (постоянных) границах для всех лет и вычисляем необходимые характеристики годового и меженного стока.

Для этого:

1) По исходным данным о среднемесячных расходах воды вычисляется среднегодовой расход (Q_i) за каждый водохозяйственный год и формируется ряд среднегодовых расходов продолжительностью N лет (графа 15 табл. 3.1).

2) Для каждого месяца и для года в целом вычисляются средние за многолетний период расходы (строка «Средний»):

По полученному ряду среднегодовых расходов (Q_i) и данным о среднемесячных расходах воды за каждый j -ый месяц года ($Q_{j,i}$) вычисляются средние расходы за расчетный период N лет (среднемноголетние расходы):

$Q_{ср,j}$ – средний многолетний расход j -го месяца (строка «Средний» графы 2–14);

$Q_{ср.г.}$ – средний многолетний годовой расход (строка «Средний» графа 15).

Табл. 3.1 также дополняют сведениями о наибольших и наименьших расходах воды за каждый месяц и за год (строки «Наибольший» и «Наименьший»).

3) Сравнивая значения среднего многолетнего годового расхода ($Q_{\text{ср.г.}}$) и значения средних многолетних месячных расходов ($Q_{\text{ср.м.}}$) каждого из 12 месяцев, устанавливаем границы маловодного (меженного) периода водохозяйственного года и его продолжительность $n_{\text{м}}$ в месяцах.

К маловодному периоду относятся месяцы со средним многолетним месячным расходом меньшим среднего многолетнего годового расхода ($Q_{\text{ср.м.}} < Q_{\text{ср.г.}}$). В рассматриваемом примере это период с июля (VII) по март (III). Продолжительность меженного периода $n_{\text{м}} = 9$ месяцев.

Установленные границы меженного периода распространяются на все годы (жестко закрепляются для всех лет).

4) Для каждого водохозяйственного года вычисляется средний за установленный меженный период расход ($Q_{\text{м.г.}}$). Эти расходы формируют ряд среднемеженных расходов продолжительностью N лет (графа 16 табл. 3.1).

5) По ряду среднегодовых расходов (Q_i) и по ряду среднемеженных расходов ($Q_{\text{м.г.}}$) определяют основные статистические характеристики годового и меженного стока:

– средний многолетний годово́й расход:

$$Q_{\text{ср.г.}} = (\sum Q_i) / N;$$

– средний многолетний расход за межень:

$$Q_{\text{ср.м.}} = (\sum Q_{\text{м.г.}}) / N;$$

– средний многолетний годово́й объём стока (в млн. м³):

$$W_{\text{ср.г.}} = 31,56 Q_{\text{ср.г.}};$$

(31,56 – среднее количество млн. секунд в году)

– средний многолетний объём стока за межень (в млн. м³):

$$W_{\text{ср.м.}} = 2,63 n_{\text{м}} Q_{\text{ср.м.}};$$

(2,63 – среднее количество млн. секунд в месяце)

– коэффициент вариации годового стока ($Cv_{\text{г.}}$);

– коэффициент вариации меженного стока ($Cv_{\text{м.}}$);

– модульный коэффициент расчетной обеспеченности годового стока ($k_{г.р}$);

– модульный коэффициент расчетной обеспеченности меженного стока ($k_{м.р}$).

Модульные коэффициенты определяются для заданного значения расчетной обеспеченности $P = 95\%$ по таблицам распределения Пирсона III типа или трехпараметрического распределения Крицкого–Менкеля при значении коэффициента асимметрии $C_s = 2C_v$ [6]. (В учебном задании, в связи с незначительной продолжительностью рядов стока, соотношение $C_s = 2C_v$ принимается без дополнительного расчетного обоснования, как наиболее характерное соотношение для годового и меженного стока крупных и средних рек России).

Также вычисляются:

– средняя доля меженного стока в годовом:

$$m = W_{ср.м}/W_{ср.г.};$$

– относительная продолжительность межени в году:

$$t_m = n_m/12.$$

Вычисленные характеристики годового и меженного стока приводятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики годового и меженного стока р. Волги в створе п. Поляны.

Продолжительность ряда $N = 10$ лет, с 1932/33 по 1941/42 в/х годы.
 $n_m = 9$ мес. (с VII по III); $P = 95\%$

Характеристика	Годовой сток	Меженный сток
Норма: Q , м ³ /с	6100	2920
W , млн. м ³	192450	69120
C_v	0,19	0,27
C_s/C_v	2	2
$k_{95\%}$	0,71	0,60
t_m	–	0,75
m	–	0,36

3.2.2. Расчет координат обобщенной водохозяйственной характеристики

Обобщенной водохозяйственной характеристикой называют графическую зависимость между значением гарантированного расхода ($Q_{\text{гар.}}$) при заданной его обеспеченности и величиной полезного объема водохранилища ($V_{\text{плз.}}$), для конкретного расчетного створа реки.

Для расчета координат зависимости используются обобщенные методы расчета полезного объема водохранилища. В этих методах значение гарантированного расхода выражается через его относительную величину – коэффициент регулирования (α):

$$\alpha = Q_{\text{гар.}}/Q_{\text{ср.г.}}$$

а полезный объем водохранилища выражается через относительную величину полезного объема (β):

$$\beta = V_{\text{плз.}}/W_{\text{ср.г.}}$$

Расчет координат зависимости осуществляется в табл. 3.3 в следующей последовательности:

1) В графе 1 табл. 3.3 задаются значения коэффициента регулирования α в диапазоне от 0,2 до 0,9 (шаг 0,1) с обязательным включением в расчет значения $\alpha = k_{\text{г.р.}}$, которое соответствует крайней степени сезонного регулирования – годовичному регулированию. Значение $\alpha = k_{\text{г.р.}}$ является границей между сезонным и многолетним видами регулирования. В примере это значение $\alpha = 0,71$. (Если $k_{\text{г.р.}}$ превышает ближайшее кратное 0,1 значение α на 0,02 и менее, то круглое значение α в графу 1 можно не вносить. Поэтому в рассматриваемом примере значение $\alpha = 0,70$ пропущено. Также следует помнить, что теоретическим пределом увеличения α является значение $\alpha = 1,0$).

2) Для условий сезонного регулирования стока, т. е. при значениях $\alpha \leq k_{\text{г.р.}}$, расчет относительной величины полезного объема β ведется по формуле:

$$\beta_{\text{сез.}} = \alpha t_{\text{м}} - m k_{\text{м.р.}}, \quad (3.1)$$

где $k_{\text{м.р.}}$ – модульный коэффициент межennaleго стока расчетной обеспеченности.

Таблица 3.3 – Расчет координат обобщенной водохозяйственной характеристики р. Волги в створе п. Поляны.

Продолжительность ряда $N = 10$ лет, с 1932/33 по 1941/42 в/х годы.

$$W_{\text{ср.г.}} = 192450 \text{ млн. м}^3; P = 95 \%; C_s = 2C_v; r(1) = 0,3$$

α	αt_m	$mk_{m,P}$	$\beta_{\text{сез.}}$	μ	$\beta_{\text{с.с.}}$	$\beta_{\text{мн.с.}}$	β	$V_{\text{плз.}}$ млн. м ³	$V_{\text{с.с.}}$ млн. м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,2	0,15	0,22	-0,07				-0,07	-13470	
0,3	0,23	0,22	0,01				0,01	1925	
0,4	0,30	0,22	0,08				0,08	15400	
0,5	0,38	0,22	0,16				0,16	30790	
0,6	0,45	0,22	0,23				0,23	44260	
0,71	0,53	0,22	0,32				0,32	61580	(61580)
0,8	0,60			0,26	0,34	0,20	0,54	103920	65430
0,9	0,68			0,31	0,37	0,55	0,92	177050	71210

В графе 2 таблицы 3.3 для заданных α вычисляются значения (αt_m) – относительные величины гарантированного стока за межень при разных значениях α .

В графу 3 заносится значение ($mk_{m,P}$) – относительная величина меженного стока расчетной обеспеченности (постоянное значение).

В графе 4 вычисляются $\beta_{\text{сез.}}$ – относительные значение полезного объема при сезонном регулировании, как разница значений в графах 2 и 3.

При небольших значениях α можно получить отрицательные значения $\beta_{\text{сез.}}$. Это означает, что естественная зарегулированность стока реки превышает данное значение α , и для обеспечения гарантированного расхода с заданной расчетной вероятностью необходимости в регулировании, т. е. в создании регулирующей емкости нет.

3) Для условий многолетнего регулирования стока, т. е. при значениях $\alpha > k_{r,P}$, значение β вычисляется как сумма двух величин: относительной величины многолетней составляющей полезного объема ($\beta_{\text{мн.с.}}$) и сезонной составляющей полезного объема ($\beta_{\text{с.с.}}$):

$$\beta = \beta_{\text{мн.с.}} + \beta_{\text{с.с.}} \quad (3.2)$$

4) Сезонная составляющая ($\beta_{\text{с.с.}}$) вычисляется по формуле

$$\beta_{c.c.} = \alpha t_m - m + m[(1 - k_{m,p})/(1 - k_{г,p})](1 - \alpha), \quad (3.3)$$

где $k_{г,p}$ – модульный коэффициент годового стока расчетной обеспеченности.

Для табличного расчета формула (3.3) представляется в виде:

$$\beta_{c.c.} = \alpha t_m - \mu. \quad (3.3')$$

При такой записи расчетной формулы

$$\mu = \{m - m[(1 - k_{m,p})/(1 - k_{г,p})](1 - \alpha)\} \quad (3.4)$$

и представляет собой относительную величину стока за межень, по которой вычисляется сезонная составляющая полезного объема в условиях многолетнего регулирования.

В графу 2 табл. 3.3 заносятся значения (αt_m). Графы 3 и 4 при расчете полезного объема водохранилища многолетнего регулирования не используются.

В графу 5 заносятся значения μ , вычисленные по формуле (3.4) при значениях α , соответствующих многолетнему регулированию стока.

В графе 6 вычисляются значения $\beta_{c.c.}$ – относительные величины сезонной составляющей полезного объема, как разница значений в графах 2 и 5.

В случае, если коэффициенты вариации годового и меженного стока равны между собой ($Cv_{г} = Cv_{м}$), то сезонная составляющая полезного объема вычисляется по более простой формуле:

$$\beta_{c.c.} = \alpha(t_m - m) = \alpha t_m - \alpha m, \quad (3.5)$$

т. е. в этом случае в графе 5 значение $\mu = \alpha m$.

5) Многолетняя составляющая полезного объема ($\beta_{мн.с.}$) определяется по номограммам в зависимости от значения α , коэффициента вариации годового стока ($Cv_{г}$) и расчетной обеспеченности гарантированного стока $P(Q_{гар.})$. При выборе номограммы учитывается асимметричность распределения годового стока, т. е. соотношение Cs/Cv , и степень внутрирядной связанности годового стока ($r(1)$).

В учебном задании для определения $\beta_{мн.с.}$ используются номограммы Гуглия, т. е. принимается наиболее характерное для годового

стока крупных и средних рек России значение коэффициента корреляции между смежными членами ряда стока $r(1) = 0,3$ и соотношение $Cs/Cv = 2$. Номограммы приведены в [1] на стр. 85, 86; в [2] на стр. 124.

Значения $\beta_{\text{мн.с.}}$, снятые с номограммы для расчетной обеспеченности $P(Q_{\text{гар.}}) = 95\%$, заносятся в графу 7 табл. 3.3.

б) В графе 8 табл. 3.3 группируются все вычисленные значения относительной величины полезного объема β :

при $\alpha \leq k_{г.р}$ – это $\beta_{\text{сез.}}$ (из графы 4, без отрицательных значений);

при $\alpha > k_{г.р}$ – это $\beta = \beta_{\text{мн.с.}} + \beta_{\text{с.с.}}$ (сумма граф 6 и 7).

В графе 9, умножая β (из графы 8) на средний многолетний объем годового стока $W_{\text{ср.г.}}$, вычисляются абсолютные величины полезного объема водохранилища ($V_{\text{плз.}}$):

$$V_{\text{плз.}} = \beta W_{\text{ср.г.}} \quad (3.6)$$

В графе 10, для условий многолетнего регулирования, дополнительно приводятся абсолютные величины сезонной составляющей полезного объема ($V_{\text{с.с.}}$). Объем сезонной составляющей вычисляется умножением $\beta_{\text{с.с.}}$ (из графы 6) на $W_{\text{ср.г.}}$:

$$V_{\text{с.с.}} = \beta_{\text{с.с.}} W_{\text{ср.г.}} \quad (3.7)$$

3.2.3. Построение графика обобщенной водохозяйственной характеристики

1) По результатам расчетов в табл. 3.3 строится график обобщенной водохозяйственной характеристики реки для расчетного створа (рис. 3.1). График строится в виде зависимости величины полезного объема водохранилища от коэффициента регулирования стока: $V_{\text{плз.}} = f(\alpha)$.

По оси ординат графика откладываются значения $V_{\text{плз.}}$ (в млн. м³ или в км³).

Ось абсцисс графика является осью значений коэффициента регулирования α . Размер оси от 0 до 1,0. (*Коэффициент регулирования α это относительное (нормированное) значение гарантированного расхода: $\alpha = Q_{\text{гар.}}/Q_{\text{ср.г.}}$*). На графике указывается для какой расчетной обеспеченности гарантированного расхода он построен.

2) По данным граф 1 и 9 табл. 3.3, в поле координат графика для значений $\alpha \leq k_{г.р.}$, строится отрезок (1–2) зависимости $V_{плз.} = f(\alpha)$. Эта часть графика показывает изменение полезного объема ($V_{плз.}$) с увеличением коэффициента регулирования стока (α) в диапазоне сезонного регулирования. Абсцисса точки (2), соответствующая значению $\alpha = k_{г.р.}$, является границей между зонами сезонного и многолетнего регулирования.

В рассматриваемом примере отрицательное значение полезного объема при значении $\alpha = 0,2$ указывает, что естественная зарегулированность речного стока, при отсутствии водохранилища, уже превышает 0,2. Поэтому график $V_{плз.} = f(\alpha)$ построен для значений $\alpha \geq 0,3$.

3) По данным граф 1 и 9, для значений $\alpha > k_{г.р.}$, строится отрезок (2–3) зависимости $V_{плз.} = f(\alpha)$, показывающий увеличение полезного объема с увеличением α в зоне многолетнего регулирования.

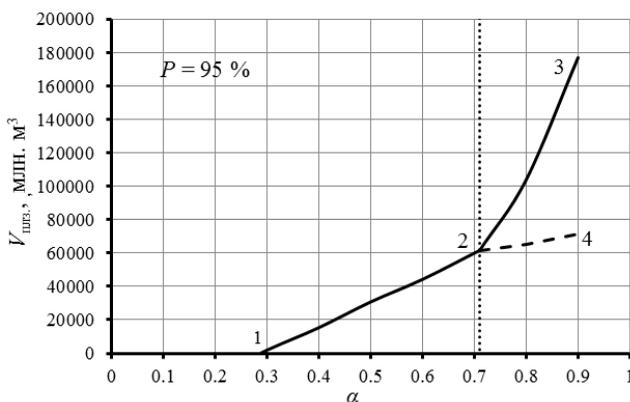


Рис. 3.1. Обобщенная водохозяйственная характеристика р. Волги в створе п. Поляны. Расчетный период: с 1932/33 по 1941/42 в/х годы; $Q_{ср.г.} = 6100 \text{ м}^3/\text{с}$; $P = 95 \%$; $C_s = 2C_v$; $r(1) = 0,3$.

4) Дополнительно, по данным из графы 10, на графике проводится линия (2–4), которая показывает, как разделяется весь полезный объем водохранилища при многолетнем регулировании на многолетнюю и сезонную составляющие. Так как эта линия должна выходить из точки (2) зависимости $V_{плз.} = f(\alpha)$, то для удобства ее построения в графу 10 вносится соответствующая координата – значение $V_{плз.}$ при $\alpha = k_{г.р.}$ (записано в графе 10 в скобках).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является график обобщенной водохозяйственной характеристики реки в расчетном створе (рис. 3.1) с информацией о параметрах стока принятых для расчета и построения графика (табл. 3.2).

4. Расчет оптимальных водноэнергетических характеристик водохранилища ГЭС

Цель работы: освоить методику расчета основных водноэнергетических характеристик ГЭС (гарантированной мощности – $N_{\text{гар.}}$; средней годовой выработки электроэнергии – $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$) в зависимости от от высотной отметки уровня сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.}}$) при заданном варианте нормального подпорного уровня (НПУ).

Задачи: 1) Вычислить гарантированную мощность ГЭС ($N_{\text{гар.}}$) при различных значениях глубины сработки водохранилища ($h_{\text{срб.}}$);

2) Построить график изменения $N_{\text{гар.}}$ от высотной отметки уровня сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.}}$) и определить оптимальную отметку сработки ($Z_{\text{опт.}}$), т. е. уровень мертвого объема (УМО) по гарантированной мощности;

3) Вычислить среднюю многолетнюю годовую выработку электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$) при различных значениях глубины сработки водохранилища ($h_{\text{срб.}}$);

4) Построить график изменения $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$ от высотной отметки уровня сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.}}$) и определить оптимальную отметку сработки ($Z_{\text{опт.}}$), т. е. уровень мертвого объема (УМО) по средней годовой выработке электроэнергии.

Исходные данные: При проектных расчетах в состав исходных данных, необходимых для определения основных водноэнергетических характеристик ГЭС, входят гидрологические материалы, получаемые при полевых гидрометрических работах и обработке картографических материалов, а также характеристики гидроэнергетического оборудования ГЭС. В учебном задании вместо фактических данных используются условные характеристики водохранилища, реки и оборудования ГЭС.

Перечень исходных данных необходимых для расчета:

1) топографические характеристики водохранилища:

– кривая площадей водохранилища $F = f(Z)$;

– объемная кривая водохранилища $V = f(Z)$;

2) кривая расходов в нижнем бьефе гидроузла $Q = f(Z_{\text{н.б.}})$ – зависимости расходов воды от высотной отметки уровня воды в нижнем бьефе гидроузла;

(В учебной работе топографические характеристики и кривая расходов являются графическими симуляциями, построенными в условной системе высотных отметок Z (усл. м).)

3) обобщенная водохозяйственная характеристика, построенная для расчетного створа гидроузла, (в учебной работе используется график $V_{\text{плз.}} = f(\alpha)$ из практического задания № 3);

4) коэффициент мощности гидроагрегатов ГЭС ($K_N = 8,5$);

5) коэффициент зимних расходов в нижнем бьефе гидроузла, (в учебной работе «зимний коэффициент» $K_{\text{зим.}} = 0,65$);

6) число часов использования установленной мощности (в учебной работе принимается значение $T_y = 5000$ час.);

7) значение потерь стока $q = 0$ и значение потерь напора $\Delta h_{\text{пот.}} = 0$.
(В учебной работе потери стока и потери напора приняты равными нулю для сокращения числа граф в расчетных таблицах и упрощения расчетов).

Общие положения к выполнению работы

Работа состоит из трех частей и заключения.

В первой, теоретической, части дается описание понятий «основные водноэнергетические характеристики водохранилища ГЭС», метода их расчета и принципа определения оптимальных значений.

Во второй части осуществляется подготовка условных топографических характеристик водохранилища и условной кривой расходов в нижнем бьефе, которые заменят в расчете отсутствующие фактические гидрологические материалы.

В третьей, основной, части работы для условной отметки нормального подпорного уровня (НПУ) осуществляется расчет значений основных водноэнергетических показателей ГЭС при различной глубине сработки водохранилища, определяются оптимальные уровни сработки и соответствующие им значения показателей энергоотдачи.

В заключение, для принятого варианта высотной отметки НПУ приводятся:

1) значение оптимального уровня сработки водохранилища, т. е. рекомендуемый уровень мертвого объема, установленный по величине гарантированной мощности ГЭС и соответствующее значение гарантированной мощности;

2) оптимального уровня сработки водохранилища, т. е. рекомендуемый уровень мертвого объема, установленный по величине сред-

ней годовой выработки электроэнергии и соответствующее значение годовой выработки;

3) значение показателя эффективности использования энергопотенциала реки.

Последовательность выполнения работы

4.1. Основные водноэнергетические характеристик водохранилища ГЭС и метод их расчета. (Теоретическая часть)

Для выполнения теоретической части работы необходимо изучить материалы главы 11 учебников [1] и [2], раздела 6.2 практикума [3], лекционных занятий и кратко изложить сведения по следующим вопросам:

1) какие показатели энергоотдачи ГЭС называются основными водноэнергетическими характеристиками водохранилища ГЭС;

2) единицы измерения основных водноэнергетических характеристик водохранилища ГЭС;

3) вид и составляющие уравнений для расчета основных водноэнергетических характеристик водохранилища ГЭС;

4) перечень исходных данных необходимых для расчета основных водноэнергетических характеристик водохранилища ГЭС;

5) принцип определения оптимального уровня (глубины) сработки водохранилища ГЭС.

4.2. Построение условных топографических характеристик водохранилища и условной кривой расходов в нижнем бьефе

4.2.1. Создание системы условных высотных отметок

Для расчета координат и построение графиков зависимости объема воды в водохранилище от уровня воды у плотины – объемной кривой $V = f(Z)$ и зависимости между расходом и уровнем воды в нижнем бьефе – кривой расходов $Q = f(Z_{н.б.})$ создается условная система высотных отметок.

При формировании системы условных высотных отметок:

1) Назначаем условную отметку уровня воды в нижнем бьефе ($Z_{н.б.}$) при расходе равном гарантированному. Например, будем счи-

тать, что расходу $Q_{\text{гар}}$ соответствует уровень воды $Z_{\text{н.б.}} = 100$ усл. м.

2) Зададим условное значение наибольшей глубины водного потока в створе нижнего бьефа ($h_{\text{н.б.}}$) при прохождении $Q_{\text{гар}}$.

Например, будем считать, что $h_{\text{н.б.}} = 5$ м.

3) Вычисляем условную низшую отметку дна русла реки в нижнем бьефе $Z_0 = 100 - 5 = 95$ (усл. м).

4) Назначаем условное значение величины максимального напора воды на гидроузле (H_{max}). В рассматриваемом примере принято $H_{\text{max}} = 60$ м. (Для учебной работы, в целях упрощения вычислений, рекомендуются три варианта H_{max} : 30, 60 и 90 метров).

5) Вычисляем условную отметку нормального подпорного уровня водохранилища $Z_{\text{НПУ}} = Z_{\text{н.б.}} + H_{\text{max}} = 100 + 60 = 160$ (усл. м).

В результате, в рассматриваемом примере водноэнергетический расчет будет производиться для условного водохранилища с отметкой НПУ = 160 усл. м. Принятые условные значения высотных отметок приводятся в табл. 4.1.

В вариантах заданий условные $Z_{\text{н.б.}}$, $h_{\text{н.б.}}$, H_{max} могут изменяться.

Таблица 4.1 – Параметры условного водохранилища

№ п/п	Параметр	Значение
1	$Z_{\text{н.б.}}$	100 усл. м
2	Z_0	95 усл. м
3	H_{max}	60, м
4	НПУ	160, усл. м
5	α	0,8

4.2.2. Построение условных топографических характеристик

Сначала строится график кривой площадей условного водохранилища $F = f(Z)$.

Для построения условной кривой площадей:

1) Делаем допущение, что водохранилище осуществляет многолетнее регулирование с коэффициентом регулирования $\alpha = 0,8$.

2) По принятому значению коэффициента регулирования α и графику Обобщенной водохозяйственной характеристики (работа № 3, рис. 3.1) определяем соответствующую величину полезного объема условного водохранилища $V_{\text{плз.}} = 105000$ млн. м³.

3) Считаем, что полезному объему соответствует предельное зна-

чение оптимальной глубины сработки водохранилища $h_{\text{прд.}} = H_{\text{max}}/3$. (Практический опыт водноэнергетических расчетов и эксплуатации водохранилищ ГЭС показывает, что оптимальная глубина их сработки не превышает $1/3$ от H_{max}).

4) Полагая, что форму водной массы в пределах полезного объема можно рассматривать как усеченную призму, вычисляем среднюю площадь водного зеркала сливной призмы $F_{\text{ср.}} = V_{\text{плз.}}/h_{\text{пред.}}$.

В учебном примере

$$F_{\text{ср.}} = 105000 \text{ млн. м}^3/20 \text{ м} = 5250 \text{ млн. м}^2 = 5250 \text{ км}^2.$$

Вычисленному значению средней площади водного зеркала сливной призмы соответствует середина высоты усеченной призмы, т. е. $1/2$ предельной глубины сработки. Следовательно, площади $F_{\text{ср.}}$ соответствует отметка уровня воды $Z_{\text{ср.}} = \text{НПУ} - 0,5h_{\text{прд.}}$.

В примере $Z_{\text{ср.}} = 160 - 0,5 \cdot 20 = 150$ (усл. м).

В результате, в принятой условной системе высот, имеем координаты двух точек условной кривой площадей:

отметке $Z_{\text{ср.}} = 150$ усл. м соответствует площадь $F_{\text{ср.}} = 5250 \text{ км}^2$, а при отметке $Z_0 = 95$ усл. м площадь водного зеркала $F_0 = 0 \text{ км}^2$, т. к. Z_0 — это отметка дна русла реки в расчетном створе.

По координатам этих двух точек, допуская линейный вид кривой площадей водохранилища, строим условную зависимость $F = f(Z)$ (рис. 4.1). Зависимость экстраполируется до НПУ.

Полученная кривая площадей водохранилища используется для построения условной кривой объемов водохранилища. Координаты зависимости $V = f(Z)$ вычисляются в табл. 4.2. методом призм (раздел 5.1 пособия [4]).

Расчет координат объемной кривой условного водохранилища:

1) Диапазон изменения высотных отметок уровня воды в верхнем бьефе от $Z_0 = 95$ усл. м до $Z_{\text{НПУ}} = 160$ усл. м разбивается на интервалы, т. е. на слои водной массы. В графу 2 табл. 4.2 заносятся высотные отметки границ слоев. (Толщина слоев может изменяться.)

2) По кривой площадей, для границ слоев, по их высотной отметке, устанавливается величина площади водного зеркала (графа 3).

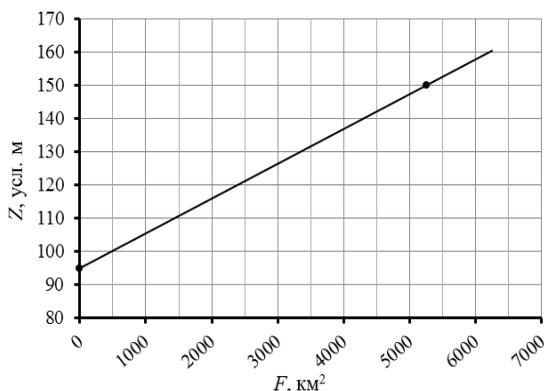


Рис. 4.1. Условная кривая площадей $F = f(Z)$ условного водохранилища.

Таблица 4.2 – Расчет координат объемной кривой условного водохранилища

№ слоя	Z_i , м	F_i , км ²	$F_{cp,i}$, км ²	ΔZ , м	ΔV_i , млн.м ³	V_i , млн.м ³	V_i , км ³
1	2	3	4	5	6	7	8
0	95	0,0	–	–	–	0,0	0,0
1	105	954,5	477,3	10	4772,7	4772,7	4,8
2	115	1909,1	1431,8	10	14318,1	19090,8	19,1
3	125	2863,6	2386,4	10	23863,6	42954,4	43,0
4	135	3818,2	3340,9	10	33409,0	76363,4	76,4
5	145	4772,7	4295,4	10	42954,5	119317,9	119,3
6	155	5727,3	5250,0	10	52499,9	171817,8	171,8
7	160	6204,5	5965,9	5	29829,5	201647,4	201,6

3) Для каждого слоя определяется средняя площадь водного зеркала F_{cp} , км² (графа 4), толщина слоя ΔZ , м. (графа 5) и вычисляется объем воды в слое ΔV , млн. м³ (графа 6 табл. 4.2).

Средняя площадь слоя вычисляется как полусумма площадей на отметках нижней и верхней границ слоя: $F_{cp,i} = (F_{i-1} + F_i)/2$.

Толщина слоя вычисляется как разница высотных отметок, ограничивающих слой сверху и снизу: $\Delta Z_i = (F_i - F_{i-1})$.

Объем воды в слое равен произведению средней площади на толщину слоя: $\Delta V_i = F_{cp,i} \cdot \Delta Z_i$.

4) В графе 7 табл. 4.2 вычисляется объем воды в водохранилище при различной высоте уровня воды (V_i , млн. м³). Объем V_i вычисляется как нарастающая сумма объемов слоев воды ΔV_i при повышении уровня от отметки Z_0 , при которой $V = 0$, до отметки НПУ.

5) Значения в графах 2 и 7 табл. 4.2 являются координатами условной кривой объемов водохранилища. По этим координатам строится график зависимости $V = f(Z)$ (рис. 4.2).

При построении объемной кривой очень больших водохранилищ, как в рассматриваемом примере, целесообразно значения объемов из млн. м³ перевести в км³ (графа 8).

Также следует иметь в виду, что в гидрологической практике для отображения высотных отметок уровня воды принято использовать ось ординат.

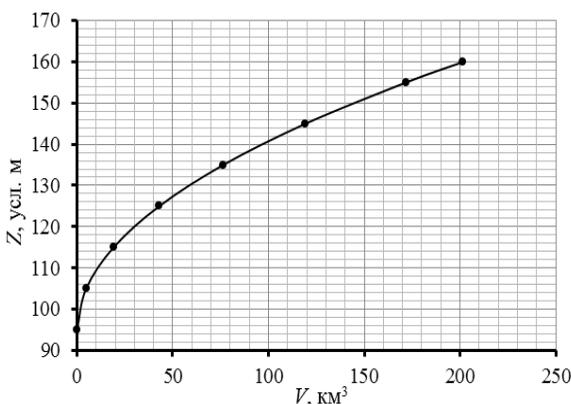


Рис. 4.2. Условная объемная кривая $V = f(Z)$ условного водохранилища.

4.2.3. Построение условной кривой расходов в нижнем бьефе гидроузла

Построение условной кривой расходов $Q = f(Z_{н.б.})$ производится на основе допущений, принятых при создании условной систем высот, и с учетом общих закономерностей, свойственных зависимости между расходом и уровнем воды в речном русле, известных из гидрометрической практики.

1) Согласно созданной условной системе высот имеются координаты двух точек кривой расходов в нижнем бьефе:

1-я точка соответствует дну речного русла с высотной отметкой $Z_0 = 95$ усл. м и расходом воды $Q = 0$;

2-я точка соответствует уровню воды в нижнем бьефе $Z_{н.б.} = 100$ усл. м с расходом $Q = Q_{гар.}$.

Гарантированный расход определяем по принятому для условных построений значению коэффициента регулирования $\alpha = 0,8$ и среднему многолетнему расходу ($Q_{ср.г.}$) из материалов работы № 3 «Расчет и построение обобщенной водохозяйственной характеристики».

В примере, $Q_{гар.} = \alpha \cdot Q_{ср.г.} = 0,8 \cdot 6100 = 4880$ (м³/с).

Для отражения выпуклого характера, свойственного кривым расхода, добавим координаты еще одной, третьей, точки. Координаты третьей точки назначаются исходя из предположения, что с увеличением расхода воды в 2,0 раза глубина водного потока увеличится в 1,5 раза. (Это допущение опирается на общую закономерность, свойственную кривым расхода, и обусловленную увеличением ширины водного потока при повышении уровня воды. В речном русле увеличение площади поперечного сечения потока и, соответственно, расхода происходит более интенсивно по сравнению с глубиной потока.)

3-я точка имеет координаты:

уровень $Z = Z_0 + 1,5(Z_{н.б.} - Z_0) = 95 + 1,5 \cdot (100 - 95) = 102,5$ (усл. м);

расхода $Q = 2Q_{гар.} = 9760$ (м³/с).

2) Координаты всех трех точек кривой расходов воды в нижнем бьефе приведены в табл. 4.3. По этим координатам строится условная кривая расходов (рис. 4.3), которая в учебном задании заменит реальную зависимость $Q = f(Z_{н.б.})$, получаемую при полевых гидрометрических работах.

Таблица 4.3 – Координаты условной кривой расходов в нижнем бьефе гидроузла

№ точки	Координаты	
	Z, усл. м	Q, м ³ /с
1	95	0
2	100	4880
3	102,5	9760

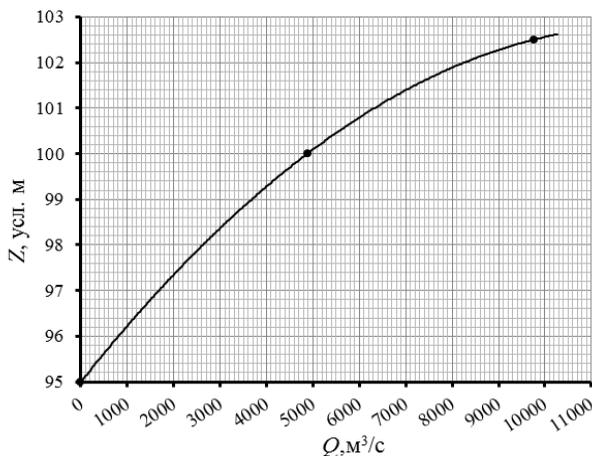


Рис. 4.3 Условная кривая расходов в нижнем бьефе гидроузла.

4.3. Расчет основных водноэнергетических характеристик при различной глубине сработки водохранилища

Для расчета используются исходные данные, включая подготовленные в разделе 4.2 условную кривую объемов (рис. 4.2) и условную кривую расходов (рис. 4.3), а также обобщенную водохозяйственную характеристику, построенную в работе № 3 (рис. 3.1).

4.3.1. Расчет гарантированной мощности

1) Гарантированная мощность ГЭС ($N_{\text{гар.}}$) рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{гар.}} = K_N (Q_{\text{гар.}} - q) (H - \Delta h_{\text{пот.}}). \quad (4.1)$$

В учебном задании, для упрощения, потери стока (q) и потери напора ($\Delta h_{\text{пот.}}$) приняты равными нулю. Поэтому расчет осуществляется по формуле:

$$N_{\text{гар.}} = K_N Q_{\text{гар.}} H, \quad (4.1')$$

где $N_{\text{гар.}}$ – гарантированная мощность, кВт; K_N – коэффициент мощ-

ности гидроагрегатов ГЭС; $Q_{\text{гар.}}$ – гарантированный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напор на ГЭС (при отдаче равной $Q_{\text{гар.}}$), м.

Расчет реализуется в табличной форме (табл. 4.4).

В графе 1 табл. 4.4 задаются варианты (6–8 значений) глубины сработки водохранилища h_i в диапазоне от $h = 0$ до $h = 0,5H_{\text{max}}$. (H_{max} – максимальный напор на плотине водохранилища, принят в разделе 4.2.1).

Далее, для каждого варианта сработки водохранилища h_i , расчет выполняется последовательно от графы 1 к графе 14.

В графе 2 вычисляется высотная отметка уровня сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.}i}$), соответствующая каждому заданному значению глубины сработки:

$$Z_{\text{срб.}i} = \text{НПУ} - h_i.$$

В графе 3 по объемной кривой $V = f(Z)$ (рис. 4.2) вычисляется объем наполнения водохранилища V_i , соответствующий каждой отметки сработки ($Z_{\text{срб.}i}$).

В графе 4 вычисляется полезный объем ($V_{\text{плз.}i}$), которым будет располагать водохранилище при различных вариантах глубины сработки (h_i):

$$V_{\text{плз.}i} = V_{\text{НПУ}} - V_i.$$

Таблица 4.4 – Расчет гарантированной мощности ГЭС
в зависимости от глубины сработки водохранилища.

$P = 95 \%$; НПУ = 160 усл. м; $V_{\text{НПУ}} = 201650$ млн. м³; $Q_{\text{ср.г.}} = 6100$ м³/с; $K_{\text{зим.}} = 0,65$; $K_N = 8,5$

Глубина сработки, м	$Z_{\text{срб.}}^{\text{усл. м}}$	Емкость вдхр, млн. м ³			α	$Q_{\text{гар.}}$	Средние уровни бьефов, усл. м				$H_{\text{ср.}}^{\text{м}}$	$N_{\text{гар.}}^{\text{МВт}}$	
		V_i	$V_{\text{плз.}}$	$V_{\text{ср.}}$			$Z_{\text{ср.в.б.}}$	Нижний бьеф					
								$Z_{\text{н.б.л.}}$	$Q_{\text{фикт.}}$	$Z_{\text{н.б.з.}}$			$Z_{\text{ср.н.б.}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	160	201641	0	201641,0	0,28	1708	160,00	97,03	2628	98,00	97,52	62,5	907105
5	155	171812	29829	186726,4	0,49	2989	157,66	98,36	4598	99,78	99,07	58,6	1488576
10	150	144369	57272	173005,0	0,66	4026	155,48	99,31	6194	100,92	100,11	55,4	1894591
15	145	119313	82328	160476,8	0,76	4636	153,31	99,81	7132	101,46	100,64	52,7	2075757
20	140	96643	104998	149141,8	0,80	4880	151,22	100,00	7508	101,66	100,83	50,4	2090160
25	135	76359	125282	138999,9	0,83	5063	149,23	100,14	7789	101,79	100,96	48,3	2077184
30	130	58461	143180	130051,2	0,86	5246	147,39	100,27	8071	101,92	101,10	46,3	2064387

Примечание: расчетная обеспеченность ($P = 95 \%$) соответствует обеспеченности гарантированного расхода, принятой при построении Обобщенной водохозяйственной характеристики

Величина полного объема водохранилища при НПУ ($V_{\text{НПУ}}$) устанавливается по объемной кривой $V = f(Z)$ и отметке НПУ водохранилища, назначенной в разделе 4.2.1. (Значения НПУ и $V_{\text{НПУ}}$ обязательно указываются в заголовке табл. 4.4).

В графе 5 вычисляется среднее наполнение водохранилища ($V_{\text{ср.}}$) за период сработки каждого варианта полезного объема:

$$V_{\text{ср.}i} = V_i + 0,5V_{\text{плз.}i} \quad (4.2)$$

или

$$V_{\text{ср.}i} = V_{\text{НПУ}} - 0,5V_{\text{плз.}i}$$

В графу 6 заносятся значения коэффициента регулирования (α_i), соответствующие разным вариантам полезного объема. Коэффициент регулирования α определяется по величине полезного объема $V_{\text{плз.}i}$ (из графы 4) и Обобщенной водохозяйственной характеристике $V_{\text{плз.}} = f(\alpha)$ (рис. 3.1 из учебного задания № 3).

В графу 7 заносятся значения гарантированного расхода ($Q_{\text{гар.}i}$), которые вычисляются по коэффициенту регулирования α (графа 6) и среднему многолетнему расходу реки ($Q_{\text{ср.г.}}$) в расчетном створе:

$$Q_{\text{гар.}i} = \alpha_i \cdot Q_{\text{ср.г.}}$$

Величина среднемноголетнего расхода $Q_{\text{ср.г.}}$ указывается в заголовке расчетной табл. 4.4.

В графу 8, для каждого варианта сработки, записываются значения среднего уровня верхнего бьефа $Z_{\text{ср.в.б.}}$, которые определяются по среднему наполнению $V_{\text{ср.}}$ (графа 5) и объемной кривой водохранилища $V = f(Z)$ (рис. 4.2).

В графу 9 записываются значения уровня воды в нижнем бьефе в летний период ($Z_{\text{н.б.л.}}$), определяемые по значению гарантированного расхода $Q_{\text{гар.}i}$ и кривой расходов в нижнем бьефе $Q = f(Z)$ (рис. 4.3).

В графе 10 вычисляется значение фиктивного расхода ($Q_{\text{фikt.}}$):

$$Q_{\text{фikt.}i} = (Q_{\text{гар.}i})/K_{\text{зим.}}$$

Фиктивный расход используется для определения уровня воды в нижнем бьефе при прохождении расхода $Q_{\text{гар},i}$ в зимних условиях, т. е. в условиях подпора воды от ледовых явлений:

Принятое значение коэффициента $K_{\text{зим}}$ указывается в заголовке расчетной табл. 4.4.

В графу 11 заносятся значения уровня воды в нижнем бьефе в зимний период ($Z_{\text{н.б.з.}}$), определяемые по значению фиктивного расхода $Q_{\text{фikt},i}$ и кривой расходов в нижнем бьефе $Q = f(Z)$ (рис. 4.3).

В графе 12, для каждого варианта гарантированного расхода, вычисляется средний уровень нижнего бьефа ($Z_{\text{ср.н.б.}}$), как среднее значение между летним $Z_{\text{н.б.л.}}$ (графа 9) и зимним $Z_{\text{н.б.з.}}$ (графа 11) уровнями:

$$Z_{\text{ср.н.б.}i} = (Z_{\text{н.б.л.}i} + Z_{\text{н.б.з.}i})/2.$$

В графе 13, для каждого варианта сработки, вычисляются средние напоры на ГЭС ($H_{\text{ср.}}$), как разница между средним уровнем верхнего бьефа $Z_{\text{ср.в.б.}}$ (графа 8) и средним уровнем нижнего бьефа $Z_{\text{ср.н.б.}}$ (графа 12):

$$H_{\text{ср.}i} = Z_{\text{ср.в.б.}i} - Z_{\text{ср.н.б.}i}.$$

В графе 14 вычисляется значение гарантированной мощности $N_{\text{гар}}$ (кВт) для всех вариантов глубины сработки водохранилища h_i .

Расчет производится по формуле (4.1') как произведение коэффициента мощности $K_N = 8,5$, гарантированного расхода $Q_{\text{гар},i}$ (графа 7) и среднего напора $H_{\text{ср.}i}$ (графа 13).

Значение коэффициента мощности K_N указывается в заголовке расчетной табл. 4.4.

При вычислении $N_{\text{гар}}$, в случае больших чисел, переходят от размерности [кВт] к размерности [МВт] (умножением на 10^{-3}) или [ГВт] (умножением на 10^{-6}).

Примечание. Осуществляя расчет по объемной кривой $V = f(Z)$ или кривой расходов $Q = f(Z)$ допустимо использовать аналитические аппроксимирующие уравнения (полиномы второй и третьей степени), полученные с помощью программы *Excel*.

В этом случае следует иметь в виду: 1) в уравнениях, которые получены с помощью *Excel*, аргументом является переменная, откладываемая по оси абсцисс графика; 2) при больших численных значениях

ях аргумента могут возникать значительные погрешности в вычислениях из-за округления коэффициентов уравнения. Поэтому, в случае применения уравнений, следует контролировать результаты вычислений по графикам и, при необходимости, увеличивать число разрядов в коэффициентах при аргументе.

2) Для иллюстрации и анализа результатов расчета строится график (рис. 4.4) изменения гарантированной мощности $N_{\text{гар.}}$ (графа 14 табл. 4.4) в зависимости от высотной отметки уровня сработки водохранилища $Z_{\text{срб.}}$ (графа 2).

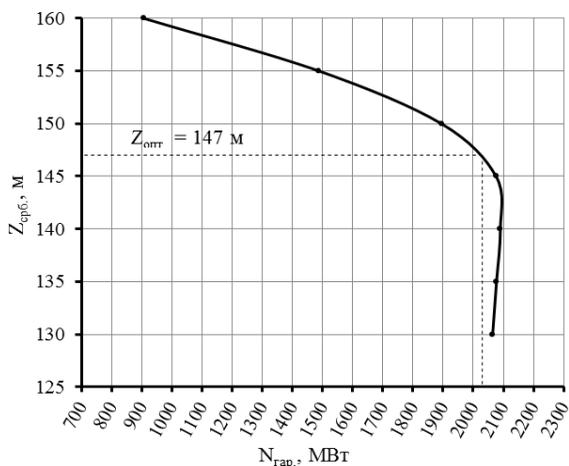


Рис. 4.4. Зависимости гарантированной мощности ($N_{\text{гар.}}$) от отметки уровня сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.}}$).

По зависимости $N_{\text{гар.}} = f(Z_{\text{срб.}})$ определяется оптимальная отметка сработки водохранилища ($Z_{\text{срб.опт.}}$), т. е. УМО, и соответствующее этой отметке значение гарантированной мощности.

За оптимальное значение отметки сработки принимается высотная отметка, нижней граница зоны наиболее интенсивного увеличения мощности с понижением отметки сработки водохранилища. На графике $N_{\text{гар.}} = f(Z_{\text{срб.}})$ точка, соответствующая оптимальной отметке сработки, отделяет зону значительного приращения $N_{\text{гар.}}$ при увеличении глубины сработки от зоны небольших приращений $N_{\text{гар.}}$ (см. рис. 4.4). Эта точка располагается выше отметки, соответствующей максимуму гарантированной мощности, т. к. при определении оптимальной отметки сработки руководствуются практическими, а не исключительно математическими соображениями.

3) После построения и анализа графика $N_{\text{гар.}} = f(Z_{\text{срб.}})$ формулируются результаты расчетов.

В рассматриваемом примере результаты такие:
при НПУ = 160 усл. м оптимальная отметка сработки водохранилища по величине гарантированной мощности $Z_{\text{срб.опт.}} = 147$ усл. м.
Глубина сработки 13,0 м.

При отметке УМО = 147 усл. м гарантированная мощность $N_{\text{гар.}} = 2030$ МВт.

4.3.2. Расчет средней годовой выработки электроэнергии

1) Средняя годовая выработка электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} = K_N (Q_{\text{исп.}} - q) (H - \Delta h_{\text{пот.}}) 8760. \quad (4.3)$$

Если считать, что потери стока (q) и потерь напора ($\Delta h_{\text{пот.}}$) равны нулю, как в учебной работе, то расчет ведется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} = K_N Q_{\text{исп.}} \cdot H \cdot 8760, \quad (4.3')$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$ – среднее количество электроэнергии вырабатываемой ГЭС за год, кВт·ч; K_N – коэффициент мощности; $Q_{\text{исп.}}$ – используемый на ГЭС расход, м³/с; H – средний за год напор на ГЭС, м; 8760 – количество часов в году.

Расчет реализуется в табличной форме (табл. 4.5) и ведется последовательно от графы 1 к графе 16.

Графы 1, 2, 3, 4 табл. 4.5 соответствуют графам табл. 4.4. Если задаются одинаковые варианты глубины сработки водохранилища h_i , то значения в этих графах совпадают.

Таблица 4.5 – Расчет средней годовой выработки электроэнергии в зависимости от глубины сработки водохранилища.

$P = 95\%$; НПУ=160 усл. м; $V_{\text{НПУ}} = 201650$ млн. м³; $Q_{\text{ср.г.}} = 6100$ м³/с; $K_{\text{зим.}} = 0,65$; $K_N = 8,5$

Глубина сработки, h , м.	$Z_{\text{срб.}}$, усл. м	Емкость водохранилища, млн. м ³			α	δ	η	$Q_{\text{исп.}}$	Средние уровни бьефов, усл. м				$H_{\text{ср.}}$, м	$\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$, ГВт·ч	$\mathcal{E}_{\text{г.вол.}}$, ГВт·ч	
		V_i	V_i	V_i					$Z_{\text{ср.в.б.}}$	Нижний бьеф						
										$Z_{\text{н.б.л.}}$	$Q_{\text{фikt.}}$	$Z_{\text{н.б.з.}}$				$Z_{\text{срн.б.}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	160	201641	0	201641	0,28	6,26	0,74	4513	160,00	99,71	6942	101,36	100,54	59,5	19980	27000
5	155	171812	29829	192692	0,49	3,58	0,85	5183	158,55	100,23	7974	101,87	101,05	57,5	22191	26107
10	150	144369	57272	184459	0,66	2,65	0,90	5488	157,31	100,45	8443	102,07	101,26	56,1	22906	25451
15	145	119313	82328	176942	0,76	2,31	0,92	5610	156,12	100,53	8631	102,14	101,34	54,8	22885	24875
20	140	96643	104998	170141	0,80	2,19	0,93	5671	155,00	100,57	8725	102,18	101,38	53,6	22642	24346
25	135	76359	125282	164056	0,83	2,11	0,94	5732	153,95	100,62	8819	102,21	101,41	52,5	22422	23853
30	130	58461	143180	158687	0,86	2,04	0,95	5793	152,99	100,66	8912	102,24	101,45	51,5	22232	23402

В графе 5, для каждого варианта полезного объема, вычисляется среднее наполнение водохранилища в течение года ($V_{\text{ср}}$):

$$V_{\text{ср},i} = V_i + 0,7V_{\text{плз},i}. \quad (4.4)$$

Формула (4.4) для расчета среднего наполнения отличается от формулы (4.2). Учитывается, что, в течение всего года, кроме периода сработки есть еще период наполнения и период полностью заполненного водохранилища, Поэтому значения среднего наполнения за год (графа 5 табл. 4.5) и за период сработки (графа 5 табл. 4.4) не совпадают.

В графу 6 заносятся значения коэффициента регулирования (α), которые вычисляются, как и в табл. 4.4, по величине полезного объема $V_{\text{плз},i}$ (графа 4) и Обобщенной водохозяйственной характеристике $V_{\text{плз}} = f(\alpha)$ из учебного задания № 3. (При одинаковых вариантах глубины сработки водохранилища h_s , значения α в табл. 4.4 и 4.5 совпадают).

В графе 7 табл. 4.5, для каждого варианта сработки водохранилища, вычисляются значения коэффициента турбинного расхода (δ) в зависимости от принятого для расчета числа часов использования установленной мощности (T_y), по формуле:

$$\delta_i = 8760 / (T_y \cdot \alpha_i).$$

Число часов использования установленной мощности ГЭС (T_y) задается в исходных данных к расчету. (Значение T_y связано с ролью ГЭС в покрытии графика нагрузки энергосети.)

В графу 8 табл. 4.5 заносятся значения коэффициента использования стока η , определяемые по номограмме в зависимости от коэффициента турбинного расхода δ (графа 7) и коэффициента регулирования стока α (графа 6). Номограмма зависимости $\eta = f(\delta, \alpha)$ приводится в [2] на стр. 158 и в [3] на стр. 108.

В графе 9, по значению коэффициента использования стока η (из графы 8) и среднему многолетнему годовому расходу $Q_{\text{ср},г}$, вычисляется средний многолетний расход используемый на ГЭС для получения электроэнергии ($Q_{\text{исп},i}$):

$$Q_{\text{исп},i} = \eta_i \cdot Q_{\text{ср},г}.$$

Далее, в графах 10–14, вычисляются средние уровни верхнего и нижнего бьефов. Расчет осуществляется также как это делалось при расчете гарантированной мощности в табл. 4.4, но при других значениях среднего наполнения ($V_{\text{ср.}}$) и при других расходах отдачи воды в нижний бьеф ($Q_{\text{исп.}}$).

В графу 10 заносятся значения среднего уровня верхнего бьефа ($Z_{\text{ср.в.б.}}$), которые определяются по среднему наполнению $V_{\text{ср.}}$ (графа 5) и объемной кривой водохранилища $V = f(Z)$ (рис. 4.2).

В графу 11 заносятся значения уровня воды в нижнем бьефе в летний период ($Z_{\text{н.б.л.}}$), определяемые по значению используемого расхода $Q_{\text{исп.л}}$ (графа 9) и кривой расходов в нижнем бьефе $Q = f(Z)$ (рис. 4.3).

В графе 12 вычисляется значение фиктивного расхода ($Q_{\text{фикт.}}$), необходимое для определения уровня воды в нижнем бьефе в зимних условиях:

$$Q_{\text{фикт.}i} = Q_{\text{исп.}i} / K_{\text{зим.}}$$

В графу 13 заносятся значения уровня воды в нижнем бьефе в зимний период ($Z_{\text{н.б.з.}}$), определяемые по значению фиктивного расхода $Q_{\text{фикт.}i}$ (графа 12) и кривой расходов в нижнем бьефе (рис. 4.3).

В графе 14 вычисляется средний уровень нижнего бьефа ($Z_{\text{ср.н.б.}}$) как средний между летним $Z_{\text{н.б.л.}}$ (графа 11) и зимним $Z_{\text{н.б.з.}}$ (графа 13) уровнями:

$$Z_{\text{ср.н.б.}} = (Z_{\text{н.б.л.}} + Z_{\text{н.б.з.}}) / 2.$$

В графе 15 вычисляется средний напор $H_{\text{ср.}}$, как разница между средними уровнями верхнего $Z_{\text{ср.в.б.}}$ (графа 10) и нижнего $Z_{\text{ср.н.б.}}$ (графа 14) бьефов:

$$H_{\text{ср.}i} = Z_{\text{ср.в.б.}i} - Z_{\text{ср.н.б.}i}.$$

В графе 16 вычисляется значение средней годовой выработки электроэнергии (кВт·ч) для всех вариантов глубины сработки водохранилища h_i .

Расчет производится по формуле (4.3') как произведение коэффициента мощности $K_N = 8,5$, используемого расхода $Q_{\text{исп.}i}$ (графа 9), среднего напора $H_{\text{ср.}i}$ (графа 15) и числа часов в году 8760.

В графе 17 вычисляется значение средней годовой выработки электроэнергии «по водотоку» ($\mathcal{E}_{г.вод.}$), т. е. в предположении что весь сток реки будет пропущен через гидроагрегаты ГЭС и использован для выработки электроэнергии.

Расчет $\mathcal{E}_{г.вод.}$ также осуществляется по формуле (4.3'), только вместо используемого расхода ($Q_{исп.}$) берется значение среднего годового расхода ($Q_{ср.г.}$) при всех вариантах сработки водохранилища. Значение напора (H), как и при расчете средней годовой выработки ($\mathcal{E}_{ср.г.}$), изменяется в зависимости от глубины сработки водохранилища, т. е. берется из графы 15 табл. 4.5.

При вычислении $\mathcal{E}_{ср.г.}$ и $\mathcal{E}_{г.вод.}$, при больших численных значениях целесообразно перейти от размерности [кВт·ч] к размерности [МВт·ч] (умножением на 10^{-3}) или даже к размерности [ГВт·ч] (умножением на 10^{-6}).

2) По результатам расчетов строятся график изменения годовой выработки электроэнергии $\mathcal{E}_{ср.г.}$ (графа 16 табл. 4.5) в зависимости от высотной отметки уровня сработки водохранилища $Z_{срб.}$ (графа 2) и совмещенный с ним график изменения выработки по водотоку $\mathcal{E}_{вод.}$ (графа 17). Графики показаны на рис. 4.5.

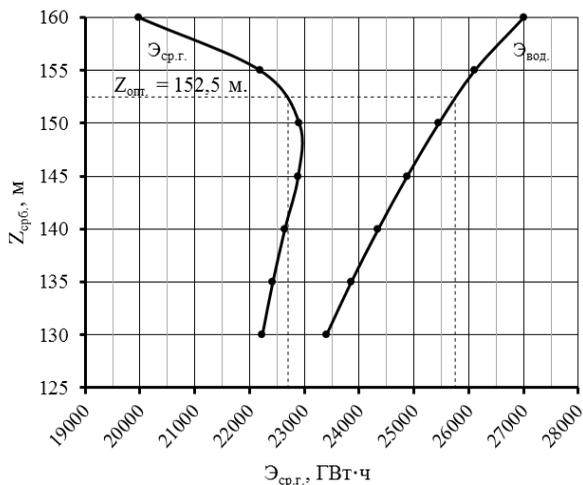


Рис. 4.5. Зависимости средней годовой выработки электроэнергии ($\mathcal{E}_{ср.г.}$) от отметки сработки водохранилища ($Z_{срб.}$).

По графику зависимости $\mathcal{E}_{ср.г.} = f(Z_{срб.})$ устанавливают оптимальную отметку сработки водохранилища $Z_{срб.опт.}$, т. е. отметку УМО, по

величине средней годовой выработке электроэнергии и соответствующую этой отметке выработку.

Принцип определения $Z_{\text{срб.опт.}}$ по годовой выработке аналогичен принципу ее определения по гарантированной мощности (см. пункт 2 раздела 4.3.1). За оптимальный уровень сработки принимается высотная отметка нижней границ зоны наиболее интенсивного увеличения выработки электроэнергии при понижении уровня, до которого срабатывается водохранилище.

Следует иметь в виду, что оптимальные значения уровня сработки водохранилища, установленные по гарантированной мощности ($N_{\text{гар.}}$) и по средней годовой выработке электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$), могут не совпадать.

Для установленной по графику $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} = f(Z_{\text{срб.}})$ оптимальной глубины сработки водохранилища определяется значение средней годовой выработки электроэнергии ($\mathcal{E}_{\text{ср.г.}}$).

По графику $\mathcal{E}_{\text{вод.}} = f(Z_{\text{срб.}})$, для оптимального уровня сработки, определяется значение выработки по водотоку ($\mathcal{E}_{\text{вод.}}$) и оценивается эффективность использования энергopotенциала реки ($\mathcal{E}_{\text{ф}}$, в %):

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = (\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} / \mathcal{E}_{\text{г.вод.}}) \cdot 100\%.$$

3) После построения и анализа графика $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} = f(Z_{\text{срб.}})$ приводятся результаты расчетов.

В рассматриваемом примере результаты такие.

При НПУ = 160 усл. м оптимальная отметка уровня сработки водохранилища по величине средней годовой выработки электроэнергии $Z_{\text{срб.опт.}} = 152,5$ усл. м.

Глубина сработки 7,5 м.

При отметке УМО = 152,5 усл. м:

средняя годовая выработка электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{ср.г.}} = 22700$ ГВт-ч;

выработка электроэнергии по водотоку $\mathcal{E}_{\text{г.вод.}} = 25750$ ГВт-ч;

эффективность использования гидроэнергopotенциала $\mathcal{E}_{\text{ф}} = 88$ %

гарантированная мощность $N_{\text{гар.}} = 1730$ МВт (см. рис. 4.4),

на 15 % меньше по сравнению с $N_{\text{гар.}} = 2030$ МВт при УМО = 147 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы являются значения оптимальных высотных отметок уровней сработки водохранилища и соответствующие им значения гарантированной мощности и годовой выработки электроэнергии, которые установлены после анализа графиков на рис. 4.4 и рис. 4.5, построенных по результатам сделанных расчетов.

5. Трансформация гидрографа весеннего половодья расчетной обеспеченности $P = 0,01$ % с гарантийной поправкой водохранилищем ГЭС

Цель работы: освоить методику расчета пропуска половодья/паводка расчетной обеспеченности через водохранилище с комплексом гидротехнических сооружений включающих гидроэлектростанцию.

Задачи: 1) Вычислить средние суточные расходы отдачи воды в нижний бьеф при пропуске половодья расчетной обеспеченности через водохранилище и построить гидрограф зарегулированного стока;

2) Определить значение максимального зарегулированного расхода отдачи воды из водохранилища и величину срезки (уменьшения) максимального естественного расхода при прохождении половодья через водохранилище;

3) Рассчитать средние суточные значения уровня воды в водохранилище и построить хронологический график изменения уровня воды в водохранилище при прохождении половодья через водохранилище;

4) Определить наивысший уровень воды в водохранилище (форсированный подпорный уровень – ФПУ) и величину «форсировки» уровня (превышение форсированного уровня над нормальным подпорным уровнем).

Исходные данные, необходимые для расчета пропуска весеннего половодья через водохранилище и трансформации гидрографа половодья, представлены в форме табл. 5.1. и включают в себя:

1) высотная отметка нормального подпорного уровня водохранилища: НПУ, абс. м;

2) высотная отметка уровня мертвого объема водохранилища: УМО, абс. м;

3) высотная отметка уровня открытия водосливов: $Z_{откр.}$, абс. м (при отсутствии значения $Z_{откр.}$ принимается условие, что отметка открытия водосливов совпадает с нормальным подпорным уровнем, т. е. $Z_{откр.} = \text{НПУ}$);

4) значение полной (или максимальной) пропускной способности ГЭС: $Q_{ГЭС}$, $\text{м}^3/\text{с}$;

5) координаты характерных точек расчетного гидрографа весенне-го половодья обеспеченностью $P = 0,01 \%$ (с гарантийной поправкой), т.е координаты характерных точек зависимости $Q = f(t)$, где Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – среднесуточный расход притока в водохранилище, t – дата;

6) координаты характерных точек объемной кривой водохранилища, т. е. координаты зависимости $V = f(Z)$, где V (км^3) – объем воды в водохранилище, Z (абс. м) – отметка уровня воды в водохранилище;

7) координаты характерных точек кривой пропускной способности эксплуатационных водосливов плотины водохранилища, т. е. координаты зависимости $Q_{\text{вдсл.}} = f(Z)$, где $Q_{\text{вдсл.}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) – расход воды через водосливы; Z (абс. м) – отметка уровня воды в водохранилище.

(В учебном работе данные по расчетному гидрографу, объемной кривой водохранилища и кривой пропускной способности водосливов приводятся в виде координат отдельных точек исключительно в целях сокращения объема исходной информации).

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета трансформации гидрографа весеннего половодья расчетной обеспеченности водохранилищем ГЭС

НПУ = 750 м; УМО = 735 м; $Z_{\text{откр.}} = 750$ м; $Q_{\text{ГЭС}} = 800$ $\text{м}^3/\text{с}$					
$Q = f(t)$		$V = f(Z)$		$Q_{\text{вдсл.}} = f(Z)$	
Дата	$Q_{0,01\%}$ с Г.П., $\text{м}^3/\text{с}$	Z , абс. м	V , км^3	Z , абс. м	$Q_{\text{вдсл.}}$, $\text{м}^3/\text{с}$
31 мая	800	735	6,80	745	0
1 июня	1000	740	8,36	754	3200
7 июня	6000	760	17,66	757	5000
9 июня	10000	780	30,98	758	6000
13 июня	12500	800	48,63		
19 июня	7600				
22 июня	6800				
29 июня	1000				

Общие положения к выполнению работы

Работа состоит из трех частей и заключения.

В первой, теоретической, части дается описание целей и задач расчета пропуска половодья или паводка через водохранилище; тре-

бований к величине расчетного гидрографа в зависимости от расчетного случая и класса гидротехнических сооружений гидроузла; условий по начальному наполнению водохранилища; ограничений по максимальному уровню верхнего бьефа; приводятся расчетное уравнение, даются пояснения по его составляющим и этапам расчета.

Во второй части осуществляется предварительная подготовка исходных данных – построение графиков расчетного гидрографа половодья, объемной кривой водохранилища и кривой пропускной способности водосливов по координатам опорных точек из таблицы исходных данных.

В третьей, основной, части работы делается расчет пропуска половодья через водохранилища и строится график зарегулированного гидрографа отдачи воды в нижний бьеф (трансформированного водохранилищем гидрографа половодья) и график хода уровня воды в водохранилище в период пропуска половодья.

В заключении приводятся результаты расчета по изменению максимального расхода, по режиму уровня и величине форсированного уровня воды в водохранилище при пропуске расчетного половодья.

Последовательность выполнения работы

5.1. Цели и метод расчета трансформации половодья водохранилищем. (Теоретическая часть)

Для выполнения теоретической части работы необходимо изучить материалы главы 15 учебника [1] и учебника [2], раздела 9.1 практикума [3], лекционных занятий и кратко изложить сведения по следующим вопросам:

- 1) Какой нормативный документ устанавливает требования к расчету пропуска половодья и паводка через водохранилище.
- 2) С какой целью осуществляются расчеты пропуска половодья и паводка через водохранилище и какие задачи при этом решаются.
- 3) От чего зависит расчетная обеспеченность гидрографа притока в водохранилище, по которому осуществляется расчет.
- 4) Вид и составляющие уравнения для расчета пропуска половодья/паводка через водохранилище, последовательность и этапы расчета.
- 5) От чего зависят условия по начальному наполнению водохранилища при расчете пропуска, условия по ограничению наибольшего

уровня воды в водохранилище при пропуске половодья/паводка расчетной обеспеченности.

б) Перечень исходных данных необходимых для расчета пропуска половодья/паводка через водохранилище.

5.2. Предварительные графические построения

В учебном задании данные по расчетному гидрографу $Q = f(t)$, объемной кривой водохранилища $V = f(Z)$ и кривая расходов водослива $Q_{\text{вдсл.}} = f(Z)$ приведены в виде координат отдельных точек (табл. 5.1), поэтому для их использования в расчете трансформации половодья водохранилищем строятся соответствующие графики.

1) По координатам характерных точек гидрографа половодья (табл. 5.1) строится сглаженное графическое изображение расчетного гидрографа притока воды в водохранилище за период половодья (рис. 5.1).

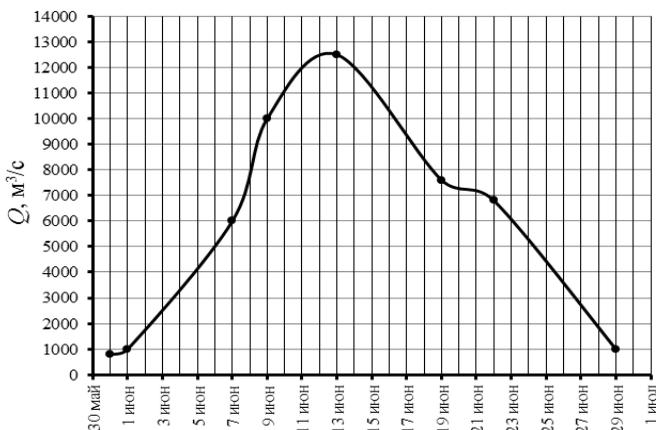


Рис. 5.1. Гидрограф весеннего половодья в створе плотины водохранилища расчетной обеспеченностью $P = 0,01\%$ с г.п.

При построении графика зависимость $Q = f(t)$ масштаб оси времени (ось абсцисс) выбирается таким, чтобы на ней можно было определить положение каждого суток и снять с графика значение соответствующего среднесуточного расхода.

2) По координатам точек объемной кривой водохранилища (табл. 5.1) строится график объемной кривой – зависимости $V = f(Z)$ (рис. 5.2).

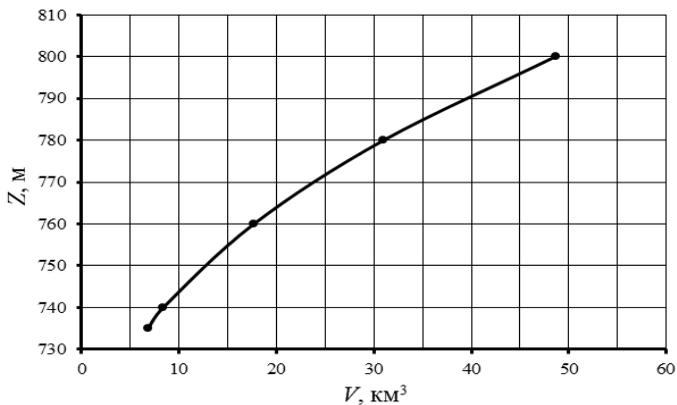


Рис. 5.2. Объемная кривая водохранилища $V=f(Z)$.

3) По координатам точек кривой пропускной способности водосливов (табл. 5.1) производится построение графика зависимости $Q_{\text{вдсл.}} = f(Z)$ (рис. 5.3).

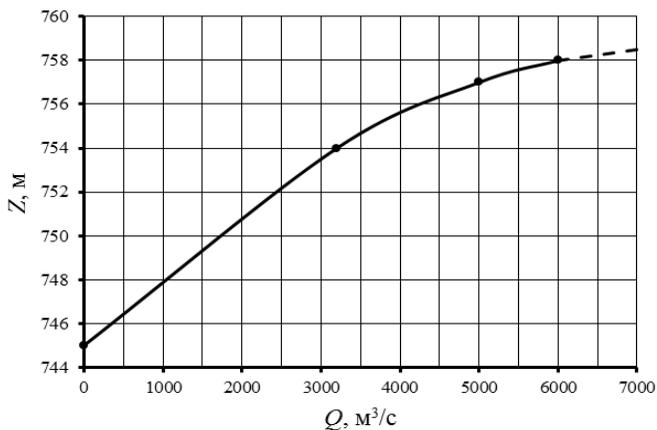


Рис. 5.3. Кривая пропускной способности водосливов $Q_{\text{вдсл.}} = f(Z)$.

5.3. Расчет трансформации гидрографа половодья водохранилищем ГЭС

5.3.1. Расчетное уравнение и условия расчета

Расчет трансформации половодья водохранилищем осуществляется по уравнению водного баланса водохранилища за расчетный интервал времени Δt :

$$V_{к,i} = V_{н,i} + \Delta V_{акк,i} = V_{н,i} + (Q_{пр,i} - Q_{отд,i}) \cdot \Delta t_i, \quad (5.1)$$

где $V_{к,i}$ – наполнение водохранилища на конец расчетного i -го интервала времени, (млн. м³ или км³); $V_{н,i}$ – наполнение водохранилища на начало расчетного i -го интервала времени, (млн.м³ или км³); $\Delta V_{акк,i}$ – объем аккумуляции воды в водохранилище за i -й интервал времени, (млн. м³ или км³). ($\Delta V_{акк,i}$ имеет положительное значение при наполнении водохранилища и отрицательное при сработке запасов воды в водохранилище); $Q_{пр,i}$ – средний расход притока воды в водохранилище за i -й интервал времени, (млн.м³ или км³); $Q_{отд,i}$ – средний за i -й интервал времени расход отдачи воды из водохранилища, (млн. м³ или км³); Δt_i – расчетный интервал времени (млн. секунд или млрд. секунд); i – номер расчетного временного интервала в их последовательности за период половодья.

При выполнении расчета принимаются следующие условия.

1) Расчет по уравнению (5.1) ведется последовательно во времени от первого расчетного интервала ($i = 1$) к последнему.

2) При переходе от i -го интервала Δt к следующему ($i+1$)-му интервалу принимается, что наполнение водохранилища на начало следующего интервала равно наполнению на конец предыдущего интервала времени, т. е.

$$V_{н,(i+1)} = V_{к,i}. \quad (5.2)$$

3) Начальное наполнение водохранилища (V_0), т. е. наполнение на начало первого расчетного интервала ($V_{н,1}$), принимается равным мертвому объему водохранилища ($V_{умо}$). Это условие принято из предположения, что расчет ведется для водохранилища сезонного регулирования и ежегодно к началу половодья водохранилище сра-

батывается до отметки УМО.

Величина мертвого объема ($V_{\text{УМО}}$) определяется по объемной кривой водохранилища (рис. 5.2) и по значению отметки УМО (исходные данные, табл. 5.1).

В рассматриваемом примере:

отметка УМО = 735 м и мертвый объем $V_{\text{УМО}} = 6,8 \text{ км}^3$, следовательно, начальное наполнение $V_0 = V_{\text{н.1}} = 6,8 \text{ км}^3$.

4) Размер расчетного интервала времени принимается постоянным и равным 1 сутки, т. е.

$\Delta t = 1 \text{ сутки} = 86400 \text{ сек.} = 0,0864 \text{ млн. сек.} = 0,0864 \cdot 10^{-3} \text{ млрд. сек.}$

5) Расчет пропуска половодья начинается с даты, т. е. с расчетного интервала, в котором расход притока впервые превысил полную пропускную способность ГЭС ($Q_{\text{ГЭС}}$, исходные данные, табл. 5.1).

6) Расчет заканчивается, когда уровень воды в водохранилище, пройдя через наивысшее значение, снизится до отметки НПУ, или при окончании данных о расходах притока на ветви спада расчетного гидрографа половодья.

5.3.2. Этапы и последовательность расчета

Расчет трансформации гидрографа весеннего половодья водохранилищем ведется по правилам метода «срезки» и реализуется в табличной форме (табл. 5.2). При расчете выделяют два этапа, в зависимости от степени наполнения водохранилища: 1) до открытия водосливов и 2) после открытия водосливов.

1) На первом этапе, пока уровень воды в верхнем бьефе водохранилища $Z_{\text{в.б.}}$ не превысил отметки открытия водосливов $Z_{\text{откр.}}$, расход отдачи воды из водохранилища в нижний бьеф равен полной пропускной способности ГЭС.

Т. е. при $\text{УМО} < Z_{\text{в.б.}} \leq Z_{\text{откр.}}$ в уравнении (5.1) расход отдачи $Q_{\text{отд.}i} = Q_{\text{ГЭС}}$.

Последовательность расчетов на 1-ом этапе.

Расчет в табл. 5.2 ведется последовательно по интервалам Δt . На каждом интервале Δt расчет осуществляется от графы 1 к графе 10.

В графу 1 записывается хронологическая последовательность дат за период половодья в начиная с суток предшествующих началу расчета (см. условие 5 в разделе 5.3.1).

В графе 2 указывается размер расчетного интервала времени $\Delta t = 0,0864 \text{ млн. секунд}$.

Таблица 5.2 – Расчет трансформации весеннего половодья обеспеченностью $P = 0,01$ % с г.п. водохранилищем ГЭС. $НПУ = 750$ м; $Z_{откр.вдсл.} = 750$ м; $Z_{УМО} = 735$ м; $V_{УМО} = 6,80$, км³

Дата	Δt , млн.с	$Q_{пр.}$, м ³ /с	$Q_{ГЭС}$, м ³ /с	$Q_{вдсл.}$, м ³ /с	$Q_{отд.}$, м ³ /с	$Q_{акк.}$, м ³ /с	$\Delta V_{акк.}$, км ³	$V_{к.}$, км ³	$Z_{к.}$, М	$Z'_{ср.}$, М
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
31 мая	0,0864	800	–	–	–	–	–	6,80	735,00	–
1 июня	0,0864	1000	800	0	800	200	0,017	6,817	735,55	–
2 июня	0,0864	1830	800	0	800	1030	0,089	6,906	736,09	–
3 июня	0,0864	2670	800	0	800	1870	0,162	7,068	736,52	–
...
10 июня	0,0864	10620	800	0	800	9820	0,848	10,724	745,58	–
11 июня	0,0864	11250	800	0	800	10450	0,903	11,627	747,64	–
12 июня	0,0864	11880	800	0	800	11080	0,957	12,584	749,76	–
13 июня	0,0864	12500	800	2234	3034	9466	0,818	13,402	751,53	750,65
14 июня	0,0864	11680	800	2893	3693	7987	0,69	14,092	752,92	752,23
15 июня	0,0864	11400	800	3457	4257	7143	0,617	14,71	754,23	753,58
...
20 июня	0,0864	7330	800	4823	5623	1707	0,148	16,137	756,98	756,85
21 июня	0,0864	7070	800	4927	5727	1343	0,116	16,253	757,21	757,1
22 июня	0,0864	6800	800	5006	5806	994	0,086	16,339	757,36	757,29
23 июня	0,0864	5970	800	5044	5844	126	0,011	16,349	757,39	757,38
24 июня	0,0864	5140	800	5027	5827	–687	–0,059	16,29	757,28	757,34
25 июня	0,0864	4800	800	4969	5769	–969	–0,084	16,206	757,11	757,20
...
28 июня	0,0864	1830	800	4478	5278	–3448	–0,298	15,486	755,73	756,02
29 июня	0,0864	1000	800	4215	5015	–4015	–0,347	15,139	755,05	755,39

В графу 3 заносится среднее за расчетный интервал (расчетные сутки) значение расхода притока воды в водохранилище ($Q_{пр.i}$). Среднее сутки значение $Q_{пр.i}$ определяется по расчетному гидрографу притока (рис. 5.1).

В графе 4 указывается расход воды пропускаемой в нижний бьеф через ГЭС, который равен полной пропускной способности ГЭС, т. е. значению $Q_{ГЭС}$ из исходных данных.

В графе 5 приводится значение расхода проходящей через водосливы. На первом этапе, пока $Z_{в.б.} \leq Z_{откр.}$, водосливы закрыты, и расход $Q_{вдсл.} = 0$.

В графе 6 приводится значение суммарного расхода отдачи воды из водохранилища в нижний бьеф ($Q_{отд.i}$), вычисляемое как сумма расхода $Q_{ГЭС}$ (графа 4) и $Q_{вдсл.i}$ (графа 5), т. к. на первом этапе водосливы закрыты, то $Q_{отд.i} = Q_{ГЭС}$.

В графе 7 вычисляется расход аккумуляции ($\Delta Q_{акк.i}$), как разница расхода притока $Q_{пр.i}$ (графа 3) и расхода отдачи $Q_{отд.i}$ (графа 6):

$$\Delta Q_{акк.i} = Q_{пр.i} - Q_{отд.i}.$$

В графе 8 вычисляется объем аккумуляции ($\Delta V_{акк.i}$, млн. м³), как произведение расчетного интервала Δt (графа 2) и расхода аккумуляции $\Delta Q_{акк.i}$ (графа 7):

$$\Delta V_{акк.i} \text{ (млн. м}^3\text{)} = 0,0864 \cdot \Delta Q_{акк.i}.$$

При вычислении $\Delta V_{акк.i}$ в км³ необходимо в произведении изменить размерность интервала Δt , т. е.

$$\Delta V_{акк.i} \text{ (км}^3\text{)} = 0,0864 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta Q_{акк.i}.$$

При положительных значениях расхода и объема аккумуляции водохранилище наполняется, а при отрицательных – срабатывается.

В графе 9 подсчитывается наполнение водохранилища на конец каждого расчетного интервала ($V_{к.i}$), как сумма наполнения на конец предыдущего интервала $V_{к.(i-1)}$ (графа 9 предыдущая строка) и объема аккумуляции за расчетный интервал $\Delta V_{акк.i}$ (графа 8):

$$V_{к.i} = V_{к.(i-1)} + \Delta V_{акк.i}.$$

Для первого расчетного интервала (при $i = 1$) $V_{к,i-1} = V_0 = V_{уМО}$ (см. условие 3, раздел 5.3.1).

В графу 10 заносится значение уровня воды в верхнем бьефе водохранилища на конец расчетного интервала ($Z_{к,i}$).

Значение $Z_{к,i}$ определяется по объему наполнения водохранилища на конец расчетного интервала $V_{к,i}$ (графа 9) с использованием объемной кривой водохранилища (рис. 5.2). В учебном задании допустимо $Z_{к,i}$ определять непосредственно по графику. Для нахождения $Z_{к,i}$ также можно использовать уравнение аппроксимирующей линии, полученное с помощью программы *Excel*, но, в этом случае, надо учитывать особенностей его применения, указанных в примечании в разделе 4.3.1, пункт 1. (*В реальной проектной практике для определения $Z_{к,i}$ применяют интерполяционные таблицы*).

После вычисления $Z_{к,i}$ в первом расчетном интервале Δt переходят к следующему расчетному интервалу и осуществляют расчет от графы 1 к графе 10 как описано выше.

По схеме 1-го этапа расчет ведется до тех пор, пока в графе 10 уровень $Z_{к,i}$ не превысит отметки открытия водосливов $Z_{откр}$. После превышения отметки $Z_{откр}$ начинается второй этап расчета трансформации гидрографа половодья при его прохождении через водохранилище.

2) На втором этапе, после того как уровень воды в верхнем бьефе водохранилища превысит отметку открытия водосливов ($Z_{откр}$), водосливы будут открыты и расход отдачи воды из водохранилища в нижний бьеф ($Q_{отд,i}$) станет равен сумме полной пропускной способности ГЭС ($Q_{ГЭС}$) и расхода проходящего через водосливы ($Q_{вдсл,i}$). Т. е. при $Z_{к,i} > Z_{откр}$ в уравнении (5.1) расход отдачи

$$Q_{отд,i} = Q_{ГЭС} + Q_{вдсл,i}$$

На втором этапе расчетов необходимо в графу 5 табл. 5.2 внести значение среднего за сутки расхода через водосливы ($Q_{вдсл,i}$).

Средний за Δt расход через водосливы можно определить по кривой пропускной способности водосливов $Q_{вдсл} = f(Z)$ и среднему за Δt уровню верхнего бьефа. Однако, при этом возникает неопределенность, т. к. уровень воды в верхнем бьефе, зависит от наполнения водохранилища, а значит зависит от расхода отдачи воды из водохранилища, т. е. от расхода через водосливы, который, в свою очередь, сам зависит от уровня воды в верхнем бьефе. Для преодоления этой неопределенности применяется численная оптимизация значения уровня воды на каждом расчетном интервале времени Δt .

Процедура оптимизации заключается в нахождении методом подбора такого значения уровня воды в верхнем бьефе, и соответствующего ему расхода через водосливы (по кривой пропускной способности), при котором, вычисленному по уравнению 5.1 наполнению водохранилища, будет соответствовать (по объемной кривой) тот самый уровень, по которому был определен расход через водосливы.

Другими словами, для каждого расчетного интервала времени Δt необходимо найти значение уровня воды в верхнем бьефе, при котором уравнение 5.1 «сходится», т. е. левая и правая части равны, если в левой наполнение водохранилища определить по уровню и объемной кривой, а в правой вычислить по расходу через водосливы, определенному по тому же значению уровня и кривой пропускной способности.

Последовательность расчетов на 2-ом этапе.

Для очередного Δt графы 1,2,3,4 заполняются как на первом этапе.

Затем переходят к графе 10 и осуществляют процедуру подбора (нахождения) уровня $Z_{к.і}$ на конец расчетных суток. Процедура подбора состоит из следующих последовательных действий – шагов.

Шаг 1. В графе 10 задается предполагаемое значение уровня воды на конец расчетного интервал $Z'_{к.і}$. (При назначении $Z'_{к.і}$ можно ориентироваться на изменение уровня за предыдущий интервал Δt).

Шаг 2. В графе 11 вычисляется предполагаемый средний за расчетный интервал Δt уровень воды в водохранилище ($Z'_{ср.і}$), как полусумма заданного $Z'_{к.і}$ (графа 10) и вычисленного на конец предыдущего интервала уровня $Z_{к.і-1}$ (графа 10 предыдущая строка), т. е.

$$Z'_{ср.і} = (Z'_{к.і} + Z_{к.і-1})/2.$$

После этого переходят к графе 5.

Шаг 3. В графу 5 заносится предполагаемое значение расхода воды через водосливы $Q'_{вдсл.і}$, которое определяется по предполагаемому среднему уровню $Z'_{ср.і}$ (графа 11) и кривой пропускной способности водосливов (рис. 5.3).

Значение $Q'_{вдсл.і}$ также можно вычислять по уравнению аппроксимации, помня об особенностях этого уравнения, получаемого с помощью программы *Excel* (см. примечание в разделе 4.3.1, пункт 1). При необходимости зависимость $Q_{вдсл.} = f(Z)$ экстраполируется.

Шаг 4. Вычисления продолжают последовательно в графах 6, 7, 8, 9 и 10 также как это делалось на 1-ом этапе, но с учетом того, что

сейчас водосливы открыты, и в графе 6 предполагаемый расход отдачи воды из водохранилища ($Q'_{отд.i}$), равен сумме двух величин:

$$Q'_{отд.i} = Q_{ГЭС} + Q'_{вдсл.i}$$

В результате, в графе 10 получаем вычисленное значение уровня на конец расчетного интервала ($Z_{к.i}$).

Шаг 5. Вычисленное значение $Z_{к.i}$ сравнивается с заданным предполагаемым уровнем $Z'_{к.i}$.

Если $Z_{к.i} \neq Z'_{к.i}$, то процедуру подбора повторяют, начиная с Шага 1, уточнив задаваемое значение $Z'_{к.i}$ в графе 10. (При следующей итерации целесообразно задать значение $Z'_{к.i}$ равное среднему из заданного и вычисленного в предыдущей итерации).

Целью подбора является получение в расчетном интервале Δt равенства между заданным ($Z'_{к.i}$) и вычисленным ($Z_{к.i}$) уровнями.

Достигнув в графе 10 равенства $Z_{к.i} = Z'_{к.i}$ (вычисленного и заданного значений уровней) переходят к следующему расчетному интервалу Δt и применяют процедуру оптимизации (шаги 1, 2, 3, 4, 5) для нахождения уровня на конец следующих суток ($Z_{к.i+1}$).

Для учебного задания условием перехода к следующему расчетному интервалу достаточно принять приблизительное равенство $Z_{к.i} \approx Z'_{к.i}$ с погрешностью не более 0,05 м (5 см). При достижении такого расхождения, в графе 10 целесообразно окончательно записать среднее значение между заданным ($Z'_{к.i}$) и вычисленным ($Z_{к.i}$) уровнями с округлением до 1 см, а затем перейти к следующему интервалу Δt .

Вычисления по схеме 2-го этапа ведутся до конца расчета трансформации половодья водохранилищем (см. условие 6, раздел 5.3.1).

5.3.3. Графическая иллюстрация результатов расчета трансформации половодья водохранилищем

Результаты расчета пропуска половодья через водохранилище: трансформация гидрографа половодья и ход уровня воды в водохранилище; отображаются на графиках.

1) По данным граф 1 и 6 табл. 5.2 строится гидрограф зарегулированных расходов отдачи воды в нижний бьеф при пропуске через водохранилище половодья расчетной обеспеченности (рис. 5.4), сов-

мещенный с ранее построенным гидрографом притока воды в водохранилище.

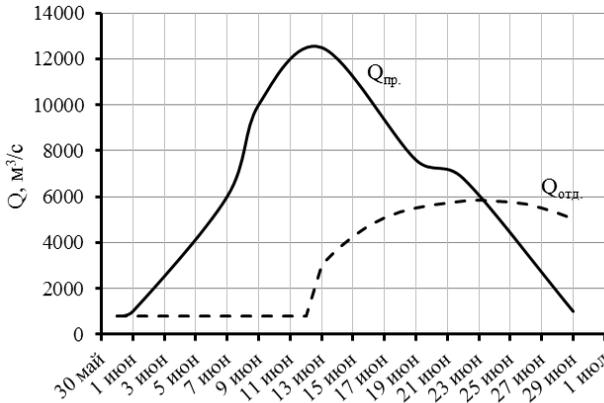


Рис. 5.4. Расчетный гидрограф притока ($Q_{пр.}$) обеспеченностью $P = 0,01\%$ с г.п. и гидрограф зарегулированных расходов отдачи в нижний бьеф ($Q_{отд.}$).

2) По данным граф 1 и 10 табл. 5.2 строится хронологический график хода уровня воды в водохранилище в период пропуска половодья расчетной обеспеченности (рис. 5.5).

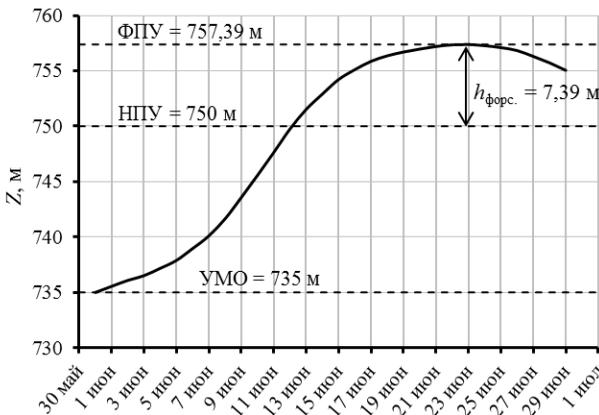


Рис. 5.5 График хода уровня воды в водохранилище при пропуске расчетного половодья ($P = 0,01\%$ с г.п.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета трансформации весеннего половодья обеспеченностью $P = 0,01$ % с гарантийной поправкой водохранилищем ГЭС

НПУ = 750 абс. м; УМО = 735 абс. м; $Z_{откр.} = 750$ абс. м.

- 1) Дата начала наполнения водохранилища: 1 июня.
- 2) Продолжительность заполнения полезного объема: 12 дней.
- 3) Дата открытия водосливов: 13 июня.
- 4) Продолжительность заполнения объема форсировки: 10 дней
- 5) Максимальный расхода притока:
 $Q_{пр. макс.} = 12500 \text{ м}^3/\text{с}$ (13 июня).
- 6) Максимальный расхода отдачи воды из водохранилища:
 $Q_{отд. макс.} = 5840 \text{ м}^3/\text{с}$ (23 июня).
- 7) «Срезка» (уменьшение) максимального расхода:
 $\Delta Q_{макс.} = 6660 \text{ м}^3/\text{с}$
- 8) Смещение даты прохождения максимального расхода: +10 дней.
- 9) Расчетная отметка ФПУ = 757,40 абс. м (23 июня).
- 10) Форсировка уровня (превышение ФПУ над НПУ):
 $h_{форс.} = 7,40$ м.
- 11) Наибольшее повышение уровня за сутки:
 $\Delta Z = +2,12$ м/сутки (12 июня)

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Арсеньев Г.С. Основы управления гидрологическими процессами: водные ресурсы. Учебник. – СПб.:изд. РГГМУ, 2005. – 231 с.
http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-515144028.pdf

Дополнительная

1. Арсеньев Г.С., Иваненко А.Г. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – СПб., 1993. – 272 с.

http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-213172425.pdf

2. Арсеньев Г.С. Практикум по водному хозяйству и водохозяйственным расчетам. – Л., 1989. – 198 с.

http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-213162035.pdf

3. Догановский А.М., Орлов В.Г. Сборник практических задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). – СПб.: изд. РГГМУ, 2011. – 315 с.

http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417152541.pdf

4. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов. – Приказ МПР России от 30.11.2007 №314, 2007. – 40 с.

https://mnr.gov.ru/docs/metodicheskie_dokumenty/

5. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.

http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-515132435.pdf

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. Разработка водохозяйственного баланса речного бассейна.....	5
1.1. Понятие «водохозяйственный баланс» и принципы его расчета.....	7
1.2. Подготовка данных для расчета водохозяйственного баланса.....	7
1.2.1. Вычисление естественного стока реки в расчетном створе в условиях средней водности и остромаловодных условиях обеспеченностью $P = 95\%$	7
1.2.2. Расчет значений приходной и расходной составляющих водохозяйственного баланса, связанных с работой водохранилища.....	10
1.2.3. Расчет комплексного попуска ниже расчетного створа.....	12
1.3. Расчет водохозяйственных балансов реки в расчетном створе.....	14
1.3.1. Расчет первоначального варианта водохозяйственного баланса.....	14
1.3.2. Расчет откорректированного варианта водохозяйственного баланса.....	15
Заключение	17
Образец-макет практической работы.....	17
2. Расчет сезонного регулирования стока балансовым табличным способом для двух различных по водности лет.....	30
2.1. Регулирование стока и параметры водохранилищ.....	31
2.2. Расчет полезного объема водохранилища.....	31
2.3. Расчет сезонного регулирования для двух различных по водности лет.....	39
2.3.1. Расчет сезонного регулирования в маловодном году, приведенном к расчетной обеспеченности $P = 95\%$	40
2.3.2. Расчет сезонного регулирования в среднем по водности году (без приведения к обеспеченности $P = 50\%$).....	48
Заключение	52
3. Расчет и построение обобщенной водохозяйственной характеристики.....	54
3.1. Понятие «Обобщенная водохозяйственная характеристика» и методика ее расчета.....	54
3.2. Расчет координат и построение графика обобщенной водохозяйственной характеристики.....	56
3.2.1. Расчет статистических характеристик годового и межennaleго стока.....	56
3.2.2. Расчет координат обобщенной водохозяйственной характеристики.....	59
3.2.3. Построение графика обобщенной водохозяйственной характеристики.....	62
Заключение.....	64
4. Расчет оптимальных водноэнергетических характеристик водохранилища ГЭС.....	65
4.1. Основные водноэнергетические характеристик водохранилища ГЭС и метод их расчета.....	67
4.2. Построение условных топографических характеристик водохранилища и условной кривой расходов в нижнем бьефе.....	67

	Стр.
4.2.1. Создание системы условных высотных отметок.....	67
4.2.2. Построение условных топографических характеристик	68
4.2.3. Построение условной кривой расходов в нижнем бьефе гидроузла.....	71
4.3. Расчет основных водноэнергетических характеристик при различной глубине сработки водохранилища.....	73
4.3.1. Расчет гарантированной мощности.....	73
4.3.2. Расчет средней годовой выработки электроэнергии.....	79
Заключение.....	85
5. Трансформация гидрографа весеннего половодья расчетной обеспеченности $P = 0,01$ % с гарантийной поправкой водохранилищем ГЭС	86
5.1. Цели и метод расчета трансформации половодья водохранилищем.....	88
5.2. Предварительные графические построения.....	89
5.3. Расчет трансформации гидрографа половодья водохранилищем ГЭС.....	91
5.3.1. Расчетное уравнение и условия расчета	91
5.3.2. Этапы и последовательность расчета.....	92
5.3.3. Графическая иллюстрация результатов расчета трансформации половодья водохранилищем	97
Заключение	99
ЛИТЕРАТУРА.....	100

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Электронное учебное издание

Сакович Владимир Михайлович

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Выпускающий редактор Е. И. Осянина
Выполнено с готового оригинал-макета

Подписано к использованию 04.07.2024. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 6,04.
Заказ 2001.

Издательство «Бук». 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.



БУК

ИЗДАТЕЛЬСТВО
www.bukbook.ru

ISBN 978-5-907839-85-4



9 785907 839854