

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ**

П. С. ЛОПУХ, А. А. ВОЛЧЕК

ГИДРОЛОГИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

**Практикум
для студентов специальности
1-31 02 02 «Гидрометеорология»**

**МИНСК
2020**

УДК 556.5.048 (075.8)
ББК 26.222я73
Л77

Утверждено на заседании
учебно-методической комиссии факультета
географии и геоинформатики
22 января 2020 г., протокол № 5

Рецензент
доктор географических наук *Б. П. Власов*

Лопух, П. С.
Л77 Гидрология водохранилищ : практикум / П. С. Лопух,
А. А. Волчек. – Минск : БГУ, 2020. – 41 с.

Рассматривается методика проведения практических работ по курсу «Гидрология водохранилищ». Предназначено для студентов специальности 1-31 02 02 «Гидрометеорология» Белорусского государственного университета.

УДК 556.5.048 (075.8)
ББК 26.222я73

©БГУ, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум разработан в соответствии с учебной программой курса «Гидрология водохранилищ». Практикум включает расчетные работы по обоснованию создания, основных проектных характеристик создаваемых водохранилищ в равнинных условиях, а также о оценке их роли в регулировании поверхностного стока. Практикум включает проведение 10 часов практических или семинарских занятий и 10 часов управляемой самостоятельной работы.

Практические работы являются одной из форм приобщения студентов к самостоятельной научно-исследовательской работе и позволяют на основе конкретных индивидуальных занятий закрепить теоретические положения курса и приобрести необходимые навыки для практической деятельности в области водного хозяйства.

Приведенные в методическом пособии методические указания по выполнению практических работ предназначаются для самостоятельного изучения студентами теоретических положений и расчетных приемов по водохозяйственному обоснованию создания искусственных водоемов – водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования стока как одного из базовых положений проектирования водохозяйственных комплексов и рационального использования водных ресурсов.

Водохранилища, как природно-антропогенные экосистемы или водные ландшафты, имеют особенности создания, формирования гидрологического режима в условиях «эффекта подпора» и эксплуатации в разные периоды водности территорий водосборов, на которых они создаются. Поэтому важным моментом является определение и расчет их оптимальных параметров, а также обеспечения безопасной и эффективной их эксплуатации, формирования новой гидроэкосистемы среди водоемов замедленного водообмена. От параметров многих запроектированных характеристик зависят интенсивность и направленность процессов зарастания и заиления ложа, обуславливающих их эффективность и продолжительность эксплуатации водохранилищ, площади прямого затопления и степень негативного их влияния на прилегающую территорию, изменение гидрологического режима реки в нижнем бьефе и, в итоге, трансформации географического пространства в районе создания водохранилищ.

При разработке практикума использован опыт многолетних исследований малых водохранилищ Беларуси, преподавания одноименного курса в Белорусском государственном университете, проведения практических работ в Томском политехническом институте и Брестском государственном техническом университете. Практикум

рассчитан для использования при изучении курса «Гидрология водохранилищ» специальности «Гидрометеорология». Разработанные задания практикума могут быть использованы при изучении водохранилищ на других специальностях географического цикла, а также при изучении одноименного курса по выбору.

**ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
УЧЕБНЫХ ЧАСОВ ПРАКТИКУМА И ИХ
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА**

№ п/п	Название темы	Лабораторные, часы	УСР, часы	Максимальная оценка работы в баллах
1	Обоснование необходимости строительства водохранилища		4	10
2	Построение объемной и батиграфической (топографической) кривых водохранилища	4		10
3	Расчет потерь воды из водохранилища на испарение и фильтрацию	2		10
4	Определение емкости водохранилища сезонного регулирования	2		10
5	Определение трансформации паводкового стока водохранилищем	2		10

Задание 1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОДОХРАНИЛИЩА

Необходимость строительства водохранилища обуславливается водохозяйственными проблемами и реальной обеспеченностью водными ресурсами территории. Решение задачи обоснования строительства водохранилища решается путем расчета водохозяйственного баланса.

Достоверное определение составляющих водохозяйственных балансов территорий играет ключевую роль в решении большинства водных проблем, включая водохозяйственное прогнозирование и разработку вариантов водохозяйственных систем и сооружений (ВХС). Целью их составления является установление избытка или дефицита водных ресурсов необходимого качества для обеспечения потребностей реальных или потенциальных водопользователей, определение основных параметров намечаемых мероприятий по охране и использованию вод.

Водный баланс, в отличие от водохозяйственного баланса (ВХБ), служит средством анализа природного и антропогенного влагооборота с целью уточнения располагаемых водных ресурсов, определения влияния на них хозяйственной деятельности, раскрытия закономерностей формирования вод суши, выявления соотношений между приходом и расходом воды в пределах территории.

Результаты анализа ВХБ можно обобщить следующим образом. Во-первых, если для некоторого расчетного уровня развития ВХБ сводится без дефицита для всех расчетных интервалов времени по всем рассматриваемым створам, дополнительных водохозяйственных мероприятий на данном уровне не требуется. Во-вторых, возникновение дефицита воды в отдельные расчетные интервалы времени при отсутствии в его балансе маловодного года свидетельствует о необходимости сезонного регулирования стока. В-третьих, отсутствие дефицита лишь в балансе среднего по водности года показывает на необходимость многолетнего регулирования стока или привлечения дополнительных источников. В-четвертых, дефицит в балансе среднего по водности года может быть устранен только путем привлечения вод извне.

В зависимости от решаемых задач и расчетных интервалов времени различают несколько видов ВХБ. Различают отчетные, оперативные, плановые и перспективные водохозяйственные балансы.

Отчетные ВХБ – водохозяйственные балансы, составленные за прошедший период и являющиеся составной частью Государственного водного кадастра в части использования водных ресурсов (ГВК ИВР).

Оперативные ВХБ – водохозяйственные балансы, разрабатываемые по данным прогнозов на ближайший период (сезон, месяц) для уточнения режима работы водохозяйственных систем и сооружений и оперативного планирования водораспределения. *Плановые ВХБ* – водохозяйственные балансы, составляемые на расчетные уровни при планировании развития водохозяйственного комплекса с целью проверки сбалансированности предполагаемых изменений потребности в воде. *Перспективные ВХБ* – водохозяйственные балансы, используемые в схемах комплексного использования и охраны вод, проектах и технико-экономических обоснованиях (ТЭО) ВХС, служат для выявления необходимости в проведении мероприятий или комплекса мероприятий по охране и использованию вод и анализа возможности удовлетворения потребности в воде необходимого качества на более или менее отдаленную перспективу (до 15–20 лет и более).

Для определения годовичных и месячных ВХБ Московским государственным разработана методика их расчета и управления ими при природо-обустройстве территорий (МГУП).

1. Структура водохозяйственного баланса. Уравнение годового водохозяйственного баланса (ВХБ) имеет вид

$$W_{\text{пр}} - W_{\text{расх}} = \sum W, \quad (1.1)$$

где $W_{\text{пр}}$ – приходная часть годового ВХБ; $W_{\text{расх}}$ – расходная часть годового ВХБ; $\sum W$ – результирующая часть годового ВХБ.

Приходная часть годового ВХБ рассчитывается по формуле

$$W_{\text{пр}} = W_{\phi} + W_{\text{с}} + \sum W_{\text{сг}} + W_{\text{п}} + W_{\text{пол}}, \quad (1.2)$$

где W_{ϕ} – годовой объем стока, формирующегося в районе рассматриваемого гидроузла; $W_{\text{с}}$ – объем возвратных вод g -го потребителя, поступающих в водоем выше рассматриваемого створа; $W_{\text{п}}$ – объем пригодных для использования подземных вод, гидравлически не связанных с речным стоком; $W_{\text{пол}}$ – попуск из вышележащего водохранилища (учитывается в том случае, если рассматриваемый гидроузел является элементом каскада гидроузлов); $W_{\text{с}}$ – годовой объем стока, формирующегося выше района рассматриваемого гидроузла (при отсутствии каскада).

Элементы приходной части можно определить следующим образом. Годовой объем стока, формирующегося выше района рассматриваемого

гидроузла (при отсутствии каскада)

$$W_c = \sum Q_i t_i, \quad (1.3)$$

где Q_i – расход стока в i -ом месяце; t_i – продолжительность i -го месяца.

Формирующийся в районе гидроузла полный речной сток R связан с атмосферными осадками следующим образом

$$W_\phi = \sum R_i t_i, \quad (1.4)$$

где R_i – полный речной сток в районе гидроузла в i -ом месяце.

$$R = K_c X, \quad (1.5)$$

$$R = X - E, \quad (1.6)$$

где X – объем атмосферных осадков за год; K_c – коэффициент стока; E – суммарное испарение с поверхности водосборной территории.

Суммарный расход определяется как $R + Q_i = Q$, а также по формуле

$$Q = W / A, \quad (1.7)$$

где A – активность водообмена; W – объем водоема или другой части гидросферы.

Объем возвратных вод W_z , поступающих в водоем выше рассматриваемого створа, рассчитывается по зависимости

$$W_z = W_g K_{zg}, \quad (1.8)$$

где W_g – годовой объем потребления воды потребителем; K_{zg} – коэффициент возврата водопотребителя.

Объем возможных для использования подземных вод, гидравлически не связанных с речным стоком, определяется по формуле

$$W_n = \sum Q_{ni} t_i, \quad (1.9)$$

где Q_{ni} – расход подземного водозабора в i -ом месяце; t_i – продолжительность i -го месяца.

Объем стока W_c и объем W_z можно рассчитать по формуле

$$W_{\sigma} = Q_{\sigma} T, \quad (1.10)$$

$$W_{\pi} = Q_{\pi} T, \quad (1.11)$$

где Q_{σ} – средний годовой расход стока; Q_{π} – средний расход подземных вод; T – число секунд в году;

$$T = \sum t_i, \quad Q_{\sigma} = \sum Q_{\sigma i} / 12, \quad Q_{\pi} = \sum Q_{\pi i} / 12. \quad (1.12)$$

Расходная часть годового ВХБ рассчитывается по формуле

$$W_{\text{раск}} = \sum W_g + \sum W_{\text{раз } g} + \sum W_{\text{поп } j}, \quad (1.13)$$

где W_g – годовой объем потребления воды g -м потребителем; $W_{\text{раз } g}$ – годовой объем воды, потребный для разбавления возвратных вод g -го потребителя поступающих в верхний бьеф; $W_{\text{поп } j}$ – объем попусков в нижний бьеф j -го вида (санитарных, энергетических, судоходных, водоснабженческих, рыбохозяйственных).

Элементы расходной части можно определить следующим образом. Годовой объем потребления воды потребителем

$$W_g = B_g q_g t / \mu_g, \quad (1.14)$$

где B_g – объем продукции потребителя, определяющий забор воды; q_g – норма потребления воды (на единицу продукции) потребителя; t – продолжительность периода водопотребления; μ_g – коэффициент полезного действия водоподводящих устройств.

Годовой объем воды, потребный для разбавления возвратных вод потребителя

$$W_{\text{раз}} = W_{\pi} K_p, \quad (1.15)$$

где W_{π} – годовой объем возвратных вод потребителя; K_p – коэффициент разбавления возвратных вод.

Годовой объем попусков в нижний бьеф

$$W_{\text{поп}} = \sum Q_{\text{поп } i} t_i, \quad (1.16)$$

где $Q_{\text{поп } i}$ – расход попусков в i -го вида; t_i – продолжительность попусков

i-го вида:

2. Методы управления годичным ВХБ. Как указывалось выше, если ΔW — результирующая часть годового ВХБ отрицательна, необходимо применить методы управления водохозяйственным балансом. Методы можно прежде всего разделить на две группы в соответствии с составляющей водохозяйственного баланса (приходной или расходной частью). Естественно стремление к увеличению приходной части ВХБ и к уменьшению расходной.

2.1. Увеличение объема приходной части ВХБ. Речной сток, являющийся основным источником воды, состоит из двух составляющих: поверхностной и подземной

$$R = S + U, \quad (1.17)$$

$$K_n = U/R, \quad (1.18)$$

$$V = U + E, \quad (1.19)$$

где R — полный речной сток; S — поверхностная составляющая стока; U — подземная составляющая стока; K_n — коэффициент подземного стока; V — общее увлажнение территории.

Основное значение для водоснабжения и общего увлажнения территории имеет подземный сток. Поэтому увеличение приходной части баланса возможно за счет перевода поверхностной составляющей в подземный какими-либо методами (агротехническими, гидротехническими, лесотехническими и т.д.). Другой способ увеличения приходной части ВХБ может заключаться в пополнении стока за счет других водосборов (переброска стока).

2.2. Уменьшение объема расходной части ВХБ. Способы уменьшения расходной части ВХБ базируются на:

1) уменьшении объема водопотребления за счет уменьшения нормы водопотребления q путем введения прогрессивных (менее водоемких технологий), увеличения коэффициента полезного действия водоподводящих устройств μ ;

2) уменьшении годового объема воды, потребной для разбавления возвратных вод за счет введения прогрессивных систем водоснабжения (оборотной, повторной), лучшей очистки возвратных вод, перенесения места возврата сточных вод в нижний бьеф;

3) уменьшении годового объема попусков в нижний бьеф за счет выбора максимального из одновременных попусков.

Альтернативный способ уменьшения расходной части ВХБ заключается в переносе водопотребителей в другие районы или уменьшении водопотребления за счет уменьшения объема производимой продукции.

3. Методы управления месячными ВХБ. При увязанном годичном водохозяйственном балансе месячные балансы могут иметь отрицательные значения. Если водопотребители должны использовать водные ресурсы в течение всего года, то необходимо применить управляющие воздействия для того, чтобы водохозяйственный баланс был положительным в каждом месяце. При этом можно выбрать:

- 1) пополнение стока за счет других водосборов (переброска стока);
- 2) уменьшение водопотребления в отдельные месяцы за счет уменьшения объема производимой продукции;
- 3) сезонное (годичное) регулирование стока.

Расчет годичного регулирования стока сводится к определению полезных объемов водохранилища и проводится отдельно для маловодного и многоводного периодов следующим образом. Предположим, что результирующие месячных ВХБ представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1
Результирующие месячных
водохозяйственных балансов ВХБ

Месяц	ΔW , млн м ³
Январь	-W1
Февраль	-W2
Март	+W3
Апрель	+W4
Май	+W5
Июнь	+W6
Июль	-W7
Август	-W8
Сентябрь	-W9
Октябрь	+W10
Ноябрь	+W11
Декабрь	-W12

Для маловодного периода расчет проводится табличным способом. «Ходом назад», начиная с последнего месяца маловодного периода,

определяются диспетчерские объемы $V_{дi}$, которые равны полезным объемам водохранилища $V_{пол i}$ (табл. 1.2). Знак минус означает, что баланс в i -ом месяце отрицательный, следовательно, величину ΔW_i в этом месяце необходимо прибавить к величине диспетчерского объема последующего месяца. В противном случае (если ΔW_i положителен) величину ΔW_i нужно отнять от диспетчерского объема предыдущего месяца, т.е.

$$V_{дi} = V_{дi+1} \pm \Delta W_i, \quad (1.20)$$

где $V_{дi}$ – диспетчерский объем в i -ом месяце, $V_{дi} = V_{пол i}$, где $V_{пол i}$ – полезный объем водохранилища в i -ом месяце; $V_{дi+1}$ – диспетчерский объем в $i+1$ месяце (записанного ниже).

Для многоводного периода при расчете полезных объемов водохранилища в многоводном периоде необходимо воспользоваться зависимостью

$$V_{пол i} = V_{max} - V_{дi}, \quad (1.21)$$

Многоводный период начинается после окончания маловодного периода (в примере с марта). Диспетчерские объемы также подсчитываются «ходом назад», начиная с последнего месяца многоводного периода.

Таблица 1.2

Расчет полезных объемов для маловодного периода

Месяц	ΔW , млн м ³	$V_{дi}$, млн м ³
Июль	-W7	W2+W1+W12-W11-W10+W9+W8+W7
Август	-W8	W2+W1+W12-W11-W10+W9+W8
Сентябрь	-W9	W2+W1+W12-W11-W10+W9
Октябрь	+W10	W2+W1+W12-W11-W10
Ноябрь	+W11	W2+W1+W12-W11
Декабрь	-W12	W2+W1+W12
Январь	-W1	W2+W1
Февраль	-W2	W2

Контрольные вопросы

1. Чем отличается водохозяйственный от водного баланса?
2. Назовите виды водохозяйственного баланса и их отличительные черты.
3. Какие составляющие входят в приходную и расходную части водного

баланса?

4. Какова методика расчета составляющих водного баланса?
5. Перечислите основные методы управления водохозяйственным балансом.
6. Назовите методы управления месячным ВХБ и их отличительные черты.
7. Какова методика расчета результирующего ВХБ маловодного года?
8. Чем отличается методика расчета ВХБ многоводного года?

Задание 2. ПОСТРОЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ И БАТИГРАФИЧЕСКОЙ (ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ) КРИВЫХ ВОДОХРАНИЛИЩА

Водохранилище – искусственно созданный водоем для хранения воды и регулирования стока. Водохранилище – антропогенное звено общего процесса стока, искусственный водоем, созданный на базе естественных (река, озеро и др.), или в специально созданных чашах (карьер, обвалованный дамбами котлован), новый водный объект с искусственно регулируемой по определенному плану емкостью и зеркалом, обладающий специфическими условиями формирования гидрологического режима.

В соответствии с определением к основным характеристикам водохранилища относят его площадь и объем. Условным критерием отнесения искусственного водоема к категории водохранилищ является его объем – 10 млн м³ и более. Искусственные водоемы менее 10 млн м³ относят к прудам, карьерным водоемам, копаням.

В связи с осуществляемым видом регулированием стока (суточное, недельное, недельно-суточное, сезонное или годовое, многолетнее) водохранилища постоянно меняют свой объем и площадь. Поэтому динамические характеристики водохранилищ отражают кривые зависимости площади водной поверхности F и объема воды V от уровня H или глубины h в нем. Кривую $F = F(H)$ или $F = F(h)$, называют кривой площадей водной поверхности водохранилища, кривую $V = V(H)$ или $V = V(h)$, – кривой объемов водохранилища (объемной кривой). Часто эти кривые наносят на один график и называют *батиграфическими кривыми*. Одновременно на графике указывается и средняя глубина водохранилища при разных уровнях воды.

Различают статистический и динамический объемы. *Статистический объем* – объем воды, подсчитанный в предположении, что поверхность воды в водохранилище горизонтальная. *Динамический объем* – объем, вычисленный с учетом кривой свободной поверхности в водохранилище (кривой подпора).

Батиграфическая и объемная кривые имеют большое практическое значение и служат основой для расчетов потребления воды при различных объемах годового стока и наполнения водохранилища.

Содержание работы

Исходным материалом для построения кривых будущего водохранилища служат крупномасштабные топографические карты. По

полученным расчетным створам в районе гидроузла в задании необходимо выполнить следующее:

1. Выделить контуры будущего водохранилища в замыкающем створе гидроузла (плотины).
2. Вычислить площади, ограниченные горизонталями в зоне затопления.
3. Вычислить объемы слоев, заключенных между плоскостями горизонталей.
4. Определить общий объем водохранилища и объемы, заключенными ниже отметок уровня воды, начиная от общего объема (НПУ).
5. Построить объемную и батиграфическую кривые.
6. Вычислить среднюю глубину водохранилища при различных отметках уровня воды.
7. Построить график зависимости средней глубины от уровня воды.

Выполнение работы

1. Горизонтالي топографического плана наносятся на миллиметровую бумагу и выбирается место расположения плотины (самое узкое место, перпендикулярно горизонталям), определяются площади водного зеркала, соответствующие каждой горизонтали. Для измерения площади водного зеркала i -й горизонтали подсчитываются количество квадратов (считаются как полные, так и неполные квадраты) площадью 1 мм^2 , ограниченное этой горизонталью, умножается это количество на масштаб ($M 1:20\ 000$).

Результаты расчетов ведем в табличной форме (табл. 2.1).

Контуры будущего водохранилища на карте соответствует отметке изогипсы с отметкой 124 м абс. , которая соответствует запроектированной отметке нормального подпорного уровня водохранилища (НПУ), рис. 2.1.

Контур береговой линии будущего водохранилища вычерчивается на карте до створа плотины, которая замыкает расчетный створ. Ограниченная площадь «нулевой» изобатой таким образом соответствует зоне прямого затопления и площади будущего водохранилища F_0 .

2. Аналогично определяются площади каждой изогипсы $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$, до створа плотины водохранилища. Сечение изобат соответствует интервалу, или сечению изогипс, через которые они проведены на карте. Методом планиметрирования, соответственно, определяются площади,

ограниченные каждой изобатой: $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$. Измеренные площади записываются в табл. 2.1.

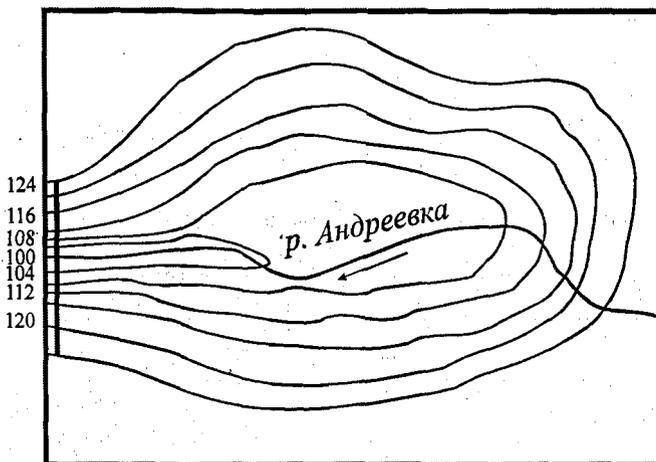


Рис. 2.1. Топографическая основа района строительства водохранилища (сплошными линиями показаны изогипсы фрагмента топографической карты в зоне затопления)

3. Объем первого придонного слоя определяют по формуле усеченного параболоида

$$\Delta V_1 = \frac{2}{3} \cdot F_1 \cdot \Delta H_{1,2}, \quad (2.1)$$

где ΔV – частный объем водохранилища между дном и последней горизонталью, m^3 ; F_n – площадь зеркала водохранилища ограниченной последней изогипсой; $\Delta H_{(n - \text{max})}$ – разница отметок между максимальной глубиной и последней горизонталью, m .

Объемы между плоскостями горизонталей, т.е. соответственно отметками будущего водохранилища при сечении между ними ΔH объем, заключенный между смежными уровнями, может быть определен по упрощенной формуле

$$\Delta V_{i+1} = \frac{1}{2} \cdot (F_i + F_{i+1}) \cdot H_{i,i+1} \quad (2.2)$$

4. Общий объем воды в водохранилище, соответствующий отметке НПУ, получают суммированием частных объемов, расположенных ниже этого уровня и заключенными между плоскостями изогипс

$$V_n = \sum_{i=1}^n \Delta V_i \quad (2.3)$$

Расчеты записываются в соответствующие графы табл. 2.1.

Таблица 2.1

Определение площади и объема слоев и общего объема водохранилища

H_i , м	ΔH_i , м	F_i , млн м ²	$F_{ср}$, млн м ²	ΔV_i , млн м ³	V_i , млн м ³	$h_{ср}$, м
1	2	3	4	5	6	7
100		0,0			0	0
	4		0,98	3,92		
104		0,98			3,92	4,00
	4		1,84	7,36		
108		2,70			11,28	4,18
	4		3,40	13,60		
112		4,10			24,88	6,07
	4		5,49	21,96		
116		6,88			46,84	6,81
	4		8,215	32,86		
120		9,55			79,70	8,35
	4		10,825	43,30		
124		12,10			123,00	10,17

5. Кривую $F = F(H)$ строят в прямоугольных координатах: на оси ординат откладывают уровни H , на оси абсцисс – площадь F . Аналогично строится и объемная кривая. С повышением уровня воды площадь водной поверхности и объем увеличивается, при понижении, соответственно, – уменьшаются (рис. 2.2).

6. По результатам расчетов строим графики зависимости $F = F(H)$, $V = V(H)$ и $h_{ср} = h_{ср}(H)$ (рис. 2.2).

7. Важной характеристикой водохранилища является средняя глубина, которая определяется по следующей формуле

$$h_{ср} = \frac{V_i}{F_i} \quad (2.4)$$

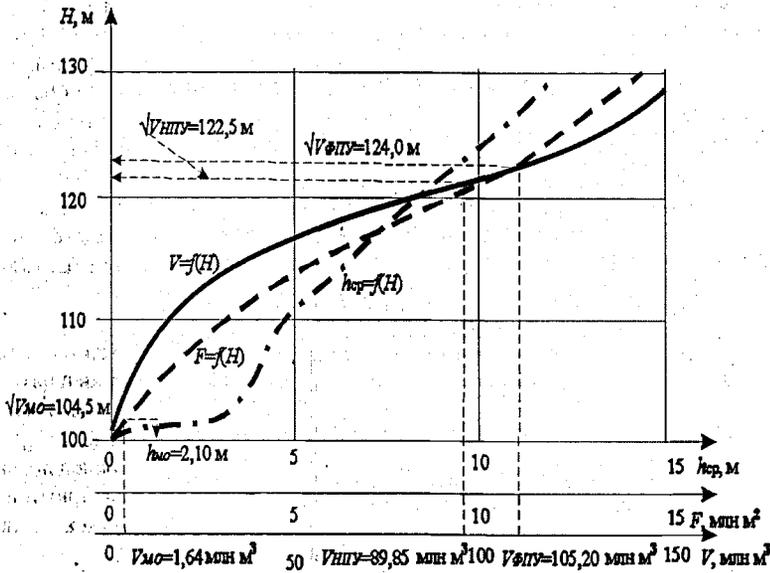


Рис. 2.2. Батиграфическая и объемная кривые проектируемого водохранилища

Средняя глубина $h_{ср}$ с повышением уровня воды изменяться в сторону увеличения, при понижении уровня воды – в сторону уменьшения.

Создание водохранилища вносит изменение в водный баланс территории вследствие затопления и подтопления ее части, подпора и повышения уровня грунтовых вод. Результатом этих изменений являются дополнительные потери воды, учет которых необходим для правильного определения объема водохранилища и составления баланса водных ресурсов при регулировании стока.

Батиграфическая и объемная кривые характеризуют морфометрические особенности водохранилища при разной степени сработки полезного объема. Они используются при разработке диспетчерского графика регулирования стока, а также решении ряда практических задач: при планировании водозаборов на хозяйственные

нужды, санитарных попусков в нижний бьеф, реконструкции водохранилища и других гидротехнических сооружений.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение понятия «водохранилище» как антропогенное звено процесса стока.
2. Перечислите основные динамические (батиграфические) характеристики стока.
3. Какие исходные материалы используются для построения батиграфической и объемной кривых водохранилища?
4. Как определяется контур зоны прямого затопления будущего водохранилища в замыкающем створе плотины?
5. Как вычисляется объем водохранилища, объемы, заключенными между плоскостями изобат?
6. Как строятся объемная, батиграфическая и кривая средних глубин при нормальном подпорном уровне (НПУ)?
7. Как вычисляется средняя глубина, площадь и объем водохранилища графическим методом при его сработке?
8. Как определить параметры будущего водохранилища при изменении НПУ в сторону увеличения?
9. Какие практические задачи можно решать по батиграфической и объемной кривым?
10. Какова методика расчета объема водохранилища графическим способом по батиграфической кривой?

Задание 3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ВОДЫ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА НА ИСПАРИЕНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЮ

Основными видами потерь будущего водохранилища являются испарение с водной поверхности и фильтрация. Эти потери оказывают существенное влияние на водный баланс будущего водохранилища. Потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию составляют безвозвратные потери водных ресурсов водохранилищем. Поэтому эти составляющие имеют значение для практики водохозяйственных расчетов при планировании создания водохранилищ.

Потери на испарение являются следствием замены некоторой части суши водосбора водным зеркалом в результате создания водохранилища. Изменение объема стока до и после создания водохранилища определяется дополнительными потерями на испарение ($Z_{\text{доп}}$), рассчитанными по формуле:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{в}} - X(1 - \alpha_{\text{с}}), \quad (3.1)$$

где $Z_{\text{в}}$ – испарение с водной поверхности, мм; X – норма осадков для района проектирования, мм; $\alpha_{\text{с}}$ – коэффициент стока (для Беларуси принимается равным 0,35).

Значения $Z_{\text{в}}$ и X приведены в табл. 3.1. Дополнительные потери на испарение вычисляют за период открытого русла, в первом приближении их можно распределять пропорционально средним месячным температурам воздуха и дефициту влажности. В работе принимаем единое для всех районов распределение испарения по месяцам (табл. 3.2).

Таблица 3.1
Средние значения за год испарения с водной поверхности и осадков

Область проектирования	Испарение с водной поверхности $Z_{\text{в}}$, мм	Норма осадков X , мм
Брестская	600	550
Витебская	560	650
Гомельская	620	600
Гродненская	570	700
Минская	570	650
Могилевская	580	600

Отрицательное значение в марте показывает, что расчетное испарение в марте перекрывается величиной растаявшего льда. Расчетное испарение за декабрь – февраль принимается равным нулю.

Потери на фильтрацию происходят через дно и борта водохранилища, тело плотины, основание и в обход плотины, а также через неплотности затворов водопропускных и транспортных сооружений гидроузла и неработающих турбин (затворы, шлюзные ворота, направляющие аппараты и т.д.).

Таблица 3.2

Испарение по месяцам года $Z_{\text{доп}}$, %

III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сумма
-8	4	10	18	26	24	16	8	2	100

В результате сложности и недостаточной изученности явления фильтрации расчет потерь на фильтрацию представляет большие затруднения. При расчетах используются нормативные данные в виде слоя воды с поверхности зеркала водохранилища или в процентах от среднего объема водохранилища в зависимости от гидрогеологических условий (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Норма потерь на фильтрацию из водохранилища

Гидрогеологические условия	Слой потерь на фильтрацию за год, см	Норма потерь в % от среднего объема водохранилища	
		за год	за месяц
Хорошие	0 – 50	5 – 10	0,5 – 1
Средние	50 – 100	10 – 20	1 – 1,5
Плохие	100 – 200	20 – 40	1,5 – 3

Хорошие гидрогеологические условия соответствуют случаю, когда ложе водохранилища на значительную глубину сложено практически водонепроницаемыми породами (глины, плотные осадочные или массивные кристаллические породы без трещин). Средние гидрогеологические условия соответствуют маловодонепроницаемым грунтам чаши водохранилища. Плохие гидрогеологические условия характеризуются водопроницаемыми породами (трещиноватые

песчаники, известняки, сланцы и др.), особенно наличием карстовых пород, создается отток из водохранилища на питание грунтовых вод.

Содержание работы

1. Рассчитать годовую величину дополнительного испарения с поверхности водохранилища.

2. Рассчитать потери воды водохранилищем через дно и борта водохранилища, тело плотины, основание и в обход плотины, через затворы гидроузла.

Выполнение работы

1. Рассчитываем суммарную годовую величину слоя дополнительного испарения по формуле 3.5, принимая значения Z_b и X из табл. 3.2 для Гомельской области, где расположено с. Андреевка.

$$Z_{\text{доп}} = 620 - 600(1 - 0,35) = 230 \text{ мм} \quad (3.2)$$

Принимая величину 230 мм за 100 %, распределяем значения дополнительного испарения по месяцам, согласно типовому распределению (табл. 3.2). Дополнительные объемы испарения по месяцам определяются путем вычисления доли месячного испарения от суммарного объема испарения. Расчет ведем в табличной форме (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Испарение по месяцам года для р. Оресса – с. Андреевка $Z_{\text{доп}}$, %

Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сумма
$Z_{\text{доп}}$, %	-8	4	10	18	26	24	16	8	2	100
$Z_{\text{доп}}$, мм	-18,4	9,2	23,0	41,4	59,8	55,2	36,8	18,4	4,6	230,0

2. Потери воды на фильтрацию принимаем для средних гидрологических условий (исходя из исходных данных) 1 % в месяц или 12 % в год от наличного объема воды в водохранилище.

Задание 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА СЕЗОННОГО (ГОДИЧНОГО) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Параметры водохранилища, определяющие его размеры, устанавливают на основе водохозяйственного расчета. Объем воды в водохранилище подразделяют на мертвый и полезный.

Мертвый объем ($V_{\text{умо}}$) – это постоянная часть полного объема водохранилища, которая в нормальных условиях эксплуатации не сбрасывается и в регулировании стока не участвует.

Уровень мертвого объема (УМО) – уровень поверхности воды, ограничивающий этот объем сверху.

Главной задачей водохозяйственного расчета водохранилища является определение полезного объема и выбор отметки НПУ.

Полезный объем ($V_{\text{плз}}$) – основной объем водохранилища, непосредственно используемый для регулирования стока. Он расположен выше УМО и ограничен сверху нормальным подпорным уровнем (НПУ).

Нормальный подпорный уровень (НПУ) – наивысший проектный подпорный уровень верхнего бьефа, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации гидротехнических сооружений.

Полный объем водохранилища ($V_{\text{пшн}}$) соответствует отметке НПУ и равен сумме полезного и мертвого объемов (4.1)

$$V_{\text{пшн}} = V_{\text{нпу}} = V_{\text{умо}} + V_{\text{плз}}. \quad (4.1)$$

Мертвый объем и соответствующий ему УМО определяют с учетом ряда условий. На реках, транспортирующих большое количество наносов, мертвый объем необходим для аккумуляции твердого стока, чтобы предотвратить уменьшение полезного объема в течение расчетного срока службы водохранилища.

На водохранилищах, используемых для коммунально-бытового водоснабжения и рыбного хозяйства, главными факторами, определяющими мертвый объем и УМО, являются санитарно-технические требования и условия обеспечения необходимого качества воды. Согласно этим требованиям, средняя глубина воды в водохранилище при УМО не должна быть более 1,5–2,0 м, а площадь мелководья с глубинами менее 2 м – не более 30–35 % поверхности воды в водохранилище. При транспортном использовании водохранилища УМО определяют, как минимальный навигационный уровень, обеспечивающий необходимые глубины для судоходства.

Водохранилище вносит изменения в гидравлический режим водотока: уменьшаются уклоны свободной поверхности, скорости течения, транспортирующая способность, увеличиваются глубины потока. Вследствие этого наносы, влекомые потоком по дну или во взвешенном состоянии, осаждаются и откладываются в чаше водохранилища. Процесс заполнения водохранилища наносами называют *заилением*. Заиление главным образом определяется взвешенными наносами. Большое влияние на процесс заиления водохранилища оказывают колебания уровней воды в нем при его сработке и наполнении.

В заилении малых водохранилищ выделяются стадии занесения и заиления. На стадии занесения ложа водохранилища в его занесении преобладает твердый сток и продукты размыва берегов, выравнивания ложа. Стадия длится 15–20 лет, завершается выработкой профиля равновесия по перечникам вдоль береговой линии, ее выравниваем в лане. На стадии заиления участвуют и продукты развития органической жизни (остатки водной растительности, отмершего планктона, бентоса и др.). В отличие от первой стадии в ложе накапливаются илистые донные отложения.

Мертвый объем должен обеспечивать аккумуляцию наносов и отвечать санитарно-техническим условиям. В соответствии с этим определяется объем заиления водохранилища за период его работы исходя из объемов годовых наносов (4.2)

$$V_{н.год} = 31,5 \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{Q} \cdot \gamma^{-1}, \quad (4.2)$$

где $V_{н.год}$ – объем наносов за год, м³; \bar{Q} – норма годового стока, м³/с; $\bar{\rho}$ – норма годовой мутности, г/м³; γ – объемный вес наносов, т/м³.

Зная величину заиления за год и срок службы водохранилища, определяется объем заиления водохранилища за период его эксплуатации (4.3)

$$V'_н = V_{н.год} \cdot T, \quad (4.3)$$

где $V'_н$ – объем наносов за период эксплуатации, м³; T – срок службы водохранилища, лет.

Среднегодовой объем наносов в водохранилище в общем виде можно представить, как сумму объемов заиления и наносов от переработки берегов после наполнения водохранилища по формуле (4.4)

$$V = V_{\text{н}}' + V_{\text{н.с.}}, \quad (4.4)$$

где $V_{\text{н.с.}}$ – объем наносов в водохранилище от переработки берегов (принимается 5 % от объема заиления), м³ (4.5)

$$V_{\text{н.с.}} = 0,05 \cdot V_{\text{н}}'. \quad (4.5)$$

Полученная величина полного объема заиления проверяется – отвечает ли она санитарно-техническим условиям. По топографическим кривым (рис. 2.2) определяется средняя глубина водохранилища, если полученная глубина больше минимально допустимой, то принимается полный объем заиления за мертвый объем, т.е. $V = V_{\text{умо}}$. Если средняя глубина водохранилища получена меньше допустимой, тогда принимается глубина $h_{\text{сп}} = 2,0$ м и определяется мертвый объем водохранилища.

Водохозяйственный расчет водохранилища – совокупность расчетов по установлению основных параметров водохранилища и режима его работы. Основные параметры водохранилища (объем, отдача) и режим его работы устанавливаются путем сопоставления и анализа расчетного стока и планового потребления.

Наполнение водохранилища до $V_{\text{штп}}$ к началу максимального дефицита, а опорожнение до $V_{\text{умо}}$ к его окончанию. Расчет по второму варианту регулирования стока выполняют в порядке, обратном ходу времени, от момента $V_{\text{умо}}$, последовательно вычисляя объем наполнений и сбросов на начало каждого интервала времени. Для первого интервала времени конечное наполнение равно начальному плюс потери воды. Потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию за расчетный интервал времени Δt вычисляют, используя топографические характеристики водохранилища. При этом расчетный объем воды в водохранилище за определяемый интервал времени находят как полусумму начального и конечного наполнений без учета потерь (4.6)

$$V_{\text{расч}} = \frac{(V_{\text{пред}} + V_{\text{ок}})}{2}, \quad (4.6)$$

где $V_{\text{пред}}$ и $V_{\text{ок}}$ – предварительный и окончательный объемы расчетного периода, млн м³, который определяется по формуле (4.7)

$$V_{\text{пред}} = V_{\text{ок}} + (W - \Sigma q), \quad (4.7)$$

где $V_{ок}$ — окончательный объем воды в водохранилище за предыдущий интервал времени, млн м³; W — приток воды в данный интервал времени, млн м³; q — водопотребление в данный интервал времени, млн м³.

Для соответствующего предварительного объема по топографическим характеристикам определяется площадь зеркала водохранилища, по которой рассчитываются потери на испарение по формуле (4.8)

$$W_z = \frac{Z_{доп} \cdot F}{1000}, \quad (4.8)$$

где W_z — объем потерь на испарение, млн м³; $Z_{доп}$ — дополнительные потери на испарение, мм; F — площадь зеркала, млн м².

Потери на фильтрацию принимаются в зависимости от грунтовых пород, подстилающих водохранилище. Предварительное (начальное) наполнение для второго интервала времени принимают равным наполнению в конце первого интервала плюс разность стока и отдачи воды за рассматриваемый интервал и т.д. Окончательный объем на расчетный период вычисляется как (4.9)

$$V_{ок} = V_{пред} + W_{п}, \quad (4.9)$$

где $W_{п}$ — сумма потерь за расчетный период, млн м³.

Расчет ведется в табличной форме построчно. В результате находят конечные наполнения, а также сбросы излишков воды для каждого интервала времени и всего расчетного периода по формуле (4.10):

$$R = V_{ок} + (W - \Sigma q) - V_{итп} - W_{п}, \quad (4.10)$$

где R — объем сброса, млн м³.

Проверка правильности расчета производится по общему уравнению водного баланса (4.11)

$$\Sigma W = \Sigma q + \Sigma W_{п} + \Sigma R. \quad (4.11)$$

Выполнение работы

Требуется: определить объем водохранилища сезонно-годового регулирования на р. Оресса в створе д. Андреевка.

Дано: норма годового стока $\bar{Q} = 18,0$ м³/с (определяется как среднее многолетнее значение); годовой мутности $\bar{\rho} = 55$ г/м³; срок службы

водохранилища $T = 50$ лет; среднемесячные расходы воды; объемный вес наносов равен $\gamma = 1 \text{ т/м}^3$; гидрогеологические условия – средние.

Определяется объем заиления водохранилища, расположенного на р. Оресса у д. Андреевка, исходя из объемов годовых наносов, по формуле (4.2)

$$V_{\text{и.г.}} = 31,5 \cdot 55 \cdot 18,0 \cdot 1 = 31\,185 \text{ м}^3.$$

Определив величину заиления за 1 год, определяется объем заиления водохранилища за период его эксплуатации $T = 50$ лет по формуле (4.3)

$$V_{\text{и}}' = 31185 \cdot 50 = 1\,559\,250 \text{ м}^3 = 1,56 \text{ млн м}^3.$$

Определяется объем наносов в водохранилище от переработки берегов (принимается 5 % от объема заиления) по формуле (4.5)

$$V_{\text{п.б.}} = 0,05 \cdot 1,56 = 0,08 \text{ млн м}^3.$$

Далее по формуле (4.4) находим полный объем заиления

$$V = 1,56 + 0,08 = 1,64 \text{ млн м}^3.$$

Откладывается полученный объем на графике топографических характеристик (рис. 2.2) и определяется средняя глубина водохранилища $h_{\text{ср}} = 2,10$ м, что больше минимально допустимой 1,5–2,0 м. Следовательно мертвый объем водохранилища равен $V_{\text{умо}} = 1,64$ млн м^3 . Определяется отметка $\nabla \text{УМО} = 104,5$ м, которую показываем на графике.

Расчет водохранилища ведем в табличной форме (табл. 4.1). Заполнение таблицы расчета водохранилища начинается с многоводного периода в году, которым является весна (весеннее половодье), т.е. с марта месяца.

В графу 2 заносится приток воды, полученный в результате внутригодового распределения стока (месячные значения объема притока, рассчитываются по данным ежедневных расходов воды).

В графу 3 заносится потребление (в работе принимаем 75 % от суммы притока) и распределяется равномерно по месяцам.

$$q_i = \frac{0,75 \cdot \sum W_i}{12} = \frac{0,75 \cdot 288,63}{12} = 18,04 \text{ млн м}^3.$$

В графы 4 и 5 заносится разность между притоком и потреблением в зависимости от полученного знака: если разность получилась со знаком «-», то в графу 5, а если со знаком «+», то в графу 4.

В графу 9 заносится испарение по месяцам $Z_{\text{доп}}$ (см. табл. 3.4 задания 3).

Дальнейший расчет ведется построчно. На начало многоводной фазы, т.е. на начало марта и конец февраля записывается объем, равный $V_{\text{умо}} = 1,64$ млн м^3 , это значение заносится в графы 6 и 13. Расчет ведется в обратном порядке, т.е. снизу вверх. К окончательному объему на конец февраля прибавляется недостаток в феврале по формуле (4.9)

$$V_{\text{ПРЕДШ}}^{\text{II}} = 1,64 + 12,24 = 13,88 \text{ млн } \text{м}^3.$$

Полученный результат записывается на начало февраля в 6 графу. Расчетный объем в феврале находится по формуле 4.6 и записывается в 7 графу

$$V_{\text{РАСЧ}}^{\text{II}} = \frac{(1,64 + 13,88)}{2} = 7,76 \text{ млн } \text{м}^3.$$

По полученному расчетному объему находится площадь водного зеркала по топографическим характеристикам (рис. 2.2) и записывается значение в графу 8.

Потери на испарение определяем по формуле (4.8) для данного месяца и записываем в графу 10

$$W_z^{\text{II}} = \frac{0 \cdot 0,83}{1000} = 0 \text{ млн } \text{м}^3.$$

Потери на фильтрацию принимаем 1% (Средние гидрогеологические условия) от величины расчетного объема и полученный результат записываем в 11 графу

$$W_{\phi}^{\text{II}} = 0,01 \cdot 7,76 = 0,078 \approx 0,08 \text{ млн } \text{м}^3.$$

Далее находятся суммарные потери и записываем их в графу 12

$$W_{\text{II}}^{\text{II}} = 0 + 0,075 = 0,075 \text{ млн } \text{м}^3.$$

Таким образом, находится окончательный объем на начало февраля по формуле (4.9) и записываем его в 13 графу

$$V_{ОКЛ}^H = 13,88 + 0,08 = 13,96 \text{ млн м}^3.$$

К окончательному объему на конец января прибавляем недостаток в январе по формуле (4.17)

$$V_{ПРЕДШ}^H = 13,96 + 8,54 = 22,50 \text{ млн м}^3.$$

Полученный результат записывается на начало января в 6 графу. Расчетный объем в январе находим по формуле (4.6) и записываем в 7 графу

$$V_{РАСЧ}^{III} = \frac{(13,96 + 22,50)}{2} = 18,23 \text{ млн м}^3.$$

Далее расчет ведется аналогично до многоводной фазы, т.е. до максимального объема, который соответствует $V_{НПУ} = 89,85$ млн м³, а потом расчет начинается сверху. В этом случае потери отнимаются, т.к. идем «ходом вперед» и получаем для конца марта предварительный объем: $V_{ПРЕДШ}^K = 1,64 + 104,96 = 106,60$ млн м³, но данный объем превышает объем при НПУ, поэтому принимаем предварительный объем в данном месяце $V_{ПРЕДШ}^K = V_{НПУ} = 89,85$ млн м³, следовательно излишки воды в этом месяце сбрасываются. Объем сброса находится по формуле (4.10): $R_1 = 1,64 + 104,96 - 0,34 - 89,85 = 16,41$ млн м³.

Сбросы в апреле и мае рассчитываются аналогичным образом. После определения всех объемов, подсчитывается сумма притока, потребления, потерь и сбросов. Далее проводится проверка правильности расчета водохранилища по формуле (4.11): $288,63 = 216,47 + 7,95 + 64,21$; т.к. проверка выполняется, следовательно, расчет произведен верно.

По полученному объему $V_{НПУ} = 89,85$ млн м³, находится по топографическим характеристикам отметку $\nabla_{НПУ} = 122,5$ м и наносится на график (рис. 2.2).

Полезный объем водохранилища определяем по формуле (4.1)

$$V_{ПВЗ} = 89,85 - 1,64 = 88,21 \text{ млн м}^3.$$

Расчет водохранилища сезонно-годового регулирования стока

Таблица 4.1

Месяца	Объем, млн м ³		Разность		Предварительный объем $V_{пред}$, млн м ³	Расчетный объем $V_{расч}$, млн м ³	Площадь зеркала F , млн м ²	Дополнительное испарение $Z_{доп}$, мм	Объем потерь, млн м ³			Окончательный объем $V_{ок}$, млн м ³	Сброс R , млн м ³	
	1	2	3	4					5	6	7			8
	Приток W		Потребление, Σq	Избытки +	Недостатки -					на испарение W_z	на фильтрацию W_ϕ	Всего W_n		
III	123,00	18,04	104,96			1,64	45,74	6,36	-18,4	-0,12	0,46	0,34	1,64	16,41
IV	61,80	18,04	43,76			89,85	89,85	10,21	9,2	0,09	0,90	0,99	89,85	42,77
V	24,20	18,04	6,16			88,58	89,85	10,21	23	0,23	0,90	1,13	89,85	5,03
VI	13,00	18,04			5,04	82,25	86,06	9,83	41,4	0,41	0,86	1,27	83,54	
VII	5,77	18,04			12,27	68,95	76,12	8,79	59,8	0,53	0,76	1,29	69,98	
VIII	4,04	18,04			14,00	54,25	61,95	7,53	55,2	0,42	0,62	1,04	54,95	
IX	3,46	18,04			14,58	46,96	6,38	36,8	0,23	0,47	0,70			

Месяца	Объем, млн м ³			Разность		Предварительный объем $V_{пред}$, млн м ³	Расчетный объем $V_{расч}$, млн м ³	Площадь зеркала F , млн м ²	Дополнительное испарение $Z_{доп}$, мм	Объем потерь, млн м ³				Окончательный объем $V_{ок}$, млн м ³	Сброс R , млн м ³
	2	3	4	5	6					7	8	9	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
	Приток W	Потребление, Σq	Избытки +	Недостатки -					на испарение W_2	на фильтрацию $W_ф$	Всего $W_{п}$				
X	6,06	18,04		11,98	39,24	33,25	5,2	18,4	0,10	0,33	0,43	39,67			
XI	14,40	18,04		3,64	26,99	25,17	4,39	4,6	0,02	0,25	0,27	27,26			
XII	17,60	18,04		0,44	23,12	22,90	4,18	0	0,00	0,23	0,23	23,35			
I	9,50	18,04		8,54	22,50	18,23	3,48	0	0,00	0,18	0,18	22,68			
II	5,80	18,04		12,24	13,88	7,76	0,83	0	0,00	0,08	0,08	13,96			
Сумма	288,63	216,47			1,64						7,95	1,64	64,21		

Окончание табл. 4.1

Контрольные вопросы

1. Назвать основные проектные характеристики водохранилища.
2. Какие показатели водохранилищ относятся к группе наблюдаемых.
3. С какой целью в водохранилищах выделяется мертвый объем ($V_{умо}$)?
4. Для каких целей в водохранилищах устанавливается уровень форсирования (УФ)?
5. Как определяется объем заиления водохранилища за период эксплуатации?
6. Как определяется окончательный объем заиления водохранилища?
7. По какой формуле рассчитывается интенсивность заиления водохранилища?
8. Какие стадии выделяются в процессе заиления водохранилищ?
9. Какова скорость накопления донных отложений в водохранилищах Беларуси?

Задание 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАВОДКОВОГО СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ

В период половодья (паводка) часть излишков воды временно задерживается в водохранилище. При этом происходит повышение уровня воды сверх НПУ, т.е. форсирование уровня, и гидрограф половодья (паводка) трансформируется (распластывается) в гидрограф сбросных расходов. Образование объема форсировки, аккумулирующей часть стока высоких вод, позволяет снизить максимальные расходы, поступающие в нижний бьеф водохранилища, и тем самым предотвратить наводнения на нижерасположенных участках реки, а также уменьшить размеры водосбросных гидротехнических сооружений. Вместе с тем повышение уровня воды в водохранилище выше НПУ влечет за собой увеличение высоты плотины и приводит к дополнительному затоплению и подтоплению земель. В связи с этим оптимальный объем, предназначенный для снижения максимальных расходов половодья (паводка) или борьбы с наводнениями в нижнем бьефе водохранилища, устанавливается на основе технико-экономических расчетов.

Водохозяйственный расчет водохранилища на пропуск максимальных расходов выполняют на основе уравнения водного баланса воды в водохранилище.

Излишки воды из водохранилища сбрасываются через водосбросные сооружения. На водохранилищах в качестве водосбросных сооружений наиболее распространены водосливы практического профиля с щитами на гребне или без щитов, а также донные водовыпуски с затворами.

В случае свободного (не подтопленного) истечения через водослив расход определяют по формуле (5.1)

$$q = m \cdot B \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0^3}, \quad (5.1)$$

где m – коэффициент расхода водослива, м; B – ширина водослива, м; H_0 – полный действующий напор, т.е. напор с учетом скорости подхода, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

При графоаналитических расчетах уравнение водного баланса воды в водохранилище можно записать в следующем виде

$$V_K + \frac{1}{2} \cdot q_K \cdot \Delta t = \bar{Q} \cdot \Delta t + (V_H + \frac{1}{2} \cdot q_H \cdot \Delta t) - q_H \cdot \Delta t, \quad (5.2)$$

где V_H и V_K — объем воды в водохранилище в начале и в конце интервала времени соответственно, млн m^3 ; q_H и q_K — сброс воды в водохранилище в начале и в конце интервала времени соответственно, m^3/c ; Δt — расчетный интервал времени, с; \bar{Q} — норма стока, m^3/c .

Члены правой части уравнения (5.2) известны для каждого интервала времени, т.к. в начальный момент первого интервала их определяют по исходным параметрам, а затем передают расчетом от одного интервала к другому. Члены V_K и q_K , стоящие в левой части уравнения, необходимо определить расчетом.

Предварительно, задаваясь различными слоями форсировки h_{ϕ} , вычисляют (по расчетному гидрографу стока и топографическим характеристикам) соответствующие этим значениям объемы водохранилищ и сбросные расходы q_H (по уравнению расхода сбросного сооружения). По полученным данным строят график зависимости сбросных расходов от объема воды в водохранилище $q = f(V)$. Далее в табличной форме выполняют расчет по уравнению (5.2).

Для водосбросного сооружения водосливного типа с отметкой гребня, равной НПУ, в случае, когда водохранилище перед половодьем (паводком) наполнено до НПУ, в начале первого расчетного интервала времени Δt расходы притока $Q_{\text{пр}}$ и сброса $q_{\text{сб}}$ равны нулю, наполнение водохранилища $V_{\text{нл}} = V_{\text{НПУ}}$. В конце этого интервала приток $Q_{\text{с}}$ определяется как соответствующая ордината расчетного гидрографа.

Конечные значения расхода стока $Q_{\text{с}}$, сбросного расхода $q_{\text{сб}}$ и наполнения водохранилища $V_{\text{с}}$ в конце первого интервала являются начальными для второго интервала времени и т.д. По результатам расчета строят кривую сбросных расходов.

Уточненное значение слоя форсировки рассчитывается как (5.3)

$$h_{\phi} = \left(\frac{q_{\text{max}}}{m \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{2/3}, \quad (5.3)$$

где q_{max} — максимальный сбросной расход, снятый с кривой сбросных расходов.

Форсированный подпорный уровень, создаваемый путем форсирования уровня воды в водохранилище выше НПУ в период

высоких паводков или половодий для предотвращения наводнения в нижнем бьефе, определяется следующим образом (5.4)

$$\nabla \text{ФПУ} = \nabla \text{НПУ} + h_{\phi} . \quad (5.4)$$

Объем форсировки (регулирующий объем водохранилища) определяется как разность объемов при ФПУ и НПУ по формуле (5.5)

$$V_{\phi} = V_{\text{ФПУ}} - V_{\text{НПУ}} . \quad (5.5)$$

Объемы при ФПУ и НПУ снимаются с топографических характеристик водохранилища.

Содержание работы

1. Рассчитать полезный объем водохранилища.
2. Рассчитать кривую сбросных расходов воды весеннего половодья для проектируемого водохранилища.

Выполнение работы

Требуется: рассчитать кривую сбросных расходов весеннего половодья р. Оресса в створе с. Андреевка для проектируемого водохранилища.

Дано: отметка НПУ = 122,5 м (раздел 2); $Q_{\text{max}5\%} = 143 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчет производится в следующем порядке:

Принимается отметка форсированного подпорного уровня и по формуле (5.5) рассчитывается слой форсировки

$$h_{\phi} = 124 - 122,5 = 1,5 \text{ м} .$$

По полученному значению слоя форсирования определяется ориентировочное значение ширины водослива по формуле (5.1), коэффициент бокового сжатия принимается $m = 0,46$

$$B = \frac{143}{0,46 \cdot 1,5^{3/2} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81}} = 38,2 \text{ м} .$$

В связи с тем, что регулирующая емкость водохранилища уменьшает $Q_{\text{max}5\%}$ расчетное значение ширины водослива B уменьшают на 10 – 15 %, в расчет принимаем $B = 32 \text{ м}$.

Далее определяется сбросной расход по формуле (5.1)

$$q = 0,46 \cdot 32 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot h^{3/2}} = 65,2 \cdot h^{3/2}$$

По полученным данным определяются координаты вспомогательного графика зависимости сбросных расходов от объема воды в водохранилище, принимается $\Delta t = 2 \text{ сут} = 0,1728 \text{ млн с}$ в табличной форме (табл. 5.1). Расчет сбросного расхода ведется по полученной зависимости, начиная с отметки НПУ, значения объемов V снимается с топографических характеристик (раздел 2, рис. 2.2).

Таблица 5.1

Расчет координат вспомогательного графика зависимости сбросных расходов от объема воды в водохранилище

$H, \text{ м}$	$h_0, \text{ м}$	$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\text{п}},$ млн м^3	$V = V_{\text{п}} -$ $V_{\text{НПУ}},$ млн м^3	$0,5q\Delta t,$ млн м^3	$V+0,5q\Delta t,$ млн м^3
1	2	3	4	5	6	7
НПУ=122,5	0	0	89,85	0	0	0
123,0	0,5	23,1	92,50	2,65	1,99	4,64
123,5	1,0	65,2	99,30	9,45	5,63	15,08
124,0	1,5	119,8	105,20	15,35	10,35	25,70

По результатам расчета строится график зависимости сбросных расходов от объема воды в водохранилище (рис. 5.1) по графам 3 и 7.

Дальнейший расчет трансформации паводка ведется в табличной форме (табл. 5.2). Время паводка делится на равные интервалы ($\Delta t = 2 \text{ сут} = 0,1728 \text{ млн с}$) и записывается в графу 2. Далее по расчетному гидрографу весеннего половодья (раздел 5.2) снимается расход на начало и конец данного периода времени, полученные данные заносятся в графы 3 и 4. Затем находится среднее значение и записывается в графу 5. Сбросной расход в начальный момент времени равен нулю (графа 6). По правой части формулы (5.2) определяем объем на конец первого интервала (начало второго), полученное значение записываем в графу 8.

Сбросной расход на начало второго периода находится по конечному объему воды в водохранилище первого интервала $V_{\text{ик}} = 0,007 \text{ млн м}^3$ по рис. 5.3 и записывается во второй интервал в графу 6. Полученное значение сбросного расхода умножается на интервал времени и результат заносим в графу 7

$$q_2 \cdot \Delta t = 0,02 \cdot 0,1728 = 0,004 \text{ млн м}^3.$$

Далее аналогичным образом по правой части формулы (5.2) находим объем на конец второго интервала

$$V_{ик} = 0 + 0,041 \cdot 0,1728 - 0 \cdot 0,1728 = 0,007 \text{ млн м}^3.$$

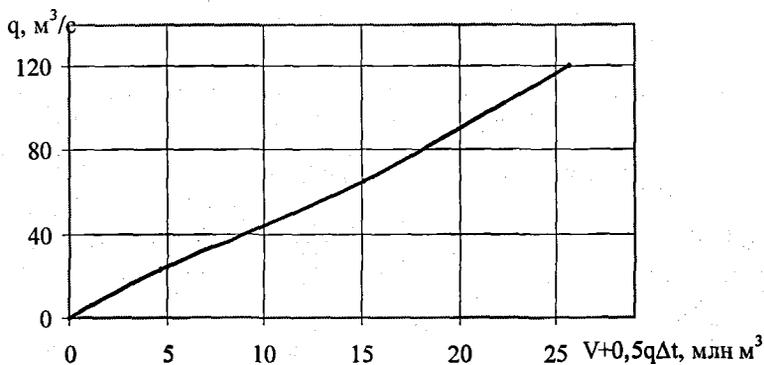


Рис. 5.3. График зависимости сбросных расходов от объема воды в водохранилище

$$V_{зк} = 0,007 + 1,47 \cdot 0,1728 - 0,004 = 0,257 \text{ млн м}^3.$$

Ход вычислений повторяется до конца периода половодья.

Таблица 5.2
Расчет трансформации половодья р. Оресса – с. Андреевка

Интервал	Δt , млн с	$Q_{вн}$, м³/с	$Q_{вк}$, м³/с	$\frac{Q_{вн} + Q_{вк}}{2}$	q , м³/с	$q \cdot \Delta t$, млн м³	$V_{кн}$, млн м³
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,1728	0,0	0,082	0,041	0	0	0,007
2	0,1728	0,082	2,86	1,47	0,02	0,004	0,257
3	0,1728	2,86	18,0	10,4	0,89	0,15	1,90
4	0,1728	18,0	45,7	31,9	6,87	1,19	6,22
5	0,1728	45,7	76,5	61,1	24,5	4,23	12,6
6	0,1728	76,5	104	90,0	55,4	9,58	18,5
7	0,1728	104	122	113	90,2	15,6	22,4

Окончание табл. 5.2

Интервал	Δt , млн с	$Q_{в}$, м ³ /с	$Q_{с}$, м ³ /с	$\frac{Q_{в}+Q_{с}}{2}$	q , м ³ /с	$q \cdot \Delta t$, м ³ /с	$V_{с}$, млн м ³
1	2	3	4	5	6	7	8
8	0,1728	122	134	128	116	20,0	24,5
9	0,1728	134	140	137	131	22,6	25,6
10	0,1728	140	140	140	138	23,9	25,9
11	0,1728	140	136	138	140	24,2	25,5
12	0,1728	136	130	133	138	23,8	24,7
13	0,1728	130	123	126	132	22,8	23,7
14	0,1728	123	114	118	125	21,6	22,5
15	0,1728	114	105	109	117	20,2	21,2
16	0,1728	105	94,6	99,7	108	18,6	19,8
17	0,1728	94,6	85,5	90,1	98,5	17,0	18,4
18	0,1728	85,5	77,9	81,7	89,2	15,4	17,1
19	0,1728	77,9	69,1	73,5	81,2	14,0	15,7
20	0,1728	69,1	62,4	65,8	73,3	12,7	14,4
21	0,1728	62,4	55,8	59,1	65,8	11,4	13,3
22	0,1728	55,8	52,8	54,3	59,4	10,3	12,4
23	0,1728	52,8	44,1	48,5	54,6	9,44	11,3
24	0,1728	44,1	38,9	41,5	49,0	8,47	10,0
25	0,1728	38,9	33,9	36,4	42,4	7,33	9,00
26	0,1728	33,9	29,5	31,7	37,3	6,45	8,03
27	0,1728	29,5	25,6	27,53	32,7	5,65	7,13
28	0,1728	25,6	22,6	24,12	28,6	4,94	6,36

По результатам расчета табл. 5.2 (графа 6) и, используя расчетный гидрограф весеннего половодья (рис. 5.4), строится совместный график расчетный гидрограф весеннего половодья и кривую сбросных расходов, который представлен на рис. 5.1.

Далее рассчитываем уточненное значение слоя форсировки по формуле (5.3), максимальный сбросной расход снимаем с кривой сбросных расходов $q_{max} = 143 \text{ м}^3/\text{с}$

$$h_{\phi} = \left(\frac{143}{0,46 \cdot 32 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{2/3} = 1,69 \text{ м.}$$

По формуле (5.4) определяем отметку ФПУ

$$\nabla \text{ФПУ} = 122,5 + 1,69 = 124,19 \text{ м.}$$

По топографическим характеристикам (рис. 2.2) определяем объем воды в водохранилище, соответствующий отметке 124,19 м, и по формуле (5.5) вычисляем объем форсировки

$$V_{\text{ф}} = 105,20 - 89,85 = 15,35 \text{ млн м}^3.$$

Отметка ФПУ наносится на график (рис. 2.2).

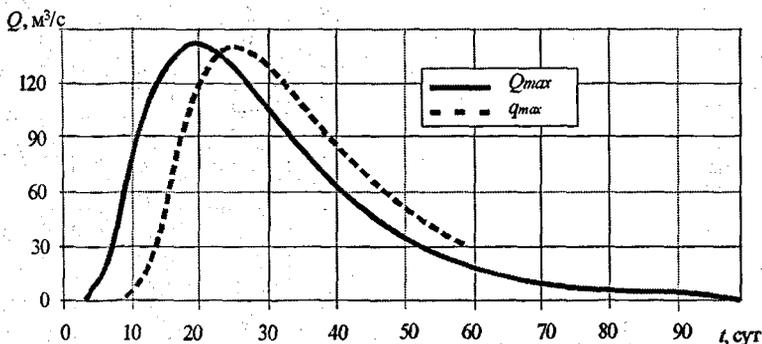


Рис. 5.4. Расчетный гидрограф весеннего половодья и кривая

Рассмотрение совмещенных на одном чертеже расчетного гидрографа половодья (паводка) и кривой сбросных расходов через водослив показывает, что максимальный расход сброса находится на спаде половодья в точке пересечения гидрографов стока и сброса, т.е. когда $Q = q$. Возрастание сбросных расходов запаздывает по сравнению с расходами половодья. Запаздывание тем больше, чем больше площадь водной поверхности водохранилища. Объясняется это тем, что чем больше площадь водной поверхности водохранилища, тем медленнее повышается уровень воды с возрастанием расхода половодья. Кривая сбросных расходов зависит от формы гидрографа половодья, типа сбросного сооружения и характеристик водохранилища.

Контрольные вопросы

1. В чем выражается трансформация паводкового стока водохранилищем?
2. Что показывает диспетчерский график водохранилища и с какой целью он рассчитывается?

3. Как определяется расход воды из водохранилища в случае свободного (подтопленного) истечения через водослив?
4. По какой формуле вычисляется водный баланс водохранилища при графоаналитических расчетах?
5. Для каких целей строится кривая сбросных расходов?
6. Какие факторы влияют на форму кривой сбросных расходов?

Список литературы

Арсеньев, Г.С. Основы управления водными ресурсами водохранилищ: учеб. пособие / Г.С. Арсеньев. – СПб. : Изд. РГГМУ, 2003. – 78 с.

Волчек, А.А. Гидрометрическая практика: пособие / А.А. Волчек, В.К. Курсаков, Ан. А. Волчек. – Горки : Белорус. гос. сельскохоз. акад., 2011. – 200 с.

Волчек, А.А. Гидрологические расчеты: учеб.-метод. пособие / А.А. Волчек, П.С. Лопух, Ан. А. Волчек. – Минск : БГУ, 2019. – 315 с.

Волчек, А.А. Методические указания к выполнению практических заданий и курсовой работе по курсу «Инженерная гидрология и регулирование стока» для студентов специальностей: 74 05 01 – «Мелиорация и водное хозяйство» и 70 04 03 – «Водоснабжение, водоотведение, очистка природных и сточных вод» дневной формы обучения / А.А. Волчек, Ю.В. Стефаненко, Ан. А. Волчек. – Брест : Брест. гос. техн. универ., 2010. – 68 с.

Железняков, Г.В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Г.В. Железняков, Т.А. Неговская, Е.Е. Овчаров; под ред. Г.В. Железнякова. – М. : Колос, 1984. – 205 с.

Лопух, П.С. Гидрология водохранилищ: курс лекций / П.С. Лопух. – Минск : БГУ, 2013. – 300 с.

Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.

Савичев, О.Г. Расчет водохранилищ: водохозяйственное обоснование и определение параметров. Ч.1. Расчет параметров водохранилища. Учеб. пособие / О.Г. Савичев, В.В. Крамаренко. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – 41 с.

Содержание

Введение	3
Примерный тематический план распределения учебных часов практикума и их дифференцированная оценка	4
Задание 1. Обоснование необходимости строительства водохранилища	5
Задание 2. Построение объемной и батиграфической (топографической) кривых водохранилища	13
Задание 3. Расчет потерь воды из водохранилища на испарение и фильтрацию	19
Задание 4. Определение емкости водохранилища сезонного (годового) регулирования	22
Задание 5. Определение трансформации паводкового стока водохранилищем	32
Список литературы	40

Учебное издание

**Лопух Петр Степанович
Волчек Александр Александрович**

**ГИДРОЛОГИЯ
ВОДОХРАНИЛИЩ**

**Практикум
для студентов специальности
1-31 02 02 «Гидрометеорология»**

В авторской редакции

Ответственный за выпуск *И. А. Чернышева*

Подписано в печать 26.02.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,90. Тираж 50 экз. Заказ

Белорусский государственный университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/270 от 03.04.2014.

Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика
на копировально-множительной технике
факультета географии и геоинформатики
Белорусского государственного университета.
Ул. Ленинградская, 16, 220006, Минск.