

**И. Г. ГАЛЯМИНА, Т. И. МАТВЕЕВА, В. Н. МАРКИН,
Л. Д. РАТКОВИЧ, И. В. ГЛАЗУНОВА, А. М. БАКШТАНИН**

**УПРАВЛЕНИЕ
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ
СИСТЕМАМИ**

Учебное пособие

*Учебное пособие рекомендуется научно-методическим советом
по Природообустройству и водопользованию для использования
в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров
по направлениям 20.03.02 и 20.04.02
Природообустройство и водопользование*

Москва
2020

УДК 628.15.005(076.8)
ББК 38.76
Г 179

Рецензенты:

заведующий отделом мелиоративно-водохозяйственного комплекса
ФГБНУ ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова **Л. А. Бубер**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Гидрология,
гидрогеология и регулирование стока» ФГБОУ ВО «РГАУ–МСХА
имени К. А. Тимирязева **Н.П. Карпенко**

**Галямина И. Г., Матвеева Т. И., Маркин В. Н., Раткович Л. Д.,
Глазунова И. В., Бакштанин А. М.**

Г 179 Управление водохозяйственными системами: учебное пособие /
И. Г. Галямина, Т. И. Матвеева, В. Н. Маркин, Л. Д. Раткович, И. В. Глазунова,
А. М. Бакштанин, 2-е изд., перераб. и доп. / ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени
К. А. Тимирязева. – М. : ООО «Мегаполис», 2020. – 127 с.

ISBN 978-5-6044861-6-0

В работе представлен курс лекций и учебное пособие для выполнения практического задания. Материал лекционного курса изложен в соответствии с рабочими программами дисциплин, снабжен словарем используемых терминов, иллюстрирован таблицами, рисунками и расчетными примерами. В учебном пособии для выполнения практического задания рассматриваются вопросы обоснования решений по выбору параметров водохозяйственной системы комплексного назначения и водораспределения между ГЭС и орошением на основе оптимизационных расчетов. Состав работы определяется необходимостью постановки и решения одно и многокритериальных оптимизационных задач. Учебное пособие построено таким образом, чтобы иметь возможность выполнять курсовые и выпускные квалификационные работы, а также проводить промежуточную проверку знаний студентов. Предусмотрена возможность использования пособия для выполнения расчетно-графических работ. Учебное пособие позволяет решать оптимизационные вопросы на основе исходных данных конкретного объекта и задания их по вариантам.

На титульном листе представлена фотография Кечутского водохранилища в Армении (площадь – 145 га, объем – 23 млн м³, средняя глубина – 20 м, длина береговой линии – 8,5 км), с сайта https://ru.wikipedia.org/wiki/Кечутское_водохранилище

УДК 628.15.005(076.8)
ББК 38.76

ISBN 978-5-6044861-6-0

© Коллектив авторов, 2020
© ООО «Мегаполис», 2020

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КУРС УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Термины и определения

1. **Водохозяйственная система** – совокупность природных и технических объектов, связанных между собой территориально и функционально.

2. **Качество воды** – характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования.

3. **Критерий оптимизации** – математический эквивалент цели операции, позволяющий количественно оценить степень достижения данной цели.

4. **Методология управления** – это совокупность методов, техники и процедур, используемых при познании процессов управления с целью обеспечения эффективного функционирования системы.

5. **Моделирование** – это создание образа реального объекта, заменяющего его для получения информации, путем проведения экспериментов.

6. **Оптимизация** – процесс выбора наилучшего варианта управления системой из возможных, при заданных требованиях и ограничениях.

7. **Планирование** – непрерывный процесс установления и конкретизации целей развития системы и ее структурных подразделений, определения средств их достижения, сроков и последовательности реализации, распределения ресурсов.

8. **Производственная функция** – зависимость объема получа-

емой продукции от использования водных ресурсов.

9. **Система** – это единое целое, состоящее из взаимозависимых элементов (компонентов).

10. **Системный подход** – общий метод исследования объекта как единого целого, состоящего из совокупности взаимосвязанных и взаимозависимых элементов.

11. **Стратегия управления** – долговременное и качественно определенное направление деятельности в соответствии с поставленной целью.

12. **Управление водными ресурсами** – это процесс планирования, организации, мотивации и контроля водохозяйственной деятельности, для достижения поставленных целей.

13. **Управление** – это целенаправленный и постоянный процесс воздействия субъекта управления на объект управления.

14. **Управленческое решение** – это выбор наилучшей альтернативы из числа возможных, предполагающей набор эффективных действий, направленный на устранение проблем, которые возникли на объекте управления.

15. **Целевая функция** – функция нескольких переменных, подлежащая оптимизации в целях определения наилучшего значения оптимизируемого параметра с помощью некоторого критерия.

1. Цель, задачи и стратегия управления водными ресурсами

Управление – это целенаправленный и постоянный процесс воздействия субъекта управления на объект управления. Таким образом, управлять – значит предвидеть, организовывать, распоряжаться, координировать и контролировать.

- **Предвидеть** – учитывать возможные события будущего и планировать программу действий.

- **Организовывать** – сформировать систему, ее материально-техническую базу и социальный состав.

- **Координировать** – согласовать действия всех элементов системы.

- **Контролировать** – проверка осуществления деятельности в соответствии с установленными правилами и управляющими воздействиями.

Цель управления – это создание и сохранение определенного состояния системы, путем организованной деятельности. Цель управления отличается от целей других видов деятельности, желаемым свойством системы управления. Управление позволяет ограничить разнообразие вариантов деятельности (т. е. выбрать единственный из альтернативных вариантов).

В соответствии с законом «Необходимого разнообразия» [Реймерс, 1990], снижение разнообразия в поведении системы достигается только за счет увеличения разнообразия управлений (разнообразие уничтожает разнообразие). Этот закон имеет фундаментальное значение, в частности, он устанавливает, что эффективное управление в сложных системах не осуществимо с помощью «простых» средств.

Задачи управления:

- изучение влияния факторов на поведение системы;
- прогноз реакции системы на управляющие воздействия;
- планирование управленческой деятельности;
- реализация планов;
- мониторинг состояния системы;
- корректировка управляющих решений.

Установление целей управления предполагает прохождение следующих этапов:

1) определение частных задач (*например, в бассейне реки отмечаются: перебои с подачей воды для целей промышленности; весной с высокой вероятностью происходит затопление земель; качество воды в реке неудовлетворительное*);

2) выявление приоритетности частных задач (*например, перебои водоснабжения промышленности незначительные и не приводят к существенному снижению экономических показателей. Затопление земель происходит на площадях, где нет групповых поселений. Таким образом данные задачи не приоритетные. Напротив, неудовлетворительное качество воды отмечается повсеместно и резко снижает доходные статьи экономики*);

3) выявление общих задач, которые и представляют собой общие цели (*в рассматриваемом примере общая задача – улучшение качества речной воды*);

4) разработка частных задач для достижения поставленных

целей (например, для улучшения качества воды водных объектов определяются источники загрязнения, их вклад в загрязнение реки и разрабатываются водоохранные мероприятия).

На рассмотренных этапах используются разные методы и способы, которые позволяют определить стратегию управления.

Стратегия управления – долговременное и качественно определенное направление деятельности в соответствии с поставленной целью. Стратегия позволяет сконцентрировать усилия на тех вариантах решения, которые лучшим образом отвечают принятой цели. Выделяют три основных вида стратегии:

- ограниченного роста – формирование целей от достигнутого результата с учетом корректирующих коэффициентов. Применяется в условиях нестабильной обстановки, условиями возможных рисков, для средне и долгосрочного развития.



Рисунок 1.1 – Стратегии ограниченного роста установленная по среднему или минимальному темпу роста

- значительного роста – повышение уровня краткосрочной цели организации по сравнению с прошлыми периодами. Она применяется в динамично развивающихся отраслях с быстро обновляющимися технологиями;



Рисунок 1.2 – Стратегии значительного роста, установленная для выявленных темпов роста

- комбинированная стратегия – выбор стратегии осуществляется после анализа внешней среды и определения сильных и слабых сторон организации.
- Требования к управлению:
 - *устойчивость* – способность системы сохранять некоторое свое качество в процессе управления, несмотря на влияние на систему внешних и внутренних факторов (*например, гидроузел обеспечивает водой отрасли экономики в разных гидрологических условиях (внешние факторы), в независимости от проведения ремонтных работ (внутренние факторы)*);
 - *оперативность* – способность укладываться в обозначенные сроки (*в соответствии с поговоркой – хороша ложка к обеду*);
 - *гибкость* – способность быстро приспосабливаться к изменяющимся условиям (*например, на насосной станции имеются основные и резервные насосы с возможностью регулировать подачу путем открытия и закрытия задвижек. Наличие датчиков давления и расходомеров позволяет оперативно реагировать на изменяющиеся условия*);
 - *непрерывность* – отсутствие пауз и перерывов между последовательными стадиями процесса (*например, замораживание строительства это прерывание процесса управления*);

- *целенаправленностью* – деятельность направляется на достижение конечной цели (*отсутствие цели означает отсутствие управления*);

- *эффективностью* – характеристика деятельности системы (*стратегия управления направляется на получение экономического, социального, экологического эффекта. Например, девиз «Цель оправдывает средства», применяемый в смысле – «любой ценой», не отвечает требованиям эффективности управления*).

Управление возможно при выполнении ряда условий.

1. Мониторинг объекта управления, что позволяет получать необходимую информацию об объекте, в том числе происходящие в системе изменения, и отклик системы на управляющее воздействие.

2. Управляемость – способность объекта управления переходить из текущего состояния в требуемое под воздействиями управления. *Например, перемещение элементов системы в пространстве, изменение скорости и направления их движения, изменение структуры или свойств системы. (Если состояние системы не меняется, то понятие управления теряет смысл).*

3. Наличие цели управления, т.е. набор значений количественных или качественных характеристик, определяющих требуемое состояние системы. *(Если цель неизвестна, управление не имеет смысла, а изменение состояний превращается в бесцельное блуждание).*

4. Наличие альтернативных вариантов управления, т. е. возможность выбора управляющих решений из некоторого множества допустимых альтернатив. *(Чем меньше это множество, тем менее эффективно управление, так как в условиях ограничений оптимальные решения часто остаются за пределами области адекватности (рисунок 1.3). Наличие единственной альтернативы говорит о том, что управление не требуется. Если решения не влияют на изменение состояния объекта управления, то управления не существует).*

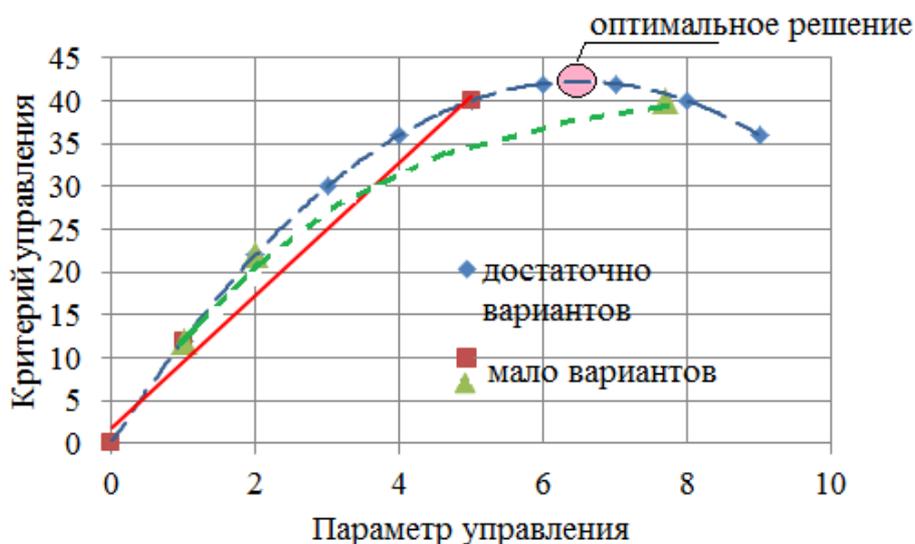


Рисунок 1.3 – Выбор оптимального вариант при достаточном (есть оптимальное решение) и малом количестве (картина сильно искажается, что приводит к невозможности определения оптимального решения) альтернатив

5. Наличие критерия эффективности управления. Критерий эффективности управления определяет степень достижения цели функционирования системы (*например, оценка знаний студентов: зачет, незачет – говорит об удовлетворительном или неудовлетворительном знании*).

6. Наличие ресурсов (материальных, финансовых, трудовых и т. д.), обеспечивающих реализацию принятых решений. Отсутствие ресурсов равносильно отсутствию свободы выбора. Управление без ресурсов невозможно.

2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ

Методология управления – это совокупность методов, техники и процедур, используемых при познании процессов управления с целью обеспечения эффективного функционирования системы. Основными методологическими аспектами являются: объект управления и методы исследования.

Объектом исследования в водном хозяйстве является водохозяйственная система (ВХС), т. е. совокупность природных и технических объектов, связанных между собой территориально и функционально. Например, ВХС включает: водные объекты, пользователей водными ресурсами, технические средства и сооружения, поз-

воляющие использовать воду. Водохозяйственная система относится к разряду «сложных систем», которым свойственно: *большое количество компонентов системы и огромное количество структурных связей между ними*. Системы управления обладают особенностями:

- **Целостность** – свойства системы не сводятся к сумме свойств составляющих ее элементов (*например, плотина создает подпор уровня воды в реке, водосбросные сооружения позволяют пропускать объемы воды в нижний бьеф, водозаборные сооружения позволяют забирать воду из водохранилища – это свойства отдельных элементов гидроузла.*) Все они, собранные в единую систему, позволяют безаварийно обеспечивать водой потребителей, что невозможно без организованной работы всех элементов системы);

- **наличие информационных связей**, что играет решающую роль в сохранении целостности системы управления (*это возможность выдачи управляющих команд и контролировать их выполнение*).

- **допустимость множества альтернатив поведения системы** (*без альтернатив не возможен выбор, а значит отсутствует управление*);

- **открытость** – возможность взаимовлияния между системой и внешней средой (*например, водохранилище создается на реке и наполняется ее водами, т.е. река является внешней средой. С другой стороны, водохранилище должно позволять обеспечивать водой потребителей в разных гидрологических условиях*).

Управление сложными системами осуществляется на основе использования специальных методов. **Методы управления** – это совокупность приемов и способов воздействия на управляемый объект для достижения поставленных целей.

Выделяют следующие методы:

1. **Общенаучный** – основан на сравнении (*например, методы аналогии*), анализе (*разделение системы на составляющие, для изучения поведения целого на основе изучения поведения элементов*), синтезе (*изучение возможностей объекта в целом*), интуиции (*принятие управляющего решения на основе богатого опыта*);

2. **Специальный** – основан на использовании специального инструментария, *например, математического моделирования*.

3. **Системный подход** – общий метод исследования объекта как

целого, т. е. как совокупности элементов, находящихся во взаимодействии. Это означает, что все изучается от **общего к частному**. Основные требования к использованию системного подхода:

- выделение системы из окружающего мира и определение взаимосвязей с внешней средой;
- определение составных элементов системы;
- рассмотрение отношений между элементами и структурой системы;
- анализ функций элементов по отношению к системе;
- выявление системообразующих связей;
- определение механизма функционирования системы.

Системный подход к управлению сложными системами базируются на ряде универсальных принципов.

1. Принцип системности – любая сложная система, состоит из множества взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, которые сами являются системами, состоящими из более мелких взаимосвязанных элементов. Кроме того, сама исходная система является одновременно подсистемой более сложной системы.

2. Принцип декомпозиции – возможность разбиение системы по тому или иному признаку на множество элементов и связей между ними.

3. Принцип композиции – заключается в возможности объединения множества элементов (подсистем) с помощью множества связей в единую систему по единым правилам.

4. Принцип эффективности – состоит в том, что достижение требуемого экологического, экономического и социального уровня эффективности системы обеспечивается повышением согласованности ее элементов, и целенаправленным формированием структуры системы.

5. Принцип обратной связи – коррекция управляющих воздействий на основе выходной информации. Выделяют положительные и отрицательные обратные связи.

- Отрицательная обратная связь – предназначенная для поддержания системы в заданном состоянии при неизменном значении описывающих ее параметров, для достижения так называемой долговечной цели. *Жесткая программа управления.*

- Положительная обратная связь – предназначенная для пере-

вода системы в новое состояние, которое зависит от сложившейся конкретной ситуации, т. е. для достижения текущей цели. *Мягкое управление.*

3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВХС

Эффективное управление невозможно без информации. Требования к информации.

1. **Объективность и достоверность** – информация должна достоверно отражать реальное состояние объекта и не зависеть от методов ее получения и субъективного мировосприятия.

2. **Полнота** – информация должна быть достаточной для понимания состояния объекта и принятия решений.

3. **Точность** – определяет степень близости информации к реальному состоянию объекта.

4. **Эффективность** – затраты на получение информации должны быть адекватны ее ценности, кроме того, информация должна быть своевременной и актуальной для настоящего времени.

5. **Доступность** – возможность оперативно использовать информацию заинтересованными лицами.

Структура принятия рационального решения включает следующие этапы.

1. Сбор информации:

- наблюдение за состоянием системы (*например, работоспособность сооружений и оборудования, изменение пропускной способности сооружений*);

- наблюдение за внешней для системы средой (*например, изменение объемов стока в реке, условий формирования стока на водосборе*).

2. Выявление ситуации, требующей управления:

- описание проблемной ситуации (*например, приближается половодье*);

- выявление причин (*например, интенсивное весеннее снеготаяние, которое ведет к дружному половодью*);

- формулировка и оценка проблемы (*например, максимальные расходы половодья по предварительным оценкам могут превысить*

пропускную способность водосбросного сооружения, что грозит созданию аварийной ситуации на гидроузле);

3. Формулирование целей и задач управления:

- определение целей (например, безаварийно пропустить высокое половодье);
- формулировка задач: (например:
 - проверить условия возможного сброса половодья через турбины ГЭС и судоходные шлюзы;
 - получить разрешения у энергетиков и руководства водного транспорта на использование их сооружений,
 - подготовить персонал к управлению сооружениями по схеме пропуска высокого половодья,
 - составить план режима работы персонала и мониторинга состояния системы в условиях чрезвычайной ситуации);

4. Обоснование стратегии решения проблемы:

- детальное описание объекта (например, определяются зависимости расходов воды в реке от времени Q_p , изменение уровня воды в водохранилище УВБ и нижнем бьефе УНБ, характеристики пропускной способности сооружений от напора $Q_{пр} = f(H)$);
- определение требований к решению (например, пропуск половодья без создания аварийной ситуации и возможности затопления земель в нижнем бьефе);
- определение критериев эффективности решения (например, экономическая оценка величины возможного ущерба: нет ущерба, допустимый, высокий);
- определение ограничений (например, уровни воды в водохранилище не должны превышать отметок форсированного уровня $УВБ \leq ФПУ$, расходы попусков и уровни воды в нижнем бьефе не должны превышать расходы и уровни допустимые по условию размыва русла и затопления земель $Q_{нб} \leq Q_{доп}$, $УНБ \leq УНБ_{доп}$);

5. Разработка вариантов решения:

- деление задачи на подзадачи (например, мониторинг, работа водосброса, шлюзовых камер, ГЭС);
- построение моделей и проведение расчетов (с помощью математической модели, которая включает: зависимость изменения расходов воды в реке от времени Q_p , изменение уровня воды в водохранилище УВБ и нижнем бьефе УНБ:

$$Q_p = f(\tau), \text{УВБ} = (Q_p), \text{УНБ} = f(Q_p, \text{УВБ}), Q_{\text{пр}} = f(H) \quad (3.1)$$

- поиски решения по каждой подзадаче (например, пропускная способность водосброса при отметке ФПУ $Q_p^{\max} = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$, 4-х турбин ГЭС $Q_{\text{ГЭС}}^{\max} = 800 \text{ м}^3/\text{с}$, судоходных шлюзов $Q_{\text{шл}}^{\max} = 400 \text{ м}^3/\text{с}$. Если расход половодья составит $Q_{\text{мах}} = 1600 \text{ м}^3/\text{с}$, то для его пропуска открываются затворы водосбросного сооружения и 3-х турбин ГЭС);

- прогнозирование последствий решений по каждой подзадаче (например, прогнозируется размывающая способность пропускаемого расхода $1600 \text{ м}^3/\text{с}$ путем определения удельного расхода q и сравнение его с допустимым на размыв. Так если в нижнем бьефе супесчаные грунты, для которых допустимая на размыв скорость потока $1,1 \text{ м/с}$ и глубина потока 8 м получим допустимый удельный расход $q_{\text{доп}} = 1,1 \times 8 = 8,8 \text{ м}^2/\text{с}$. При ширине русла в нижнем бьефе 200 м , фактический удельный расход составит $q = 1600/200 = 8 \text{ м}^2/\text{с}$, что меньше допустимого на размыв);

- разработка вариантов решения.

б. Выбор лучшего варианта:

- оптимизация возможных вариантов (например, требуется определить оптимальный вариант пропуска расхода воды $Q = 800 \text{ м}^3/\text{с}$. Имеется водосброс с двумя затворами, способных пропускать, соответственно, 600 и $400 \text{ м}^3/\text{с}$, при времени открытия затворов 2 и $1,5$ ч. На ГЭС две турбины с пропускной способностью 500 и $300 \text{ м}^3/\text{с}$, при времени открытия 1 и $0,5$ ч. Выбрать оптимальный вариант, которому соответствует минимальное время маневрирования затворами.

Строится матрица парного сравнения пропускной способности возможных вариантов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Оценка пропускной способности сооружений

Вариант	Водосброс		ГЭС	
	600	400	500	300
600	600	1000	1100	900
400	1000	400	900	700
500	1100	900	500	800
300	900	700	800	300

Выделены варианты позволяющие пропускать расчетный расход $800 \text{ м}^3/\text{с}$. Составляется матрица времени маневрирования затворам (таблица 3.2).

Минимальному времени из возможных соответствуют варианты пропуска половодья через турбины ГЭС. Время маневрирования 1,5).

- оценка влияния случайных факторов (например, оценивается риск поломки затворов).

Таблица 3.2 – Оценка времени маневрирования водопропускными сооружениями при пропуске половодья

Вариант	Водосброс		ГЭС	
	2	1,5	1	0,5
2	2	3,5	3	2,5
1,5	3,5	1,5	2,5	2
1	3	2,5	1	1,5
0,5	2,5	2	1,5	0,5

7. Реализация решения, в течение которой может делаться его корректировка (например, рассматриваются варианты корректировки управления пропуском половодья на основе данных мониторинга уровней воды в водохранилище. Через 6 ч после начала подъема воды сделана аппроксимация данных и по полученному уравнению сделан прогноз, который показал, что через 8 ч уровень составит 115,5 м. Фактический расход, через 8 ч, составил 120 м, что говорит о необходимости корректировки прогноза.

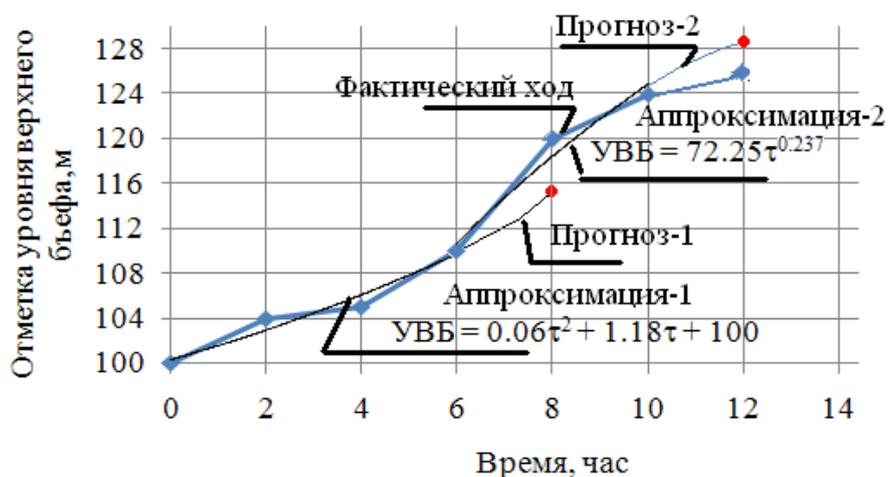


Рисунок 3.1 – Прогноз изменения уровней воды во время половодья и его корректировка на основе накапливаемых данных

4. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Моделирование – это создание образа реального объекта, заменяющего его для получения информации, путем проведения экспериментов. Таким образом, модель создается с целью получения информации о специфическом объекте (например, в виде физического макета, или путем описания объекта языком математики). При этом модель должна отражать, существенные для решения конкретной задачи, характеристики и связи реального объекта с другими. Модель объекта представляется в виде более простой системы, но с четкой структурой и точно определенными взаимосвязями между составными частями. Это позволяет детально анализировать свойства реальных объектов и их поведение в различных ситуациях. Моделирование используется как инструмент анализа сложных систем и объектов.

К моделям предъявляется ряд требований.

1. Максимальное соответствие реальному объекту, с точки зрения выбранных для изучения свойств (*например, рассматривается водохозяйственная система и требуется оценка эффективности водоохраных мероприятий по снижению загрязненности сточных вод. Для этого формируется математическая модель, которая учитывает наиболее существенные источники загрязнения. Химический состав сточных вод ограничивается характерными загрязнителями, для которых определяются объемы сброса. Не существенные факторы и свойства объекта в модели не учитываются*).

2. Модель должна быть полной, т. е. давать возможность исследовать объект, в отношении его свойств, принципов работы, поведения в заданных условиях. *Например, на основе водохозяйственного баланса создается модель водохозяйственного комплекса, которая отражает свойства объекта – возможность использования водных ресурсов для целей водопотребления и водопользования. Полная модель включает: сток реки W_r , водозабор из подземных вод $W_{пв}$, возвратные воды $W_{вв}$, водопотребление W , ущерб речному стоку $W_{ущ}$ и попуски $W_{поп}$:*

целевая функция

$$ВХБ = W_p + W_{ПВ} + W_{ВВ} - W - W_{ущ} - W_{поп} \quad (4.1)$$

$$\text{ограничения } W_p \leq W_p^{p\%} \quad W \geq W_{план} \quad W_{ПВ} \leq W$$

$$ВХБ + W_{поп} \geq W_{экол} \quad ВХБ \geq 0.$$

Учитывая, что $W_{ПВ}$ полностью включено в объемах W и по арифметическим законам может сократиться, перепишем уравнение баланса в виде:

$$ВХБ = W_p + W_{ВВ} - W' - W_{ущ} - W_{поп}. \quad (4.2)$$

$$W' = W - W_{ПВ} \quad (4.3)$$

В таком виде модель не может считаться полной, так как не отражает, в полной мере, все используемые источники воды.

Модели классифицируются по способу, характеру и масштабам моделирования.

По способу моделирования различают модели:

- детерминированные, в которых все элементы объекта моделирования четко определены. Например, модель изменения концентрации (C) загрязняющего вещества в воде на участке реки (рисунок 4.1) под влиянием сосредоточенного сброса сточных вод объемом $W_{ВВ}$ с концентрацией $C_{ВВ}$, имеет вид

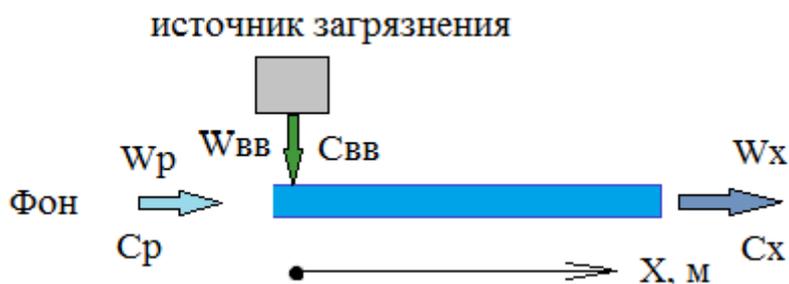


Рисунок 4.1 – Расчетная схема для моделирования изменения загрязненности участка реки

$$C_x = C_p - (C_p - C_o)EXP(-kX) \quad (4.6)$$

$$C_o = (W_p C_p + W_{ВВ} C_{ВВ}) / (W_p + W_{ВВ}) \quad (4.7)$$

$k \in [0 \dots 0,25 \text{ км}^{-1}]$ – коэффициент самоочищения воды;

- вероятностные, которые включают в элементы имеющие вероятностный характер. Например, изменение во времени объемов речного стока описывается вероятностной зависимостью трехпараметрического гамма распределения, которая позволяет определять объемы стока в год заданной обеспеченности.

По характеру модели делятся:

- имитационные;

- прогнозные.

Имитационные модели отвечают на вопрос: «Что будет, если ...?» и позволяют выявлять поведение системы (изменение ее состава, структуры и свойств) под действием внешних и внутренних факторов. Поэтому имитационные моделирование широко используется в управлении. Например, гидрологическая модель водохранилища, позволяет имитировать его наполнение и сработку. Уравнение баланса включает: объем речного стока W_p и сбрасываются возвратные воды $W_{вв}$, осуществляется водозабор W и попуски в нижний бьеф $W_{п}$. Излишки воды $+\Delta W$ идут на наполнение водохранилища, а дефициты $-\Delta W$ говорят о его сработке. Все составляющие изменяются во времени (τ).

$$\begin{aligned} \Delta W(\tau) &= W_p(\tau) + W_{вв}(\tau) - W(\tau, V) - W_{п}(\tau, V) & (4.8) \\ V(\tau) &= \pm \Delta W(\tau) + V_{н} \quad V_{мо} \leq V(\tau) \leq V_{пол.} \quad W_{п}(\tau) \leq W_{доп.} \end{aligned}$$

где $V_{н}$ – объем водохранилища на начало расчетного периода.

Модель позволяет имитировать управление объемами воды в водохранилище в зависимости от режима водопотребления, осуществления попусков при условии изменения режима стока воды в реке. Если задаться критерием оптимизации, например, минимизация отклонений объемов использования воды ($W + W_{п}$) от требуемых значений ($W^{треб} + W_{п}^{треб}$), то возможна оптимизация режима осуществления попусков и водоподачи.

$$\left| (W + W_{п}) - (W^{треб} + W_{п}^{треб}) \right| \rightarrow \min \quad (4.9)$$

Прогнозные модели отвечают на вопрос: «Что будет, если система не изменяется?», и позволяют определять параметры системы при неизменном составе и свойств системы. Например, для условий предыдущей задачи исключается возможность управления попусками и водопотреблением, они задаются с конкретным режимом

$$\begin{aligned} \Delta W(\tau) &= W_p(\tau) + W_{вв}(\tau) - W(\tau) - W_{п}(\tau) & (4.10) \\ V(\tau) &= \pm \Delta W(\tau) + V_{н} \quad V_{мо} \leq V(\tau) \leq V_{пол.} \quad W_{п}(\tau) \leq W_{доп.} \end{aligned}$$

Модель должна учитывать свойства системы:

1. Делимость – система состоит из отдельных компонентов, каждая из которых имеет свои цели и функции. Наглядным примером является воднобалансовая модель. Уравнение ВХБ содержит

приходную и расходную части (деление на два компонента). Каждая часть состоит из составляющих, выделение которых определяется детальностью исследований. Например, в расходной части присутствуют объемы водопотребления для целей: КБХ, промышленности, сельскохозяйственного водоснабжения, орошения и прочее водопользование.

2. Связанность компонентов – все компоненты системы связаны между собой и влияют друг на друга. Например, модель трансформации половодья связана с использованием полезной емкости водохранилища, из которого осуществляется водообеспечение отраслей и осуществление попусков в нижний бьеф.

3. Эмерджентность – система обладает свойствами, отличающимися от свойств входящих в нее компонентов. Наглядным примером может служить эффективность водоохраных мероприятий. Целевая функция – зависимость концентрации загрязняющего вещества в речной воде (C_p) от концентрации вещества в возвратных водах (C_{BB}) и фоновой концентрации в реке (C_ϕ), объемов возвратных вод (W_{BB}) и речного стока (W_ϕ):

$$C_p = (C_{BB}^{BOM} W_{BB} + C_\phi W_\phi) / (W_{BB} + W_\phi), \quad (4.11)$$

$$C_{BB}^{BOM} = C_{BB} (1 - \mathcal{E}_{BOM1}) \times (1 - \mathcal{E}_{BOM2}). \quad (4.12)$$

Управляющее воздействие направляется на снижение загрязненности сточных вод, путем проведения водоохраных мероприятий (ВОМ) с эффективностью, например: $\mathcal{E}_{BOM1} = 0,4$ и $\mathcal{E}_{BOM2} = 0,5$ (данные эффективности отражают свойства входящих в систему компонентов – водоохраных мероприятий). Суммарный эффект ВОМ по снижению концентрации составит: $1 - (1 - 0,4) \times (1 - 0,5) = 0,7$.

4. Адекватность – модель должна с заданной точностью отражать происходящие в системе и ее внешней среде изменения. Например, модель загрязнения реки сосредоточенными стоками, с учетом самоочищения воды (k – коэффициент самоочищения воды):

Целевая функция

$$C = C_\phi - (C_\phi - C_0) \times \exp(-kx) \quad (4.13)$$

$$C_0 = (C_{BB} \times W_{BB} + C_\phi \times W_\phi) / (W_{BB} + W_\phi) \quad (4.14)$$

Из формул видно, что любое изменение концентраций или объемов воды отразится на загрязненности речной воды

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Задачи, решаемые при управлении ВХС, делятся в зависимости от целей и периода времени. Выделяют:

- долгосрочное управление – направленное на достижение целей перспективного развития (основой, в данном случае, является перспективное планирование);
- среднесрочное управление – направленное на поэтапное выполнение результатов перспективного планирования;
- оперативное управление – позволяет обеспечить функционирование системы в текущий и ближайший по времени (до года) период.

В связи с данной классификацией выделяются следующие задачи управления водохозяйственными системами.

1. Задачи долгосрочного и среднесрочного управления:

- разработка стратегии водообеспечения (*например, для конкретного региона, на перспективу, не менее 15 лет вперед, прогнозируется изменение численности населения, объемов производства, развитие новых отраслей экономики. Это сопровождается изменением объемов безвозвратного водопотребления ΣW . В связи этим, проверяется водообеспеченность отраслей располагаемыми ресурсами воды $W_{\text{рас}}$. Делается это на основе воднобалансовых расчетов $W_{\text{рас}} - \Sigma W = \Delta W$, что позволяет определить необходимость управления статьями водохозяйственного баланса $\Delta W < 0$);*
- разработка вариантов развития ВХС (*например, удовлетворение в воде при ограниченных ресурсах $\Delta W < 0$ может потребовать рассмотрения вариантов переброски $W_{\text{пер}} = \Delta W_{\text{и}}$ и/или многолетнего регулирования стока $W_{\text{мн}} = \Delta W$);*
- оптимизация структуры и состава ВХС (*например, обосновывается выбор варианта управления статьями водохозяйственного баланса, что определяет состав сооружений. Для этого определяются плюсы (гарантированность водообеспечения, возможность развития новых отраслей) и минусы (влияние на окружающую среду) варианта переброски стока и многолетнего регулирования. Вариант выбирается по критерию минимальных затрат на создание*

системы переброски стока $Z_{\text{пер}}$ и многолетнего регулирования стока $Z_{\text{мн.рег.}}$ для восполнение годового ресурса воды на $\Delta W = 90 \text{ млн м}^3$: $\Sigma Z \rightarrow \min$, $\Sigma Z = Z_{\text{пер}} + Z_{\text{мн.рег.}}$. На рисунке показан оптимальный вариант (комбинированный), предусматривающий переброску стока в объеме $W_{\text{пер}} = 24 \text{ млн м}^3$ и многолетней составляющей стока $W_{\text{мн.рег}} = 66 \text{ млн м}^3$).

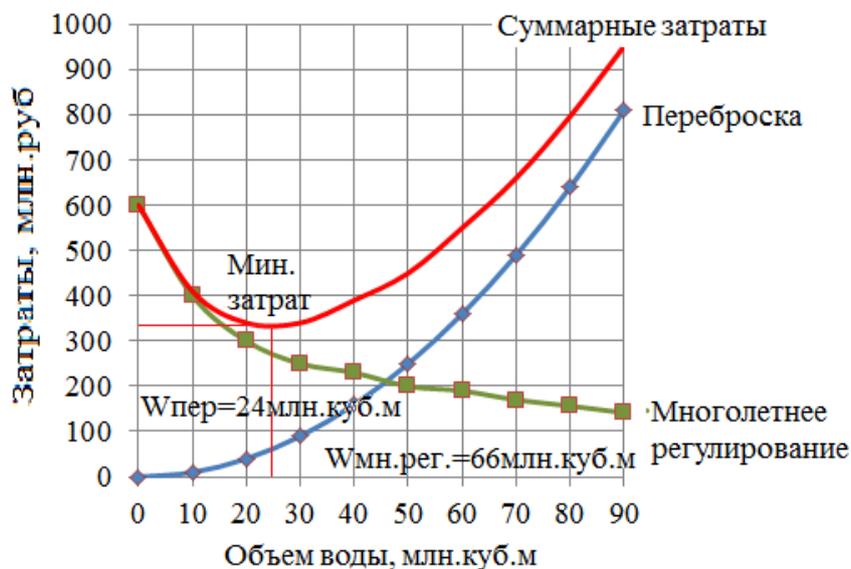


Рисунок 5.1 – Выбор оптимального варианта покрытия дефицита воды 90 млн м³ путем переброски и многолетнего регулирования стока

- выбор параметров водохозяйственных объектов (для выбранного варианта определяются параметры сооружений);
- построение правил управления водохранилищами;
- оптимизация распределения водных ресурсов (например, по критерию максимального чистого дохода, получаемого участниками ВХК, между которыми распределяется ресурс);
- оптимизация показателей плана водоохранных мероприятий (например, определение требуемой эффективности водоохранных мероприятий, и набора мероприятий, обеспечивающих достижение требуемого качества воды при минимальных затратах).

6. ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Оптимизация – процесс выбора наилучшего варианта управления системой из возможных, при заданных требованиях и ограни-

чениях. Требования задаются в виде критерия оптимизации, который позволяет выбрать наилучший вариант решения целевой функции.

Критерий оптимизации – математический эквивалент цели операции, позволяющий количественно оценить степень достижения цели. *Например, делается выбор варианта насосной станции по критерию – минимума суммарных затрат на строительство и эксплуатацию. Организуется водохозяйственный комплекс с использованием критерия - максимума чистого дохода от использования водных ресурсов. Обосновываются водоохранные мероприятия по критерию – минимума ущерба окружающей среде.*

Целевая функция – вещественная или целочисленная функция нескольких переменных, подлежащая оптимизации в целях определения наилучшего значения оптимизируемого параметра с помощью некоторого критерия. Целевая функция должна обладать рядом свойств.

1. Простота (не содержать большого количества второстепенных связей и факторов, затрудняющих его исследование).

2. Представительность (отражать основную, а не второстепенную цель исследований).

3. Критичность (существенно реагировать на изменение параметров, которые характеризуют стратегию управления).

4. Единственность (все стратегии сравниваются по одному критерию).

Основные классы задач, решаемые с помощью оптимизационных операций.

1. Задача распределения: ее особенность заключается в выполнении ряда работ, которые необходимо выполнить при определенных ограничениях. *Например: распределение имеющегося объема ресурса воды между участниками водохозяйственного комплекса; распределение ограниченного объема воды в течении поливного периода для получения планируемой урожайности.* Для решения задач применяются: теорию графов, динамическое программирование.

2. Задача поиска: особенность заключается в отсутствии информации необходимой для принятия решений. *Например, разработка оптимального плана действий при минимальных затратах.* В этом случае решается вопрос о получении информации. Различают ситуации:

- имеются условия, благоприятствующие поиску (*например, решается задача контроля затопления территории. Место затопления территории во время весеннего половодья известно – это пойма реки с низкими берегами и сильной извилистостью русла*);

- условия нейтральные к поиску информации (*например, климатические характеристики не дают информации о месте и силе половодья*);

- условия, препятствующие поиску информации (*например, необходимость удовлетворения требований охраны природы при оптимизации параметров водохранилища, с помощью критерия максимального чистого дохода*). Для решения задач поиска применяются методы математического программирования, теории распознавания образов, методы статистических испытаний.

3. Задачи построения оптимальных стратегий (деловые игры): заключается в использовании имитационной модели, для ускорения, наглядности и возможности исследования поведения системы при разных управляющих воздействиях.

7. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Производственная функция – зависимость объема продукции от использования водных ресурсов. Производственные функции используются для формирования критериев оптимизации и определения реакции производственных показателей на управляющие воздействия.

Существует несколько методов построения производственных функций: физический; статистический; оптимизационный

1. Физический метод основан на использовании физических законов получения продукции. Он используется в гидроэнергетике, судоходстве, сельском хозяйстве.

В гидроэнергетике объем произведенной электрической энергии (\mathcal{E}) и мощность (N) зависят от расхода и напора на ГЭС:

$$\mathcal{E} = f(Q, H), \quad (7.1)$$

где \mathcal{E} – объем произведенной электрической энергии за год; Q – расход, пропущенный через турбины воды; H – напор на гидроэлектростанции.

Формулу (7.1) можно раскрыть следующим образом:

$$\mathcal{E} = 9,81 \times Q \times H \times T \times \eta, \quad (7.2)$$

где 9,81 – коэффициент учитывающий плотность воды и ускорение силы тяжести; H – средний напор на гидроэлектростанцию; T – количество часов работы всех агрегатов ГЭС в году $T = 7300$ часов; η – коэффициент полезного действия агрегата, $\eta = 0,85$.

Учитывая, что расход воды связан с объемом (W) воды $Q = W/T$, формула (7.2) преобразуется в выражение:

$$\mathcal{E} = \frac{WH}{432}. \quad (7.3)$$

Мощность, вырабатываемая на ГЭС, составит:

$$N = \mathcal{E}/T \quad (7.4)$$

В сельском хозяйстве используется математическая модель, которая учитывает зависимость урожайности растений от условий произрастания растений. Например, зависимость урожайности (Y) от объемов подаваемой на орошение воды (W_{op}) описывается с помощью модели Шабанова В. В.

$$S = Y / Y_{\max}$$

$$S = \left[\frac{(w_{opt} - w_0) \times \frac{M}{M_{opt}} + w_0}{w_{opt}} \right]^{\gamma w_{opt}} \times \left[\frac{1 - (w_{opt} - w_0) \times \frac{M}{M_{opt}} + w_0}{(1 - w_{opt})} \right]^{\gamma(1 - w_{opt})} \quad (7.5)$$

$$W_{op} = F_{op} M / \eta, \quad (7.6)$$

где S – относительная урожайность; Y_{\max} – максимально возможная в конкретных условиях урожайность, ц/га; F_{op} – площадь орошения, га; w_{opt} – оптимальная влажность почвы, %; w_0 – среднемноголетняя влажность почвы, %; M_{opt} – биологически оптимальная оросительная норма, м³/га.

2. Статистический метод применяется в сельском и рыбном хозяйствах. В этом случае используются фактические ряды наблюдений. Производственная функция строится в виде зависимости:

$$Y = f(W), \quad (7.7)$$

где Y – урожайность; M – оросительная норма; W – годовой объем воды, пода-

ваемый для орошения; F – площадь орошения; $\eta_{ор}$ – коэффициент полезного действия оросительной системы.

Удобно использовать нормированные зависимости:

$$S = f(W) \quad (7.8)$$

где $W_{орт}$ – оптимальный годовой объем воды для орошения.

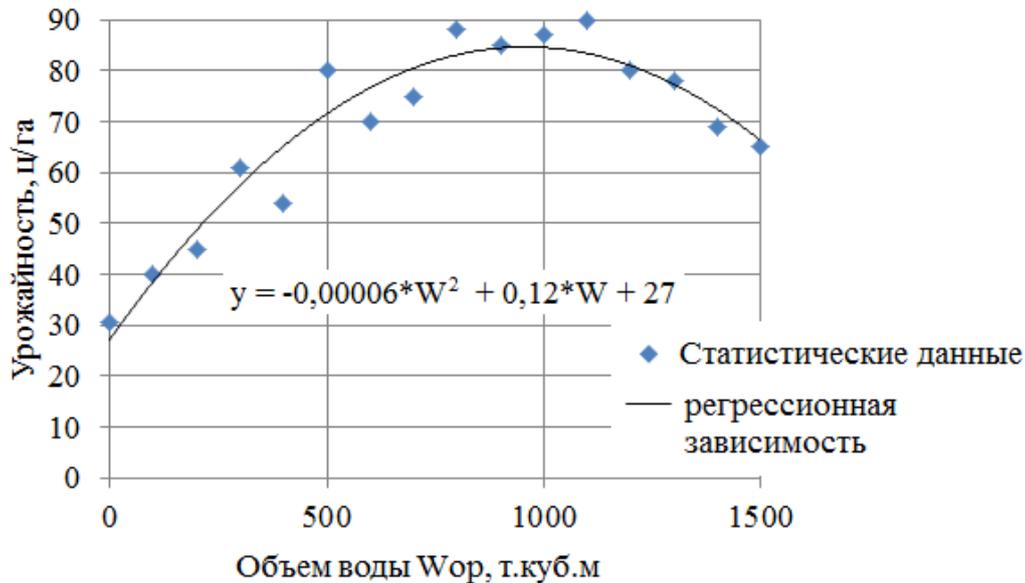


Рисунок 7.1 – Статистическая зависимость урожайности многолетних трав от объема подаваемой на орошение воды (площадь орошения 500 га)

3. Оптимизационный метод используется в сельском и рыбном хозяйстве, судоходстве. Производственные функции строятся на основе решения задач оптимизации при дефиците водных ресурсов. Например, распределение водных ресурсов между сельскохозяйственными культурами. Предположим, что рассматривается N вариантов распределения водных ресурсов между сельскохозяйственными культурами. Производственную функцию можно представить в виде:

$$ЧД_{\Sigma} = f(W), \quad (7.9)$$

где $ЧД_{\Sigma}$ – суммарный чистый доход, получаемый от реализации урожая всех орошаемых сельскохозяйственных культур; W – объем воды, выделяемый для орошения конкретной культуры.

Решение ищется при максимизации чистого дохода, т.е. критерий оптимизации, записывается в виде:

$$ЧД_{\Sigma} \rightarrow \max \quad (7.10)$$

При этом суммарный чистый доход получается как сумма доходов от орошения всех i -х культур:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = \sum \text{ЧД}_{ij} \quad (7.11)$$

где ЧД_{ij} – чистый доход, получаемый от орошения i -ой культуры в J -ом варианте распределения водных ресурсов.

Прибыль ЧД_{ij} определяется по зависимости:

$$\text{ЧД}_{ij} = \text{Ц}_{ij} - \text{С}_{ij}, \quad (7.12)$$

где Ц_{ij} – стоимость продукции i -ой культуры в j -ом варианте распределения водных ресурсов; С_{ij} – затраты на производство i -ой культуры в j -ом варианте распределения водных ресурсов.

Стоимость продукции j -ой культуры Ц_{ij} определяется по зависимости:

$$\text{Ц}_{ij} = Y_{ij} \times F_j \times \text{ц}_j \quad (7.13)$$

где Y_{ij} – урожайность j -ой культуры в i -ом варианте распределения водных ресурсов; F_j – площадь, занятая j -ой культурой; ц_j – цена продукции j -ой культуры.

$$\text{С}_{ij} = c_i \times F_i \quad (7.14)$$

где c_i – удельные затраты на 1 га площади.

Урожайность j -ой культуры Y_{ij} зависит от оросительной нормы M_{ij} .

$$Y_{ij} = f(M_{ij}) \quad (7.15)$$

Оросительная норма M_{ij} , в свою очередь, зависит от объема воды, выделяемой j -ой культуре в i -ом варианте распределения водных ресурсов:

$$M_{ij} = W_{ij} \cdot \eta / F_j \quad (7.16)$$

где W_{ij} – объем водных ресурсов, выделяемый j -ой культуре в i -ом варианте распределения; η – КПД оросительной системы.

8. ПЛАНИРОВАНИЕ – КАК ФУНКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Планирование – непрерывный процесс установления и конкретизации целей развития системы и ее структурных подразделений, определения средств их достижения, сроков и последовательности реализации, распределения ресурсов. Основными принципа-

ми планирования являются следующие.

- **Комплексность** – учет всех основных факторов и возможных управляющих воздействий.
- **Гибкость** – заключается в возможности менять план в связи с возникновением непредвиденных обстоятельств.
- **Оптимальность** – на всех этапах планирования должен обеспечиваться выбор наиболее эффективных вариантов развития и его структур.

8.1. Управленческое решение

Управленческое решение – это выбор наилучшей альтернативы из числа возможных, предполагающей набор эффективных действий, направленных на устранение проблем, которые возникли в объекте управления. Любое управленческое решение проходит через три стадии:

– *уяснение проблемы* – включает в себя: сбор и анализ информации; выяснение ее актуальности; определение условий, при которых проблема будет решена.

– *составление плана решения* – включает в себя: разработку альтернативных вариантов решения; сопоставление их с имеющимися ресурсами; проводится оценка альтернативных вариантов по эколого-экономическим и социальным последствиям; составление программ решения; разработка детального плана решения.

– *выполнение решения* – включает в себя: доведение решений до исполнителей; разработку мер поощрений и наказаний; контроль выполнения решений.

8.2. Эффективность управленческого решения

Эффективность – это результативность чего-либо. Эффективным считается управленческое решение, удовлетворяющее ряду требований:

- основываться на достижимых целях;
- наличие реальных ресурсов и времени;
- предусматривать механизм реализации;
- устойчивость при возможных ошибках при определении ис-

ходных данных;

– реализуемость, т. е. не содержать положений, которые сорвут исполнение в результате порождаемых им конфликтов;

– гибкость – предусматривает возможность изменения цели и алгоритма его достижения при изменении внешних или внутренних условий;

– контроль исполнения управленческих решений.

Показатель, оценивающий качество принятых управленческих решений, рассчитывается по формуле:

$$K_k = 100 \times (P_B - P_H) / P_{\Pi}, \quad (8.1)$$

где K_k – коэффициент качества управленческих решений (УР); P_{Π} – количество принятых УР; P_B – количество выполненных УР; P_H – количество выполненных некачественных решений.

9. УПРАВЛЕНИЕ СТАТЬЯМИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА

Управление водными ресурсами – это процесс планирования, организации, мотивации и контроля водохозяйственной деятельности, для достижения поставленных целей. В случае, если результирующая часть годового или внутригодового (за отдельные месяцы) ВХБ отрицательна, применяются методы управления статьями водохозяйственного баланса. Методы разделяются на две группы в направленные на изменение приходной (увеличение) или расходной (уменьшение) части.

9.1. Увеличение объема приходной части ВХБ

Увеличение объема приходной части ВХБ осуществляется разными способами.

1. Регулирование условий формирования стока на водосборной площади

Речной сток W_p формируется за счет стоков с водосбора, которые идут в виде поверхностной $W_{\text{пов}}$ и подземной составляющих $W_{\text{под}}$.

$$W_p = W_{\text{пов}} + W_{\text{под}} \quad (9.1)$$

Учитывая, что основное значение для водоснабжения и общего увлажнения территории имеет подземный сток, регулирование

условий формирования стока на водосборной площади направлено на перевод поверхностного стока в подземный. В этом случае используются способы:

- агротехнические (рыхление почвы, распашка поперек склона, пескование почв и др.);
- гидротехнические (устройство бессточных канав, закрытых поглотителей, фильтрационных прудов и др.);
- лесотехнические (устройство водоохранной зоны, лесополос, формирование лесных массивов и др).

2. Регулирование стока во времени. Регулирование стока во времени – перераспределение во времени объема речного стока и изменение его режима. Цель регулирования:

- удовлетворение потребностей отраслей экономики в воде (гидроэнергетики, орошения, водоснабжения, водного транспорта и др.);
- борьба с негативным воздействием вод (регулирование паводков и половодий);
- охрана природы (восстановление заболоченных территорий, пополнение запасов подземных вод, регулирование русловых процессов, создание и обустройство зон санитарной охраны мест водозаборов).

Перераспределение стока во времени применяется при необходимости увеличения водности водных объектов, на территориях с дефицитами воды в многолетнем разрезе. Регулирование стока может осуществляться с помощью: водохранилищ речного, озерного и морского типов, наливных водохранилищ, создаваемых в пониженных элементах рельефа водосборной площади, лиманов.

3. Переброска стока рассматривается в случае, если на объекте годовой дефицит ($D_{\text{год}}$) водохозяйственного баланса превышает годовой избыток воды ($I_{\text{год}}$): $D_{\text{год}} > I_{\text{год}}$. В этом случае вода из реки-донор подается в реку-приемник в объеме необходимом для покрытия дефицита. При этом следует решить ряд задач общего характера:

- определяется водохозяйственный участок пригодный для водоотвода на реке-донор;
- определяется водохозяйственный участок на реке-приемник, куда следует подать воду;
- определяется состав сооружений и их параметры.

9.2. Методы сокращения объемов расходной части ВХБ

Внедрение маловодных технологий снижает потребление свежей воды, забираемой из источника водоснабжения. Эффективность данных мероприятий основана на снижении нормы водопотребления и водоотведения, снижении объемов загрязненных сточных вод.

Использование прогрессивных систем водоснабжения позволяет снизить водопотребление пресной воды за счет использования сточных или минерализованных вод. В настоящее время широко используются оборотные, повторные и дуплексные системы водоснабжения.

- *Оборотные системы водоснабжения* позволяют осуществлять одноцелевое многократное использование одного и того же объема воды. Данные системы используются в отоплении коммунально-бытового хозяйства, в отдельных технологических процессах промышленных предприятий и орошении. Эффективность данного метода заключается в снижении забора свежей воды из источника и снижении опасности загрязнения водных объектов.

- *Повторные системы водоснабжения* основаны на принципе многоцелевого однократного использования воды. Такие системы используются на сельскохозяйственных полях орошения, т. е. для орошения сельскохозяйственных культур сточными водами: коммунально-бытового хозяйства, животноводства. Использование сточных вод промышленных предприятий, ограничено основными требованиями: сточные воды должны обладать удобрительной ценностью и не содержать токсичных для растений и почвы веществ. К таким видам промышленности относятся: пищевая, мясомолочная и некоторые другие виды. Эффективность повторного водоснабжения определяется: снижением объемов водопотребления свежей воды из источника, утилизацией сточных вод, повышением урожайности сельскохозяйственных культур и плодородия почв.

- *Дуплексные системы водоснабжения* используются в условиях дефицита, пригодной для питьевых целей, пресной воды. Высокие требования к качеству питьевой воды требуют сложной и дорогой технологии ее подготовки, при этом на питьевые нужды в коммунально-бытовом хозяйстве расходуется всего 5...10 л/чел в

сутки из общей нормы 300 л/чел в сутки (примерно 2 %). Поэтому в крупных населенных пунктах рационально иметь несколько отдельных водопроводных сетей: хозяйственно-бытового, питьевого и промышленного водоснабжения, соответственно, это позволит использовать минерализованные воды, воды питьевого качества и воду пригодную для технических целей.

Устранение непроизводительных потерь воды. При использовании воды, часть ее теряется на испарение, фильтрацию и утечки. Это приводит к увеличению объемов воды, забираемой из источника водоснабжения (брутто). В расчетах это учитывается снижением коэффициента полезного действия (кпд) систем водоснабжения. В целях экономии воды проводятся мероприятия по повышению кпд систем водоснабжения. Эффективность данного метода основана на снижении объемов водопотребления (брутто). Для повышения кпд проводятся мероприятия: замена водоразборной арматуры, замена старых трубопроводов, проведение противофильтрационных мероприятий, лесопосадки по берегам открытых водотоков и водоемов (для снижения испарения).

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЩЕРБОВ ОТ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОДОПОДАЧИ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Ущерб (УЩ) от ограничения водоподачи на величину ΔW связаны с неполучением продукции (ΔB), что определяется с помощью производственных функций. Например, ущерб промышленному производству, с учетом стоимости единицы продукции (C), оценивается по формуле:

$$УЩ_{пр} = C_{пр} \times \Delta B_{пр} = C_{пр} \times \Delta W \times \eta_{пр}/q_{пр} \quad (10.1)$$

Ущерб сельскому хозяйству от ограничения водоподачи для орошения можно оценить по зависимости:

$$УЩ_{ор} = C_{ор} \times S \times y_{max} \times F_{ор} \quad (10.2)$$

$$S = \left[\frac{(w_{\text{opt}} - w_0) \times \frac{M_{\text{пл}} - \Delta M}{M_{\text{opt}}} + w_0}{w_{\text{opt}}} \right]^{\gamma w_{\text{opt}}} \times \left[\frac{1 - \left((w_{\text{opt}} - w_0) \times \frac{M_{\text{пл}} - \Delta M}{M_{\text{opt}}} + w_0 \right)}{(1 - w_{\text{opt}})} \right]^{\gamma(1 - w_{\text{opt}})} \quad (10.3)$$

где $M_{\text{пл}}$ – запланированная оросительная норма, получаемая при не ограниченном режиме водоподдачи; ΔM – снижение оросительной нормы в результате ограничения водоподдачи.

$$M_{\text{пл}} = W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / F_{\text{ор}} \quad \Delta M = \Delta W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / F_{\text{ор}} \quad (10.4)$$

Величина ущерба может составлять значительные величины, поэтому появляется необходимость решения задач водораспределения между участниками ВХК в условиях дефицита ресурсов. Данная задача решается разными способами.

1. Оптимизационные расчеты. Критерий оптимизации – минимизация суммарного по ВХК ущерба, определяемого с учетом приоритетности участника ВХК (μ):

$$\sum \mu_i \times \text{УЩ}_i \rightarrow \min \quad (10.5)$$

Система ограничений включает недопущение снижения объемов выпускаемой продукции ниже экономически рентабельного предела ($B_{\text{рент}}$):

$$B_i \geq B_{\text{рент } i} \quad (10.6)$$

Ограничение на ресурс воды $\sum W_i \leq W_{\text{ресурс}}$.

2. Пропорциональное водораспределение. Пропорциональное водораспределение осуществляется с помощью весовых коэффициентов (μ), которые определяются для каждого i -го участника ВХК. Например, если решается вопрос о водораспределении между промышленным предприятием ($\text{УЩ}_{\text{пр}}$) и орошением ($\text{УЩ}_{\text{ор}}$), весовые коэффициенты составят:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\text{УЩ}_{\text{пр}}}{\text{УЩ}_{\text{пр}} + \text{УЩ}_{\text{ор}}} \quad \mu_{\text{ор}} = \frac{\text{УЩ}_{\text{ор}}}{\text{УЩ}_{\text{пр}} + \text{УЩ}_{\text{ор}}}, \quad (10.7)$$

при условии $\mu_{\text{пр}} + \mu_{\text{пр}} = 1$

В данном случае весовые коэффициенты позволяют распределять воду пропорционально стоимости недополученной продукции. Недостатком данного метода является то, что не учитывается социальная значимость участника ВХК (например, для целей питьевого водоснабжения устанавливается первоочередная приоритетность).

11. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОД

Качество воды – характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования. Управление качеством воды сводится к проведению мероприятий позволяющих:

- контролировать качество воды;
- выявлять источники загрязнения;
- выбор водоохраных мероприятий;
- проведение мероприятий и оценка эффективности.

Принятие решения о выборе метода управления проводится на основе анализа:

- источника загрязнения (сосредоточенного или рассредоточенного);
- оценки требуемой эффективности мероприятий;
- эколого-экономического обоснования.

Очистка сосредоточенных сточных вод. В коммунально-бытовом хозяйстве образуются сточные воды: бытовые, и ливневые. В промышленности, к ним добавляются технологические стоки. Все сточные воды должны быть канализованы и централизованно отводиться на очистку. Обычно бытовые и технологические стоки сбрасываются в единую канализационную систему. Они характеризуются относительно постоянным составом и свойством.

Ливневые стоки отличаются периодичностью и не постоянством состава. Поэтому для более эффективной очистки стоки рекомендуются очищать на отдельных сооружениях.

Эффективность очистки сточных вод, как метода управления качеством воды, определяется снижением опасности загрязнения водного объекта и снижением затрат на водоподготовку.

Снижение загрязненности дренажного стока, который форми-

руется на осушаемых землях, осуществляется на основе использования самоочищения воды (осаждение взвешенных частиц, поглощение загрязняющих воду веществ растениями, сорбция веществ донным грунтом). Достигается это разными способами: устраиваются пруды, удлиняется открытая проводящая сеть или создаются специальные биологические плато.

Снижение нагрузки на водный объект со стороны рассредоточенных стоков. Одним из мощных источников загрязнения являются площадные стоки с сельскохозяйственных угодий, не канализованных территорий населенных пунктов и свалок. Водоохранные мероприятия в данном случае делятся на три группы (по Н. И. Хрисанову).

- Мероприятия, позволяющие снизить объем образующихся загрязненных стоков (проводятся в источнике загрязнений).

- Мероприятия, позволяющие перехватить объем загрязнений в транзитной зоне (от источника загрязнений до водного объекта): например, устройство водоохранной зоны, перехват стока поглотителями, устройство прудов накопителей.

- Мероприятия, направленные на повышение самоочищающей способности водных объектов. К таким мероприятиям относятся: аэрация воды, создание русловых биоплато, уход за прибрежной водной растительностью.

Требуемая эффективность мероприятий ($\mathcal{E}_{\text{тр}}$) определяется на основе сравнения фактического качества воды ($C_{\text{ф}}$) с нормативным ($C_{\text{н}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = (\mathcal{E}_{\text{ф}} - \mathcal{E}_{\text{н}}) \times 100 \% / \mathcal{E}_{\text{ф}} \quad (11.1)$$

Эколого-экономическое обоснование водоохраных мероприятий (одного или набора мероприятий) сводится к учету их экологической эффективности и затрат на их проведение.

– Экологические показатели качества воды, с учетом водоохраных мероприятий $C^{\text{ВОМ}}$, не должны превышать их нормативных значений ПДК.

$$C^{\text{ВОМ}} \leq \text{ПДК} \quad (11.2)$$

$$\text{или } C^{\text{ВОМ}} = C \times (1 - \mathcal{E}_{\text{ВОМ}}) \leq \text{ПДК}. \quad (11.3)$$

Экономические затраты на проведение водоохраных мероприятий должны быть минимальными.

$$Z_{\text{BOM}} \rightarrow \min \quad (11.4)$$

Учет экологических условий проводится путем определения набора водоохраных мероприятий, необходимых для достижения требуемого класса качества воды. Определить набор требуемых водоохраных мероприятий можно с помощью модифицированного «Метода взвешенного попарного среднего». В этом случае делается простой перебор мероприятий с определением их совместной эффективности. Алгоритм включает ряд шагов.

1. Составляется матрица эффективности мероприятий (матрица симметричная с нулевой диагональю). Попарная эффективность мероприятий определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ij}^{\text{BOM}} = 1 - (1 - \mathcal{E}_i) \times (1 - \mathcal{E}_j), \quad (11.5)$$

где i, j – номера водоохраных мероприятий в строке и столбце матрицы. Например, совместная эффективность 1 и 2 мероприятий составит: $1 - (1 - 0,1) \times (1 - 0,2) = 0,28$. Второго и третьего мероприятий: $1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,3) = 0,44$.

Таблица 11.1 – Первоначальная матрица попарной эффективности водоохраных мероприятий

BOM	i	1	2	3	4
j	0*	0,1	0,2	0,3	0,7
1	0,1	0	0,28	0,37	0,73
2	0,2	0,28	0	0,44	0,76
3	0,3	0,37	0,44	0	0,79
4	0,7	0,73	0,76	0,79	0

*Диагональные значения обнуляются.

2. В матрице, по минимальной эффективности, выделяется столбец (u) и строка (v) (эффективность 0,1). Данные столбец и строка удаляются из матрицы. При этом пересчитываются элементы матрицы ($j \geq 2$) ($i \geq 2$) по формуле:

$$\mathcal{E}_{i,j+1} = 1 - (1 - \mathcal{E}_j) \times (1 - \mathcal{E}_{i,1}) \quad (11.6)$$

В результате матрица сокращается на одну строку и один столбец. Например, для мероприятий 1, 2:

$$\mathcal{E}_{(1,2),1} = 1 - (1 - \mathcal{E}_2) \times (1 - \mathcal{E}_{2,1}) = 1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,28) = 0,424$$

Таблица 11.2 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (второе приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2	3	4
<i>j</i>	0	0,424	0,559	0,919
1,2	0,424	0	0,44	0,76
3	0,559	0,44	0	0,79
4	0,919	0,76	0,79	0

3. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут объединены все мероприятия.

Таблица 11.3 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (третье приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2,3	4
<i>j</i>	0	0,75	0,98
1,2,3	0,75	0	0,79
4	0,98	0,79	0

Таблица 11.4 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (четвертое приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2,3,4
<i>j</i>	0	0,99
1,2,3,4	0,99	0

4. Требуемая эффективность определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = \frac{K_{\text{пз}}^{95\%} - K_{\text{пз}}^{\text{ф}}}{K_{\text{пз}}^{95\%}}, \quad (11.7)$$

где $K_{\text{пз}}^{95\%}$, $K_{\text{пз}}^{\text{ф}}$ – комплексный показатель загрязненности воды, соответственно, для фактических условий (расчетного года) и естественного фона.

Вместо фонового уровня может приниматься приемлемый, т.е. возможный для достижения в конкретных условиях поэтапного планирования.

Полученные матрицы позволяют каждому классу качества воды поставить набор мероприятий, с помощью которого достигается заданный (в данном примере фоновый) уровень (таблица 11.4). При этом соблюдается условие: эффективность набора мероприятий ($\mathcal{E}^{\text{ВОМ}}$) должна быть не менее требуемой ($\mathcal{E}_{\text{тр}}$): $\mathcal{E}^{\text{ВОМ}} \geq \mathcal{E}_{\text{тр}}$.

Учет экономических показателей. По данным предыдущих расчетов получено несколько наборов водоохранных мероприятий, из которых путем проведения оптимизационных расчетов определяется вариант с минимальными затратами. *Например, для требуемой эффективности ВОМ $\Delta_{\text{тр}} = 75\%$, в рассмотренном примере, соответствующие наборы мероприятий: 4 + 2, 4 + 3, и 1 + 2 + 3. Пусть затраты на проведение мероприятий составляют:*

Мероприятие	1	2	3	4
Затраты, млн руб.	4,0	2,4	3,1	5,0

Варианты затрат на проведение выбранных наборов мероприятий составляют:

Мероприятие	1+2+3	2+4	3+4
Затраты, млн руб.	9,5	7,4	8,1

Вариант с минимальными затратами включает проведение 2 и 4 водоохранного мероприятия.

12. ОПТИМИЗАЦИЯ В УПРАВЛЕНИИ

Критерии оптимизации. Целевые функции. Методы достижения компромиссов при решении многоцелевых задач управления ВХБ. Использование методов теории игр и линейного программирования при принятии решений об оптимизации ВХБ.

Широкий набор вариантов решения конкретной задачи позволяет определить наилучший, путем применения методов оптимизации. **Оптимизация** – это процесс нахождения наилучшего решения задачи при заданных критериях. **Критерии оптимизации** – показатель решения задачи, по значению которого оценивается максимальное удовлетворение поставленным требованиям. *Например, максимальное значение величины чистого дохода или минимальное значение суммарных затрат.* В одной задаче может быть установлен один или несколько критериев оптимальности. Критерий оптимизации является наилучшим значением целевой функции. **Целевая функция** – вещественная или целочисленная функция, одного или нескольких переменных, подлежащая максимизации или минимизации в целях решения оптимизационной задачи. *Например, требуется определить оптимальное значение оросительной нормы Морт*

(оптимизируемый параметр) для получения максимального урожая многолетних трав U_{max} (критерий оптимальности). Целевая функция в данном случае это зависимость урожайности от оросительной нормы $U = f(M)$.

Постановка задачи оптимизации и ее решение включает в себя ряд этапов:

- определение цели оптимизации;
- разработка ограничений;
- выбор метода оптимизации;
- реализация метода.

Определение цели оптимизации подразумевает: формализацию целевой функции, которая наиболее полно отражает цель оптимизации, и критерия оптимизации.

Разработка ограничений заключается в накладывании пределов возможных изменений параметров входящих в целевую функцию и значений самой целевой функции.

Метод оптимизации позволяет решить задачу определения экстремального значения критерия. Из известных методов выбирается тот, который позволяет наилучшим образом решить задачу. Метод выбирается с учетом факторов:

- вида оптимизационной задачи (одно- или многокритериальной);
- имеющиеся исходные данные;
- имеющиеся средства;
- знание метода.

12.1. Методы оптимизации для решения задач водораспределения

Задачи водораспределения решаются с учетом, в основном, экономических критериев (например, получения максимального суммарного чистого дохода от реализации продукции). Для этого используют, например такие методы, как:

- линейного программирования (если функционал выражается в виде линейной зависимости от объемов используемой воды);
- обратных приоритетов;
- метод Нэша.

Последние два метода не являются оптимизационными, но просты и дают достаточно обоснованное решение.

Методы линейного программирования применяются при решении задач:

- разработки программы работ;
- распределения объемов работ;
- распределения объема работ во времени;
- планирования грузопотоков;
- развитие и размещение производств и др.

Линейное программирование – раздел математического программирования, применяемый при разработке методов поиска экстремума линейных функций нескольких переменных при линейных дополнительных ограничениях, налагаемых на переменные. Особенностью задач линейного программирования является то, что экстремум целевой функции достигается на границе области допустимых решений. Основным методом решения задач линейного программирования является симплекс-метод. Симплекс метод является универсальным, основанный на следующем. Среди оптимальных вариантов задачи линейного программирования обязательно есть опорное решение, совпадающее с оптимальным планом. Различных опорных решений системы ограничений конечное число. Поэтому решение задачи в канонической форме можно было бы искать перебором опорных решений для выбора экстремального значения критерия оптимизации. Симплекс-метод представляет собой некоторую процедуру направленного перебора опорных решений.

Например, требуется определить оптимальный вариант водораспределения между двумя промышленными предприятиями. Суммарный объем воды $V = 100$ млн m^3 . Зависимость чистого дохода получаемого первым и вторым предприятием определяются уравнениями:

$$ЧД_1 = c_1 \times V_1 \times \eta_1/q_1 \quad ЧД_2 = c_2 \times V_2 \times \eta_2/q_2 \quad \Sigma ЧД = c_1 \times V_1 \times \eta_1/q_1 + c_2 \times V_2 \times \eta_2/q_2$$

Если $\eta_1 = \eta_2 = 0,95$ – коэффициенты полезного действия системы водоснабжения; $q_1 = 500 m^3/m$, $q_2 = 800 m^3/m$ – нормы водопотребления для выпуска единицы продукции; $c_1 = 100$ у.е., $c_2 = 300$ у.е. – условные единицы стоимости продукции.

$$\Sigma ЧД = c_1 \times V_1 \times \eta_1/q_1 + c_2 \times V_2 \times \eta_2/q_2 = 0,19 \times V_1 + 0,36 \times V_2$$

Ограничение по объемам воды $V = V_1 + V_2$

Ограничение по объему выпускаемой продукции $B_1 \geq B_{1\text{мин}}$ $B_2 \geq B_{2\text{мин}}$

где $B_1 = V_1 \times 0,0019$ $B_2 = V_2 \times 0,0012$

принимается $B_{1\text{мин}} = 0,2 \times B_{1\text{макс}} = 0,038$ $B_{2\text{мин}} = 0,2 \times B_{2\text{макс}} = 0,025$ им соответствуют объемы воды $V_{1\text{мин}} = 20$ $V_{2\text{мин}} = 24$

ограничение по производственным мощностям $B_1 \leq B_{1\text{макс}} = 0,12$, $B_2 \leq B_{2\text{макс}} = 0,07$

данным объемам производства продукции соответствуют объемы воды

$V_{1\text{макс}} = 64$ $V_{2\text{макс}} = 60$

Данная задача может быть решена графически.

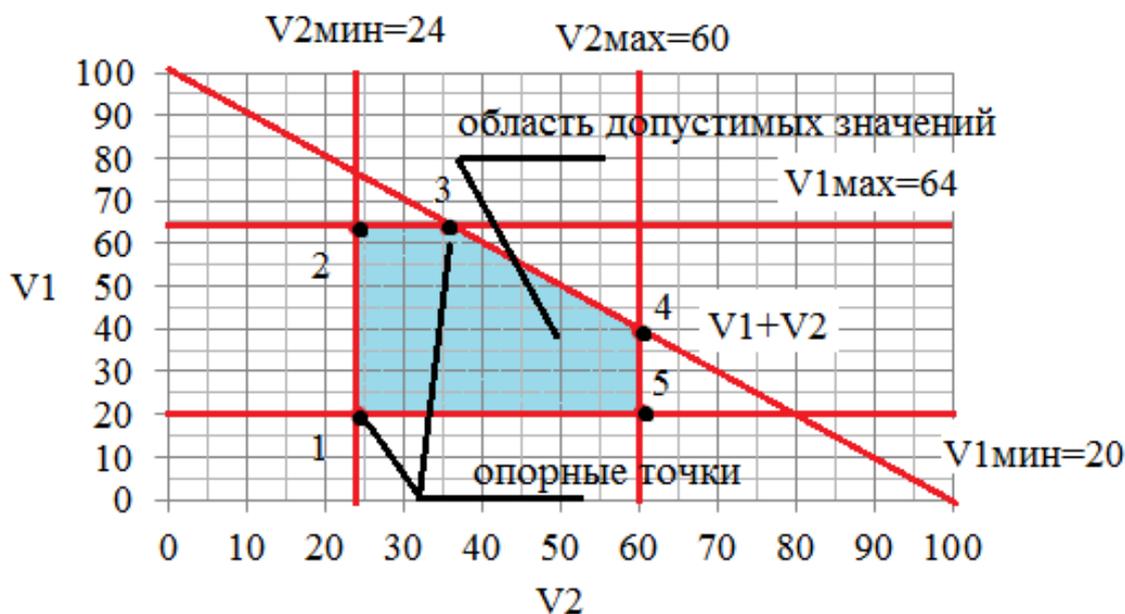


Рисунок 12.1 – Определение области решений и опорных точек

Таблица 12.1 – Определение оптимального плана водораспределения по критерию максимального суммарного чистого дохода

Опорная точка	V_1	V_2	$\Sigma\text{ЧД}$
1	20	24	12,4
2	64	24	20,8
3	64	35	24,8
4	40	60	29,2
5	20	60	25,4

Оптимальный план водораспределения соответствует $V_1 = 40$ млн m^3 и $V_2 = 60$ млн m^3 при максимальном суммарном чистом доходе $\Sigma ЧД_{\max} = 29,2$ у.е.

При распределении водных ресурсов, в условиях дефицита воды, так же используются методы: пропорционального вододеления, рассмотренный ранее; метод обратных приоритетов; метод, основанный на использовании равновесия Нэша.

Метод обратных приоритетов заключается в распределении объема располагаемого ресурса (V) пропорционально эффективности использования воды (q_i) i -м потребителем:

$$V_i = q_i \times V / \Sigma q_i \quad (12.1)$$

Эффективность представляет собой объем продукции, получаемый при использовании единицы объема воды (величина обратная норме водопотребления).

$$q_i = B_i / W_i \quad (12.2)$$

где B_i – объем продукции производимый i -м водопотребителем при использовании W_i объема воды (потребляемого без ограничений).

Например, требуется распределить объем вод $V = 100$ млн m^3 между двумя предприятиями:

Параметры	Предприятие 1	Предприятие 2	Сумма
Норма водопотребления, $m^3/т$	300	500	–
q_i , $т/m^3$	0,0033	0,002	0,0053
Приведенное значение $q_i/\Sigma q_i$	0,62	0,38	1
V_i	62	38	100

Данный метод позволяет учитывать экономическую эффективность использования воды и проводимые мероприятия по экономии водных ресурсов, что делает его более эффективным по сравнению с методом пропорционального вододеления.

Метод, основанный на использовании равновесия Нэша. Равновесие Нэша – это такая ситуация, при которой ни один из участников водораспределения не может увеличить свою эффективность, в одностороннем порядке меняя свое решение. Другими словами, равновесие Нэша – это положение, при котором стратегия участника является наилучшей реакцией на действия конкурента. Для случая водораспределения между двумя потребителями точке

Нэша соответствуют объемы:

$$V_i = \frac{V \sqrt{B_i}}{\sum \sqrt{B_i}}. \quad (12.3)$$

Например, требуется распределить объем вод $V = 100$ млн m^3 между двумя предприятиями.

Таблица 12.2 – Определение объемов водораспределения методом Нэша

Параметры	Предприятие 1	Предприятие 2	Сумма
Объем продукции B_i , т	1300	1500	–
$\sqrt{B_i}$	36	39	75
$\frac{\sqrt{B_i}}{\sum \sqrt{B_i}}$	0,48	0,52	1
V_i	48	52	100

12.2. Критериальная оптимизация

Методы оптимизации позволяют обосновывать решение, учитывая один или несколько критериев. В зависимости от этого выделяют:

– методы однокритериальной оптимизации (*если важным, при выборе, является только один критерий, например: чистый доход, суммарные затраты*);

– методы многокритериальной оптимизации (*в случае, если при выборе необходимо учитывать несколько критериев, например: экономический, экологический, социальный*).

Однокритериальная оптимизация относительно проста, использует достаточно хорошо разработанные методы, в том числе наглядный графический метод.

Многокритериальные методы требуют, с одной стороны, формализацию критериев оптимизации (что является одной сложной задач оптимизации), с другой стороны, использование специального функционала, выраженного не в натуральных единицах, а в относительных. Кроме того, многокритериальные методы позволяют выявить только область оптимальных решений.

Критерии могут максимизироваться и минимизироваться, в зависимости от их природы. Например, критерий чистого дохода

устремляется в максимум $KP_{\text{зд}} \rightarrow \max$, а критерий учитывающий экологический ущерб-минимизируется $KP_{\text{ущ}} \rightarrow \min$. В целом, задача заключается в поиске некоторого компромиссного варианта, наилучшим образом отвечающим требованиям. На рисунке 12.2 показана ситуация, когда решение о выборе оптимального параметра связана с определением компромиссного варианта по экономическому (максимизируется) и экологическому (минимизируется) критериям.

Определяется область, в пределах которой улучшение значения одного критерия, приводит к улучшению и другого критерия. Внутри данной области ищется оптимальное решение.

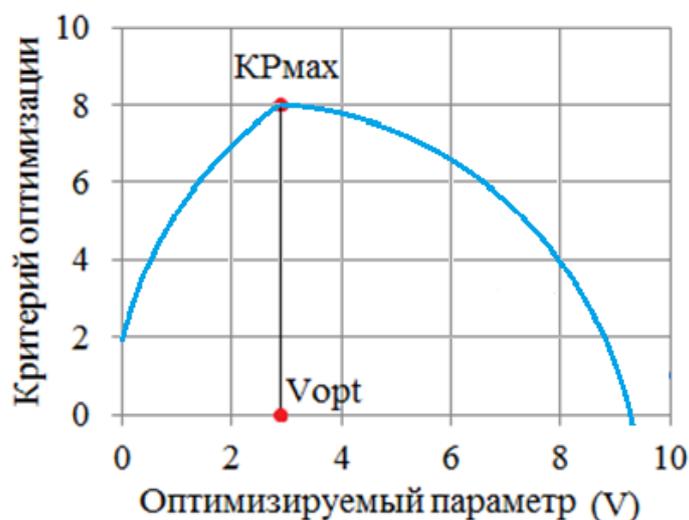


Рисунок 12.1 – Однокритериальная оптимизация

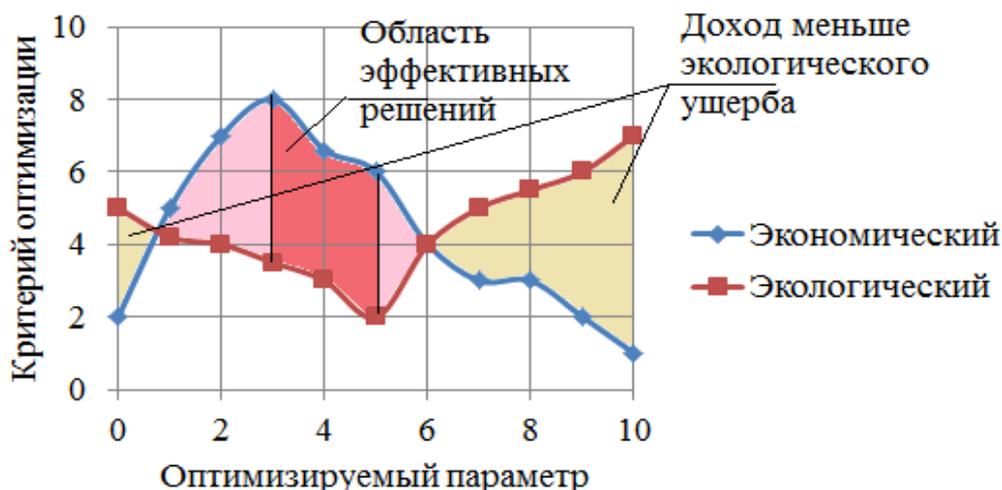


Рисунок 12.2 – Определение области эффективных решений по двум критериям, выраженным в денежных эквивалентах

Нашли применение следующие методы многокритериальной оптимизации.

Метод Домбровского. Данный метод заключается в поиске максимума новой функции (f) которая получается путем суммирования значений всех i -х частных критериев (KP_i). Для этого используемые критерии нормируются по их максимальному значению. Учитывая, что экологический критерий должен быть минимизирован, его использование в данном методе требует нормирования с изменением значений на обратное.

$$\text{Экономический критерий: } KP_{\text{чд}} = D_{\Sigma} / D_{\Sigma\text{макс}} \quad (12.4)$$

$$\text{Производственный: } KP_{\text{п}} = (K_{\text{гэс}} + K_{\text{оп}}) / 2 \quad (12.5)$$

$$\text{Экологический: } KP_{\text{эк}} = 1 - (KP_{\text{эк}} / KP_{\text{экмакс}}) \quad (12.6)$$

Данный метод применим для случая равноценных критериев, когда ни одному из критериев не отдается предпочтений.

$$f \rightarrow \max(f) = KP_{\text{чд}} + KP_{\text{п}} + KP_{\text{эк}} \quad (12.7)$$

Метод позволяет учесть значимость критериев, если в процессе принятия решений отдается предпочтение тому или иному критерию. Для этого используются весовые коэффициенты (μ).

$$f \rightarrow \max(f) = \mu_{\text{э}} \times KP_{\text{чд}} + \mu_{\text{п}} \times KP_{\text{п}} + \mu_{\text{эк}} \times KP_{\text{эк}} \quad (12.8)$$

$$\sum \mu_i = 1$$

Значения весовых коэффициентов принимаются на основе экспертных оценок или определяются исходя из конкретных соображений. Значения весовых коэффициентов не изменяются по рассматриваемым вариантам.

Метод «Равной эффективности». Данный метод основан на выборе компромиссного варианта, для которого эффективности рассматриваемых критериев наилучшим образом соответствуют друг другу:

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{э}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{п}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{эк}}, \quad (12.9)$$

где \mathcal{E}_i – эффективность i -го критерия, рассчитываемая по выражению:

$$\mathcal{E}\Phi = (KP - KP_{\text{мин}}) / (KP_{\text{макс}} - KP_{\text{мин}}), \quad (12.10)$$

где min , max – соответственно, обозначение минимального и максимального значения критерия.

Принимается вариант решения, в котором значения эффективностей разных критериев $\mathcal{E}\Phi_i$ наилучшим образом соответствуют друг к другу, что равносильно минимальному значению величины:

$$\Delta \mathcal{E}\Phi = |\mathcal{E}\Phi_{\text{э}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{п}}| + |\mathcal{E}\Phi_{\text{э}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{кэ}}| + |\mathcal{E}\Phi_{\text{п}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{кэ}}| \rightarrow \text{min} \quad (12.11)$$

ГЛАВА 2. РАСЧЕТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

ТЕМАТИКА: УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ
ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии, вопросы управления водохозяйственной системой рассматриваются на примере обоснования параметров ирригационно-энергетического водохозяйственного комплекса, расположенного на участке бассейна реки, в пределах административной области. Решаемые вопросы:

- определение оптимального полезного объема водохранилища;
- оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением.

Оптимизация – это процесс нахождения наилучшего решения задачи, по выбранному критерию (критерию оптимизации). **Критерий оптимизации** – это показатель, который выражает меру эффекта принимаемого решения для сравнительной оценки возможных вариантов и выбора наилучшего.

Основанием выполнения работы являются нормативные и законодательные акты:

- Водный кодекс российской федерации: принятого ГД РФ 2006.06.03. № 74-ФЗ [Собрание законодательства РФ, 05.06.2006, № 23, ст. 2381];

- Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года: утв. распоряжением Правительства РФ 2009.08.27. № 1235-р.

Во ВВЕДЕНИЕ приводятся общие сведения об объекте исследования (бассейне реки) и области, в которой он расположен. Характер использования водных ресурсов, на основе краткого описания участников водохозяйственного комплекса (ВХК). Все участники ВХК делятся на водопотребителей и водопользователей. Для условий работы принимается следующий состав ВХК:

- коммунально-бытовое хозяйство городов (КБХ);
- сельскохозяйственное водоснабжение;
- промышленность;
- орошение;
- обязательными водопользователями являются охрана природы и ГЭС.

Источниками воды служат:

- река, вода которой используется для целей промышленности и орошения, энергетики;
- подземные воды, гидравлически не связанные с рекой (межпластовые горизонты), используются для КБХ;
- подземные воды, гидравлически связанные с рекой (грунтовые воды), используются для сельскохозяйственного водоснабжения.

Решение вопросов начинается с постановки задачи, которая подразумевает:

- выбор параметра оптимизации;
- формализацию критериев оптимизации;
- выбор системы ограничений.

1. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В данной главе указывается основной водный объект – река, прилагается схема расположения бассейна реки на отдельном листе формата А4.



Рисунок 1.1 – Пример схемы бассейна реки Суда Вологодской области. (Устьевой створ 1-1)

Гидрологическими характеристиками водосбора являются: площадь бассейна $F_{бас}$, км², модуль стока воды g , л/с×км², залесенность $f_{л}$ и распаханность территории $f_{паш}$.

К гидрологическим характеристикам реки относятся: норма стока воды W_p , млн м³, среднемноголетний годовой расход воды Q_p , м³/с, коэффициент вариации C_v и асимметрии C_s стока, уклон реки Ip , ‰ и длина реки L , км. Все данные представляются в табличном виде (таблица 1.1).

Исходные данные: L , F , $f_{л}$, $f_{паш}$ – берутся из водного кадастра, интернет ресурсов или определяются по физической карте (могут задаваться в виде исходных данных). Значения g , C_v – определяются по картам изолиний [Иванов, Неговская, 1979].

Таблица 1.1 – Гидрологические характеристики бассейна реки

L , км	$F_{бас}$, км ²	g , л/с×км ²	Q_p , м ³ /с	W_p , млн м ³	Ip , ‰.	C_v	C_s	Площадь угодий, %	
								$f_{л}$	$f_{паш}$

Норма стока W_p и среднемноголетний расход воды Q_p в реке, при отсутствии данных наблюдений, рассчитываются по формуле:

$$W_p = Q_p \times \tau, \text{ млн м}^3 \quad (1.1)$$

$$Q_p = g \times F_{\text{бас}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.2)$$

где $\tau = 31,54$ млн сек./год.

Строится график кривой обеспеченности годового стока воды (рисунок 1.2). Кривая обеспеченности позволяет определить объем стока в годы заданной расчетной обеспеченности. Внутригодовое распределение стока представляется в табличном виде (таблица 1.3), в которой указываются объемы стока для лет 75 и 95 % обеспеченности (эти данные будут использованы для водно-балансовых расчетов).

Таблица 1.3 – Внутригодовое распределение объемов стока воды в створе 1-1, млн м³

P, %	Месяцы												Год	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
95														
75														

В условиях учебной работы можно использовать типовое внутригодовое распределение речного стока, представленное в Приложении.

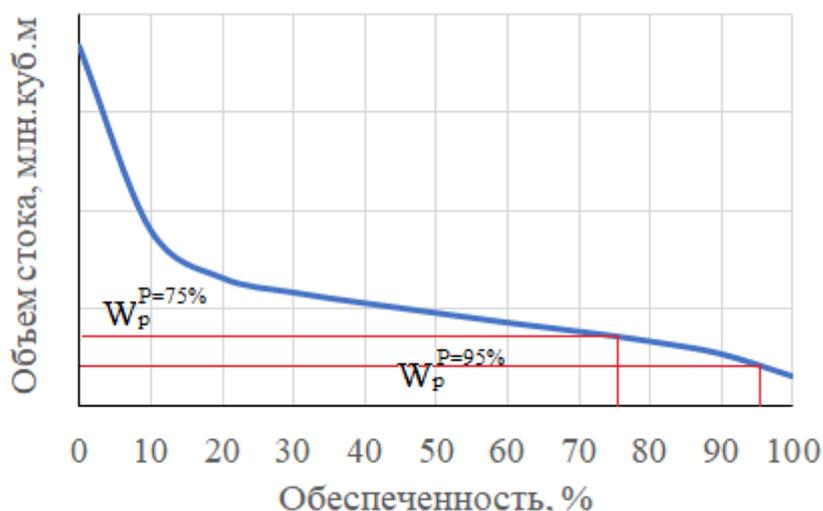


Рисунок 1.2 – Кривая обеспеченности годового стока реки в устьевом створе

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА

Экологический сток рек – часть естественного стока, позволяющая сохранить состояние устойчивого равновесия водной экосистемы. Его значение определяется индивидуально для каждой реки. Экологический сток должен удовлетворять следующим условиям:

- обеспечение достаточного для водной биоты объема воды, как объема жизненного пространства;
- изменчивость по годам и внутри года (как это наблюдается в естественных условиях);
- сохранение параметров водного потока в пределах диапазона их оптимальных значений (глубина, скорость течения воды, площадь мелководий, площадь заливных земель и продолжительность их затопления и др.).

Расчет величины экологического стока проводится методом «Пропорциональных коэффициентов». При этом, в год заданной обеспеченности (P) величина экологически допустимого стока (за год и по месяцам) определяется как доля от природного (естественного) речного стока в год данной обеспеченности (Q_p^p):

$$Q_{\text{эк}}^p = K_{\text{эк}} \times Q_p^p, \quad (2.1)$$

где $K_{\text{эк}}$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от водности года в пределах (0,7...0,9):

Обеспеченность, $P\%$	$K_{\text{эк}}$
≤ 75	0,7
$80 < P < 90$	0,8
≥ 95	0,9

Результаты определения объемов экологически допустимого стока представляются в табличном виде (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Внутригодовое распределение объемов экологически допустимого стока воды в створе 1-1, млн м³

$P, \%$	Месяцы												Год	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
95														
75														

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

В данной главе определяются объемы используемых водных ресурсов:

- объемы водопотребления и водоотведения;
- объемы водопользования;
- показатели загрязненности сточных вод.

Результаты данной главы позволят обосновать управление количеством и качеством водных ресурсов.

3.1. Объемы водопотребления и водоотведения

3.1.1. Объемы водопотребления

КБХ. Годовой объем водопотребления в коммунально-бытовом хозяйстве (КБХ) определяется в зависимости от численности населения ($N_{\text{КБХ}}$, т. чел.), нормы водопотребления (количество воды приходящееся на одного человека в сутки ($g_{\text{КБХ}}$, л/сут×чел.) (см. таблицы 3.1), расчетного периода времени ($\tau = 365$ сут) и коэффициента полезного действия ($\eta_{\text{КБХ}} = 0,95$) системы водоснабжения:

$$W_{\text{КБХ}} = N_{\text{КБХ}} \times g_{\text{КБХ}} \times 365 / (10^6 \times \eta_{\text{КБХ}}), \text{ млн м}^3 \quad (3.1)$$

Таблица 3.1 – Нормы водопотребления в коммунально-бытовом хозяйстве в зависимости от степени благоустройства

Характеристика степени благоустройства	Нормы водопотребления, л/сут×чел.
Сельская местность	
Водозабор из колодцев	30
Водозабор из водоразборных колонок общего пользования	50
Поселки городского типа	
Централизованное водоснабжение холодной водой, канализация	125...160
Города	
Централизованное водоснабжение холодной водой, канализация, с ваннами и местным отоплением	160...230
Централизованное водоснабжение холодной и горячей водой и канализация с централизованным отоплением	230...360

Промышленность. Годовой объем водопотребления промышленностью определяется как доля от объема водопотребления в КБХ. В учебной работе допускается определять водопотребление промышленностью по данным таблицы 3.2. Например, для Орловской области доля водопотребления промышленностью составляет 45 %, а питьевого водоснабжения в КБХ 35 %. Если водопотребление в КБХ составляет 8,95 млн м³, то объем потребления воды промышленностью составит: $W_{\text{пром}} = 8,95 \times 0,45/0,35 = 11,51$ млн м³.

Сельскохозяйственное водоснабжение осуществляется для целей сельского коммунального хозяйства и животноводства. Годовой объем водопотребления определяется как доля от объема водопотребления в КБХ, используя данные таблицы 3.2.

Орошение. Объем водопотребления для орошения определяется в зависимости от площади орошения ($F_{\text{ор}}$, га), оросительной нормы (M , м³/га – берется по данным таблица 3.3) и коэффициента полезного действия оросительной системы ($\eta_{\text{ор}} = 0,85$).

$$W_{\text{ор}} = F_{\text{ор}} \times M / \eta_{\text{ор}}, \text{ млн м}^3 \quad (3.2)$$

Таблица 3.2 – Объемы водопотребления из поверхностных и подземных источников в областях России. /http://www.orelgiet.ru/1_11_10zimi.pdf/

Область, край	Забрано из подземных источников, %	Водопотребление участниками ВХК, %		
		КБХ	Промыш.	С/х воснабж.
Новгородская	17	25	46	9
Псковская	44	30	26	20
Волгоградская	3	11	85	1
Брянская	60	39	38	18
Владимирская	42	32	56	5
Ивановская	16	23	49	5
Тверская	6	4	60	1
Калужская	62	45	27	14
Костромская	1	2	98	1
Орловская	59	35	45	16
Рязанская	42	38	44	12
Смоленская	34	16	43	7
Тульская	57	25	48	6
Ярославская	6	43	55	3
Нижегородская	10	20	70	2

Продолжение таблицы 3.2

Белгородская	62	19	22	13
Воронежская	34	16	63	10
Курская	46	19	63	10
Липецкая	52	21	53	7
Волгоградская	9	13	14	6
Самарская	21	25	39	4
Пензенская	23	18	42	13
Саратовская	5	10	17	5
Ульяновская	36	30	26	15
Краснодарская	9	5	10	3
Ставропольский край	2	3	39	3
Ростовская	5	5	34	3
Пермская	10	9	85	1

**Таблица 3.3 – Средневзвешенные оросительные нормы (М)
для севооборотов по областям России**

Область, край, республика	М, м ³ /га	Область, край, республика	М, м ³ /га
Владимирская	1750	Самарская	1960
Ивановская	1700	Пензенская	2330
Тверская	950	Ульяновская	2520
Калужская	1300	Краснодарский	4150
Костромская	1250	Ростовская	5300
Московская	1300	Ставропольский	5160
Орловская	2000	Пермская	1380
Рязанская	2200	Новгородская	2100
Смоленская	900	Псковская	2150
Тульская	1950	Белгородская	3050
Ярославская	1200	Воронежская	3700
Саратовская	4990	Курская	2350
Волгоградская	5780	Липецкая	2750
Нижегородская	7470	Волгоградская	4200

**Таблица 3.4 – Внутригодовое распределение объемов
водопотребления для орошения, %**

Область край, республика	Месяц								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Рязанская	–	–	14	32	18	22	14	–	–

Продолжение таблицы 3.4

Смоленская	–	–	10	27	22	25	16	–	–
Тульская	–	5	16	27	23	19	10	–	–
Ярославская	–	–	11	45	26	16	2	–	–
Горьковская	–	–	18	32	20	24	6	–	–
Кировская	–	–	14	30	28	22	6	–	–
Марийская	–	–	14	35	24	19	8	–	–
Мордовская	–	–	20	28	17	22	13	–	–
Чувашская	–	–	12	34	21	22	11	–	–
Белгородская	–	–	19	24	22	19	16	–	–
Воронежская	–	–	19	22	21	20	18	–	–
Курская	–	–	17	21	20	24	18	–	–
Липецкая	–	–	17	27	22	21	13	–	–
Тамбовская	–	–	20	27	21	21	11	–	–
Куйбышевская	–	–	17	30	28	15	10	–	–
Саратовская	–	4	22	24	25	10	15	–	–
Волгоградская	–	4	22	29	24	10	11	–	–
Астраханская	–	8	24	25	23	10	10	–	–
Калмыцкая	–	8	25	25	26	8	8	–	–
Башкирская	–	–	15	31	36	18	–	–	–
Татарская	–	–	15	30	39	16	–	–	–
Пензенская	–	–	15	35	36	14	–	–	–
Ульяновская	–	–	16	34	41	9	–	–	–
Краснодарский	3	4	10	11	22	18	17	15	2
Ростовская	–	2	8	16	24	19	17	14	–
Ставропольский	2	4	11	16	20	18	17	9	3
Свердловская	–	–	20	24	21	19	16	–	–
Пермская	–	–	13	25	25	23	14	–	–
Удмуртская	–	–	14	23	28	21	14	–	–
Курганская	–	–	11	31	21	20	17	–	–
Челябинская	–	–	13	31	19	19	18	–	–
Оренбургская	–	–	12	34	22	20	12	–	–
Томская	–	–	–	42	39	19	–	–	–
Омская	–	–	6	45	22	22	5	–	–
Тюменская	–	–	4	37	30	26	3	–	–
Алтайский	–	–	3	33	41	14	9	–	–
Кемеровская	–	–	–	33	37	30	–	–	–
Новосибирская	–	–	–	32	45	12	11	–	–
Красноярский	–	–	21	23	23	20	13	–	–
Тувинская	–	–	18	18	18	18	28	–	–
Иркутская	–	–	21	21	20	17	21	–	–

3.1.2. Объемы водоотведения

Объемы водоотведения сточных вод в реку (объемы возвратных вод) определяются для всех водопотребителей по формуле (3.8), в зависимости от коэффициентов возвратных вод (табл. 3.5) и объемов водопотребления:

$$W_{\text{вв}i} = K_{\text{вв}i} \times W_i, \text{ млн м}^3 \quad (3.3)$$

Таблица 3.5 – Значения коэффициентов возвратных вод

Водопотребители	$K_{\text{вв}i}$
КБХ	0,7
Промышленность	0,8
Сельское КБХ	0,5
Животноводство	0,5
Рекреация	0,7
Орошение	0,1

3.2. Объемы водопользования

Водопользователями на объекте являются: ГЭС и охрана природы. Интересы охраны природы представлены объемами экологического стока. Выработка электроэнергии на ГЭС планируется на основе использования объемов фактического стока реки.

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТОЧНЫХ ВОД

Сточные воды, сбрасываемые водопотребителями в водные объекты, загрязнены, поэтому необходимо учитывать их влияние на качество речной воды. Для этого используется показатель «предельной загрязненности» воды. Данная величина может быть выражена в виде:

- безразмерного коэффициента предельной загрязненности ($K_{\text{пз}}$);
- объема предельной загрязненности ($W_{\text{пз}}$), который выражается в размерности объемов воды (млн м³).

Физический смысл коэффициента $K_{\text{пз}}$ – осредненная кратность

превышения нормативов качества воды. Коэффициент предельной загрязненности рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{пз}i} = \sum (C_{\text{вв}ji} / \text{ПДК}_i) / (n - 1), \quad (4.1)$$

где $C_{\text{вв}ji}$ – концентрация j -го загрязняющего вещества в сточных водах i -го источника загрязнения, мг/л; ПДК_j – предельно допустимая концентрация j -го вещества, мг/л; n – количество веществ, используемых для оценки значения коэффициента $K_{\text{пз}}$.

Объем предельной загрязненности определяется по формуле (4.2) для конкретного i -го потребителя и представляет собой условный объем сброса загрязняющих веществ в водный объект.

$$W_{\text{пз}i} = K_{\text{пз}i} \times W_{\text{вв}i}, \quad \text{млн м}^3 \quad (4.2)$$

В учебной работе, коэффициенты $K_{\text{пз}}$ задаются в виде исходных данных.

Таблица 4.1 – Показатели загрязненности сточных вод, млн м³

Источник загрязнения	Показатели загрязненности сточных вод	
	$K_{\text{пз}}$	$W_{\text{пз}}$
Городское КБХ	10	
Промышленность	30	
Сельское КБХ	7	
Животноводство	20	
Орошение	6...12	
Итого	–	

5. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС

Воднобалансовые расчеты проводятся с целью определения свободного ресурса воды для целей орошения и гидроэнергетики, т.е. формирования ирригационно-энергетического водохозяйственного комплекса. Водохозяйственный баланс (ВХБ) составляется в целом за год и по месяцам. Расчеты выполняются в соответствии с документом [Методика составления водохозяйственных балансов водных объектов. Министерство природных ресурсов РФ от 2007-11-30 Приказ 314]. Уравнение ВХБ для i -го месяца записывается в виде:

$$MBXB_i = w_{pi} + w_{подi} + \sum w_{вви} - \sum w_i - a \times w_{подi} - w_{попи} \quad (5.1)$$

где w_{pi} – объем речного стока в i -ый месяц; a – коэффициент гидравлической связи подземных и поверхностных вод; $w_{подi}$ – объем водозабора из подземных вод в i -ый месяц; $\sum w_{вви}$ – сумма объемов возвратных вод в i -ый месяц; $\sum w_i$ – сумма объемов водопотребления в i -ый месяц; $w_{попi}$ – объем попусков в i -ый месяц; $a \times w_{подi}$ – ущерб речному стоку в i -ый месяц в результате водозабора из подземных водоносных горизонтов гидравлически связанных с рекой.

Суммарный водозабор из подземных горизонтов в i -ый месяц определяется как сумма объемов водопотребления для целей питьевого водоснабжения:

$$w_{подi} = (W_{c/x} + W_{KBX}) / 12, \text{ млн м}^3 \quad (5.2)$$

Ущерб речному стоку связан с водозабором для целей сельскохозяйственного водоснабжения. Коэффициент гидравлической связи принимается в пределах 0,3...0,7. Величина ущерба стоку реки в i -ый месяц, составит:

$$a \times w_{подi} = a \times W_{c/x} / 12, \text{ млн м}^3 \quad (5.3)$$

Объемы попусков, в уравнении ВХБ, учитывают интересы охраны водных объектов:

$$w_{попи} = w_{экол.i} \quad (5.4)$$

Составление водохозяйственного баланса проводится в табличном виде (таблица 5.1). Анализ результатов баланса ($MBXB_i$) позволяет судить о наличии дефицитов и избытков воды. При этом орошение и ГЭС в балансе не учитываются. Подразумевается, что для данных целей будет использован свободный резерв воды.

Положительная величина годового водохозяйственного баланса ($VXB > 0$) позволяет развивать орошение и получать дополнительное количество энергии на ГЭС. Поэтому водохозяйственный баланс исправляется с учетом создания водохранилища полного годичного регулирования стока. Для этого величина ВХБ равномерно распределяется по месяцам ($VXB/12$), которая отнимается от рассчитанного ранее баланса $VXB_{испi} = MBXB_i - VXB / 12$. Величина исправленного баланса в конкретный месяц ($VXB_{испi}$) определяется в табличном виде (таблица 5.2). Сумма дефицитов воды в исправленном балансе ($\sum D_{исп}$) равна максимальному полезному объему водохранилища (V_{max}): $V_{max} = \sum D_{исп}$.

Таблица 5.1 – Водохозяйственный баланс для года обеспеченностью

$P = 75 \%$, в месячных интервалах времени, млн м³

Составляющие баланса	Интервал времени												год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Объем стока реки, w_{ip}													
Водозабор подземных вод, $w_{п.в.j}$													
Объем возвратных вод, $\Sigma W_{ввj}$													
ИТОГО ПРИХОД													
Ущерб речному стоку W_v													
Водопотребление, Σw_j , всего:													
• в том числе: КБХ													
• промышленность													
• с/х водоснабжение													
Комплексный попуск $W_{поп}$													
ИТОГО РАСХОД													
МВХБ													
Фактический сток $W_{фак}$													

Таблица 5.2 – Определение максимальной полезной емкости водохранилища для полного годичного регулирования стока, млн м³

Параметр	Интервал времени												год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
МВХБ													$R = \text{МВХБ} > 0$
R/12													R
МВХБ _{исп}													

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА

Определение оптимального полезного объема водохранилища и его распределение между ГЭС и орошением делается одновременно. Связано это со следующим. С одной стороны, имеющийся ресурс воды (V_{\max}) может использоваться полностью или частично $V_{\text{плз}} \subset [0 \dots V_{\max}]$. С другой стороны, конкретный объем ресурса $V_{\text{плз}}$

можно распределить между ГЭС ($W_{ГЭС}$) и орошением ($W_{ор}$) множеством разных вариантов $W_{ГЭС} \subset [V_{плз} \dots 0]$ и $W_{ор} \subset [0 \dots V_{плз}]$ учитывая, что $V_{плз} = W_{ГЭС} + W_{ор}$. При этом, ни один из вариантов не гарантирует высокой эффективности, т. е. оптимальности решения. Оптимальность достигается путем использования некоторого целевого показателя. Целевой показатель позволяет конкретизировать задачу в отношении предпочитаемой выгоды и получить однозначный вариант водораспределения и соответствующий полезный объем водохранилища. Ожидаемая выгода обычно выражается с помощью экономических показателей, например суммарного чистого дохода. Однозначный вариант получают путем проведения оптимизационных расчетов, поэтому целевой показатель так же называется критерием оптимизации. Оптимизация может проводиться с использованием одного или нескольких критериев. Соответственно, используются методы одно- или многокритериальной оптимизации. Для проведения оптимизационных расчетов делается постановка задачи, которая подразумевает формализацию критерия оптимизации и разработку системы ограничений.

6.1. Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища

Оптимизация полезного объема водохранилища, для целей орошения и гидроэнергетики, проводится в пределах объемов имеющегося ресурса воды $V_{плз} \subset [0 \dots V_{max}]$. Целевая функция (критерий оптимизации) представляет собой зависимость суммарного чистого дохода $ЧД_{\Sigma}$, от реализации продукции, от объемов (V) водохранилища:

$$ЧД_{\Sigma} = f(V) \text{ при ограничении } V \leq V_{max}$$

$$ЧД_{\Sigma} = Д_{\Sigma} - З_{\Sigma} \tag{6.1}$$

$$Д_{\Sigma} = Д_{ор} + Д_{ГЭС} \tag{6.2}$$

$$З_{\Sigma} = З_{стр} + З_{ущ} \tag{6.3}$$

где $Д_{\Sigma}$ – суммарный доход от использования водных ресурсов для целей орошения ($Д_{ор}$) и энергетики ($Д_{ГЭС}$); V – объем водохранилища; $З_{\Sigma}$ – суммарные затраты на создание водохозяйственного комплекса (ВХК); $З_{стр}$ – затраты на строительство гидроузла, оросительной системы и гидроэлектростанции (ГЭС); $З_{ущ}$ – затраты на компенсацию ущерба объектам экономики и окружающей среде.

$$D_{op} = y_{op} \times A_1 \times W_{op} \times \eta_{op} / M \quad (6.4)$$

где y_{op} – удельный доход от реализации продукции полученной на орошаемых землях (в учебной работе принимается $y_{op}=280\ 000\dots420\ 000$ р./га); W_{op} – объем воды подаваемый для орошения; η_{op} – к.п.д. оросительной системы ($\eta_{op} = 0,85$); A_1 – коэффициент, учитывающий снижение дохода при увеличении орошаемой площади (в учебной работе задается зависимостью $A_1 = EXP(-0,2 \times V/V_{max})$).

$$D_{ГЭС} = c_{ГЭС} \times W_{ГЭС} \times H \times 600/432 \quad (6.4)$$

где $c_{ГЭС}$ – удельный доход от ГЭС (принимается 3 р./квт·ч); $W_{ГЭС}$ – объем воды подаваемый на ГЭС: $W_{ГЭС} = V_{max} - W_{op}$; H – напор на ГЭС; 432 – коэффициент учитывающий условия работы ГЭС; 600 – коэффициент, учитывающий увеличение дохода от платы промышленных предприятий за отпускаемую мощность.

$$H = ВБ - НБ \quad ВБ = f(V_{пол}) \quad НБ = f(Q) \quad (6.5)$$

$$V_{пол} = V_{мо} + V \quad (6.6)$$

$$Q = (W_{ГЭС} + W_{эк})/31,54 \quad (6.7)$$

где ВБ – отметка уровня воды в верхнем бьефе (определяется по графику (рисунок 6.1)); НБ – отметка уровня воды в нижнем бьефе (определяется по графику зависимости отметок нижнего бьефа от расходов воды рисунок 6.2); $V_{пол}$ – полный объем воды в водохранилище равный сумме мертвого $V_{мо}$ и полезного V объемов (мертвый объем водохранилища, в учебной работе, принимается при отметке верхнего бьефа 10 м); Q – расход воды пропускаемый через турбины ГЭС.

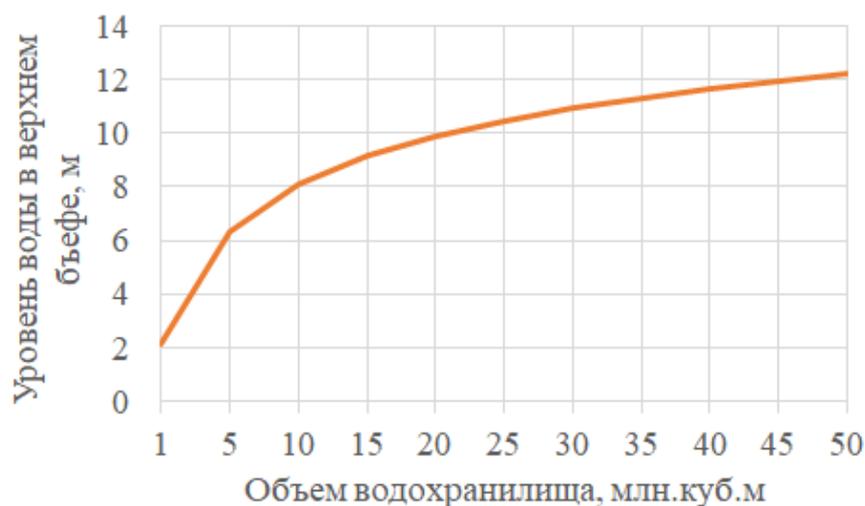


Рисунок 6.1 – Зависимость отметок верхнего бьефа от объемов воды в водохранилище (в учебной работе данная зависимость задается уравнением

$$H = 2,58 \times \ln(V) + 2,15, \text{ м})$$

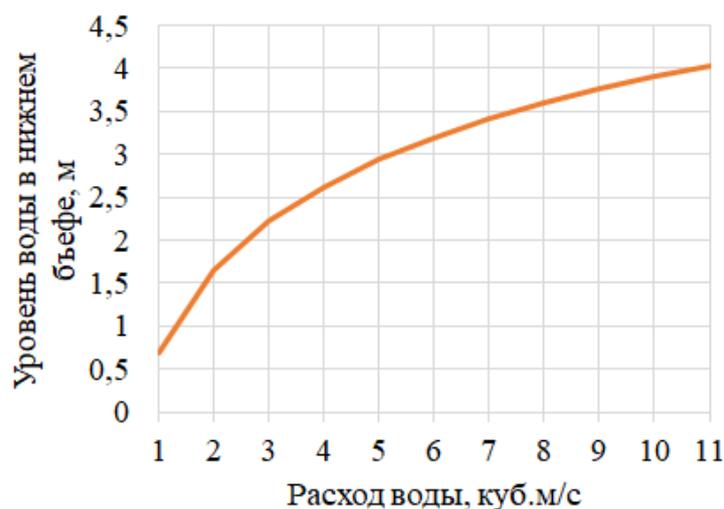


Рисунок 6.2 – Зависимости отметок нижнего бьефа (НБ) от расходов воды (Q)

(В учебной работе задается уравнением $НБ = 1,4 \times LN(Q) + C$, где коэффициент C принимается равным $0,68 \dots 2$ м в зависимости от расходов воды, соответственно больше или меньше $1 \text{ м}^3/\text{с}$)

$$Z_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}} \quad (6.8)$$

где A_2 – коэффициент, учитывающий увеличение удельных затрат при увеличении объема водохранилища (V) (в учебной работе задается выражением $A_2 = 0,5(V/V_{\text{max}})^2 + 0,5 \cdot (V/V_{\text{max}})$); $y_{\text{стр}}$ – удельные затраты на строительство гидроузла, принимается $y_{\text{стр}} = 100 \text{ р./м}^3$.

$$Z_{\text{ущ}} = A_2 \times F \times y_{\text{ущ}}, \quad (6.9)$$

где $y_{\text{ущ}}$ – удельный ущерб от создания водохранилища, р./м^2 , в учебной работе принимается равной 120 р./м^2 .

Площадь водохранилища определяется как отношение полного объема водохранилища ($V_{\text{пол}}$) к средней глубине ($h_{\text{ср}}$):

$$F = V_{\text{пол}} / h_{\text{ср}} \quad h_{\text{ср}} \approx H_{\text{max}} / 2 \quad (6.10)$$

Максимальная глубина воды в водохранилище H_{max} определяется по графику зависимости отметок верхнего бьефа от объемов водохранилища (рисунок 6.1).

6.2. Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением

Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением осуществляется с помощью целевой функции, которая задается в

виде зависимости суммарного чистого дохода при реализации продукции, получаемой на орошаемых землях и ГЭС, от используемых ими объемов воды.

$$\Sigma \text{ЧД} = f(W) \rightarrow \max \quad (6.10)$$

$$\Sigma \text{ЧД} = \text{ЧД}_{\text{ор}} + \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} \quad (6.11)$$

$$\text{ЧД}_{\text{ор}} = D_{\text{ор}} - Z_{\text{ор}} \quad \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} = D_{\text{ГЭС}} - Z_{\text{ГЭС}} \quad (6.12)$$

$$V_{\text{плз}} = W_{\text{ор}} + W_{\text{ГЭС}} \quad (6.13)$$

где $\Sigma \text{ЧД}$ – суммарный чистый доход от использования водных ресурсов для орошения и ГЭС; $\text{ЧД}_{\text{ор}}$ – чистый доход от орошения; $\text{ЧД}_{\text{ГЭС}}$ – чистый доход от ГЭС; $D_{\text{ор}}$, $Z_{\text{ор}}$ – соответственно доход получаемый от орошения и затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы; $D_{\text{ГЭС}}$, $Z_{\text{ГЭС}}$ – соответственно, доход от продажи электроэнергии получаемой на ГЭС и затраты на строительство и эксплуатацию ГЭС.

Доход, получаемый от орошения и ГЭС, определяется по зависимостям (6.2) и (6.3).

Затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы определяются в зависимости от стоимости воды подаваемой на орошение ($z_{\text{уд ор}} = 30 \text{ р./м}^3$) и ее объемов (V , га).

$$Z_{\text{ор}} = z_{\text{уд ор}} \times V_{\text{ор}} \times A_2, \text{ млн р.} \quad (6.14)$$

Затраты на строительство и эксплуатацию гидроэлектростанции определяется в зависимости от объемов подаваемой на ГЭС воды ($V_{\text{ГЭС}} = V_{\text{плз}} - V_{\text{ор}}$) и удельных затрат $z_{\text{уд ГЭС}} = 25 \text{ р./м}^3$.

$$Z_{\text{ГЭС}} = A_3 \times z_{\text{уд ГЭС}} \times V_{\text{ГЭС}}, \text{ млн р.,} \quad (6.15)$$

где A_3 – коэффициент, учитывающий увеличение удельных затрат при увеличении объемов вырабатываемой энергии: $A_3 = 1 - A_2$.

Все оптимизационные расчеты проводятся в табличной форме (таблица 6.1, 6.2), в которой имеющийся ресурс воды делится на i вариантов минимум на 5 вариантов ($V_i = 0 \dots V_{\text{max}}$, $i = 1 \dots 5$). Для каждого i -го варианта делается оптимизация водораспределения объемов воды (V_i) между ГЭС и орошением. Для этого каждый объем (V_i) делится на j вариантов ($V_{ij} = 0 \dots V_i$, $j = 1 \dots 10$).

6.3. Система ограничений

Выработка управляющего решения учитывает ряд ограничений, например:

- ограничение на объем располагаемого ресурса $V_{\text{плз}} \leq V_{\text{max}}$;
- ограничение на объем вырабатываемой энергии $\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} \geq \mathcal{E}_{\text{мин.потр.}}$;
- ограничение на площадь орошения $F_{\text{ор}} \geq F_{\text{мин}}$.

Мощность ГЭС, по условию работы, должна быть не менее 1...10 МВт, что соответствует VI классу гидротехнического сооружения (СП 58.13330.2012. *Гидротехнические сооружения. Основные положения*). Данной мощности соответствует выработка энергии в объеме $\mathcal{E}_{\text{мин.}} = 2...20$ т МВт·ч).

В работе, минимальная площадь орошения ограничивается оросительной способностью реки, которая определяется для товарной части устойчивого стока. Устойчивый сток определяется как минимальный месячный объем стока за темный период года в год 95 % обеспеченности $w_{\text{мин}}^{95\%}$ умноженный на продолжительность поливного периода ($T_{\text{п}} = 3...9$ мес. – определяется по таблице 3.4) Величина товарной части устойчивого стока $W_{\text{ус}}^{\text{T}}$ рассчитывается как разница величины устойчивого стока минус объем экологического стока.

$$W_{\text{ус}}^{\text{T}} = w_{\text{мин}}^{95\%} T_{\text{п}} \times 0,1, \quad (6.16)$$

где 0,1 – коэффициент, учитывающий товарную часть стока в год 95 % обеспеченности (т. к. объем экологического стока определяется как $W_{\text{эк}} = 0,9 \times W_{\text{р}}$).

$$F_{\text{мин}} = W_{\text{ус}}^{\text{T}} \times \eta_{\text{ор}} / M, \text{ га} \quad (6.17)$$

Максимальная площадь ограничивается долей орошаемых культур в составе севооборота (в учебной работе принимается $F_{\text{max}} = 5...10\%$ от $F_{\text{бас}}$).

Полученные в результате оптимизационных расчетов объемы воды для орошения и ГЭС проверяются на соответствие ограничениям. В случае соблюдения ограничений, полученные объемы принимаются. Если требования не выполняются, объемы изменяются в соответствии с ограничениями, и определяется величина потери прибыли.

Таблица 6.1 – Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением, по вариантам полезного объема водохранилища

Вар.	Объем, млн м ³	A ₁	Д _{ор} , млн р.	A ₂	З _{ор} , млн р.	ЧД _{ор} , млн р.	V _{max} i-V _{ij} ³ , млн м ³	V _{пол} i, млн м ³	ВБ, м	W _{гэс} , млн м ³	Q, м ³ /с	НБ, м	Н, м	Д _{гэс} , млн р.	З _{гэс} , млн р.	ЧД _{гэс} , млн р.	ΣЧД, млн р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	0																
i	V _{ij}																
	V _i																

Примечание. V_{пол}i = V_i + V_{мо}, где V_{мо} – мертвый объем водохранилища (в работе принимается при отметке ВБ = 10 м.

$$W_{гэс} = (V_{max} i - V_{ij}) + W_{пол}^{75\%} - \text{объем воды отдаваемый на ГЭС. } W_{пол}^{75\%} - \text{объем экологического стока в год 75 \% обеспеченности (таблица 2.1).}$$

75 % обеспеченности (таблица 2.1).

Таблица 6.2 – Оптимизация полезного объема водохранилища

Вар.	V _{ор} ^{opt} , млн м ³	Д _{ор} , млн р.	Д _{гэс} , млн р.	ΣД, млн р.	A ₂	З _{ср} , млн р.	V _{пол} i, млн м ³	ВБ, м	h _{ср} , м	F _{вод} , км ²	V _{уп} ² , р./м ²	ΣЗ, млн р.	ΣЧД, млн р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	V ₁ ^{opt}													
2		Из табл.7.1	Из табл.7.1				Выбирается из табл. 7.1 для оптимальных вариантов							
3	V _i ^{opt}													
4														
5	V ₅ ^{opt}													

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Полезный объем водохранилища определен на основе оптимизации одного критерия, который учитывает общие для всего ВХК экономические характеристики. При этом, в явном виде, не учитываются:

- требования конкретного участника водохозяйственного комплекса (орошения и энергетики);
- формирование качества воды в водохранилище;
- затопление и подтопление земель при создании водохранилища.

Данные факторы влияют на принятие решения по определению полезной емкости и могут быть формализованы в виде критериев оптимизации. Поэтому, полезный объем водохранилища может определяться путем проведения многокритериальной оптимизации. Для этого выделяются критерии:

- 1) *экономический критерий*: максимизация суммарного чистого дохода от создания водохранилища – $KP_{\text{чд}} \rightarrow \max$;
- 2) *экологический критерий*: минимизация ущербов от ухудшения качества воды, затопления и подтопления – $KP_{\text{эк}} \rightarrow \min$;
- 3) *производственный критерий*: максимизация объемов вырабатываемой энергии $KP_{\text{ГЭС}} \rightarrow \max$ и площади орошения $KP_{\text{ор}} \rightarrow \max$.

При этом должны учитываться ограничения:

- а. указанные в разделе 6.3;
- б. качество воды в водохранилище, которое формируется под влиянием стоков с орошаемых угодий, должно соответствовать классу не хуже «умеренно загрязненного»: $K_{\text{пз}} \leq 1$.

7.1. Формирование критериев оптимизации

7.1.1. Экономический критерий

Экономический критерий (максимизация суммарного чистого дохода от создания водохранилища) сформирован в разделе 6.1 и определяется по формулам:

$$\text{ЧД}_\Sigma = \text{Д}_\Sigma - \text{З}_\Sigma \quad (7.1)$$

$$\text{Д}_\Sigma = \text{Д}_{\text{ор}} + \text{Д}_{\text{ГЭС}} \quad (7.2)$$

$$\text{З}_\Sigma = \text{З}_{\text{стр}} + \text{З}_{\text{ущ}} \quad (7.3)$$

$$\text{Д}_{\text{ор}} = y_{\text{ор}} \times A_1 \times W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / M \quad (7.4)$$

$$\text{Д}_{\text{ГЭС}} = c_{\text{ГЭС}} \times W_{\text{ГЭС}} \times H \times 200/432 \quad (7.5)$$

$$\text{З}_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}} \quad (7.6)$$

$$\text{З}_{\text{ущ}} = A_2 \times F \times y_{\text{ущ}} \quad (7.7)$$

где $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\text{max}})$; $A_2 = 0,5(V/V_{\text{max}})^2 + 0,5(V/V_{\text{max}})$; $y_{\text{стр}} = 100 \text{ р./м}^3$; $y_{\text{ущ}} = 120 \text{ р./м}^2$; $c_{\text{ГЭС}} = 3 \text{ р./кВт}\cdot\text{ч}$; $y_{\text{ор}} = 280\ 000 \dots 420\ 000 \text{ р./га}$; $\eta_{\text{ор}} = 0,85$.

7.1.2. Производственный критерий

Производственный критерий формируется с учетом характеристик орошения и энергетики. Критерий орошения выражается через орошаемую площадь.

$$\text{КР}_{\text{ор}} = V \times \eta_{\text{ор}} \times 10^6 / M, \text{ га} \quad (7.8)$$

Критерий энергетики выражается через объем вырабатываемой на ГЭС электроэнергии.

$$\text{КР}_{\text{ГЭС}} = (V_{\text{max}} - V) \times H / 432 \quad (7.9)$$

Два производственных критерия могут быть свернуты в один путем их нормирования по максимальным значениям:

$$\text{КР}_{\Pi} = [(\text{КР}_{\text{ор}} / \text{КР}_{\text{ор max}}) + (\text{КР}_{\text{ГЭС}} / \text{КР}_{\text{ГЭС max}})] / 2 \quad (7.10)$$

7.1.3. Экологический критерий

Ведение экологического критерия связано с негативными явлениями от создания водохранилища, в частности:

- увеличение объема водохранилища позволяет увеличить площадь орошаемых земель, при этом увеличиваются объемы загрязнений, поступающие в водохранилище с орошаемых площадей, что ухудшает качество воды;
- создание водохранилища связано с затоплением и подтоплением земель, что приводит к необходимости переселения людей из зоны затопления, потере сельскохозяйственных земель и другим ущербам.

Оценка качества воды в водохранилище делается с помощью формулы Фолленвайдера, приведенной к виду зависимости коэффициента предельной загрязненности ($K_{пз}$) от нагрузки на водохранилище ($\sum W_{пз}$), его объема (V), коэффициента седиментации (σ), полного объема ($V+V_{мо}$) и объема попуска ($W_{поп}$).

$$K_{пз} = \frac{W_{пз\text{ ор}}}{\left(\sigma + \frac{V}{W_{поп}}\right)(V + V_{мо})} \quad (7.11)$$

$$W_{пз\text{ ор}} = W_p^{95\%} F_{ор} K_{пз}^{ор} / F_{бас}. \quad (7.12)$$

Полученное значение показателя $K_{пз}$ используется для оценки качества воды в водохранилище с помощью классификационной таблицы 7.1.

Таблица 7.1 – Классификация качества воды по показателю предельной загрязненности ($K_{пз}$)

$K_{пз}$	$< -0,8$	$-0,8...0$	$0...1$	$1...3$	$3...5$	> 5
Класс	Очень чистая	Чистая	Умеренно загрязненная	Загрязненная	Грязная	Очень грязная

Площадь подтопления земель, для равнинных рек, линейно связана с площадью затопления, что позволяет выразить величину негативного эффекта, в зависимости только от площади затопления $F_{зат}$.

$$F_{зат} = V_{пол} / h_{ср} \quad (7.13)$$

Оба экологических критериев минимизируются и могут быть объединены в один путем их нормирования:

$$KR_{эк} = \left[\left(KR_{пз} / KR_{пз\text{ макс}} \right) + \left(KR_{зат} / KR_{зат\text{ макс}} \right) \right] / 2. \quad (7.14)$$

Учет всех критериев возможен путем применения методов многокритериальной оптимизации, при этом учитываются следующие особенности:

- 1) локальные критерии имеют различные размерности и масштабы измерения, что затрудняет их сравнение;
- 2) необходим учет приоритетности локальных критериев;
- 3) локальные критерии могут иметь качественный и количественный характер.

В работе используется ряд методов поиска компромиссного решения: метод Домбровского, метод «Уступок», метод «Линейной свертки критериев», метод «Равной эффективности», метод Фуллера, метод «Циклограмм».

7.2. Применение метода Домбровского для определения полезного объема водохранилища

Данный метод заключается в поиске максимума новой функции (f) которая получается путем суммирования значений всех i -х частных критериев (KP_i). Для этого используемые критерии нормируются по их максимальному значению. Учитывая, что экологический критерий должен быть минимизирован, его использование в данном методе требует нормирования с изменением значений на обратное.

Экономический критерий: $KP_{чд} = D_{\Sigma} / D_{\Sigma_{\max}}$;

Производственный: $KP_{п} = (K_{гэс} + K_{оп}) / 2$;

Экологический: $KP_{эк} = 1 - (KP_{эк} / KP_{эк_{\max}})$.

Данный метод применим для случая равноценных критериев, когда ни одному из критериев не отдается предпочтений.

$$f \rightarrow \max(f) = KP_{чд} + KP_{п} + KP_{эк}$$

Метод позволяет учесть значимость критериев, если в процессе принятия решений отдается предпочтение тому или иному критерию. Для этого используются весовые коэффициенты (μ).

$$f \rightarrow \max(f) = \mu_{э} \times KP_{чд} + \mu_{п} \times KP_{п} + \mu_{эк} \times KP_{эк};$$

$$\sum \mu_i = 1.$$

Значения весовых коэффициентов принимаются на основе экспертных оценок или определяются исходя из конкретных соображений. Значения весовых коэффициентов не изменяются по рассматриваемым вариантам.

Таблица 7.2 – Выбор объема водохранилища (V) методом Домбровского для равнозначных критериев

Вариант	V , млн м ³	Нормированные значения целевых функций			f
		$KP_{чд}$	$KP_{п}$	$KP_{эк}$	
i					

По данным таблицы 7.2 строится график зависимости обобщенного критерия (f) от объемов водохранилища $f = \Psi(V)$ (рисунок 7.1).

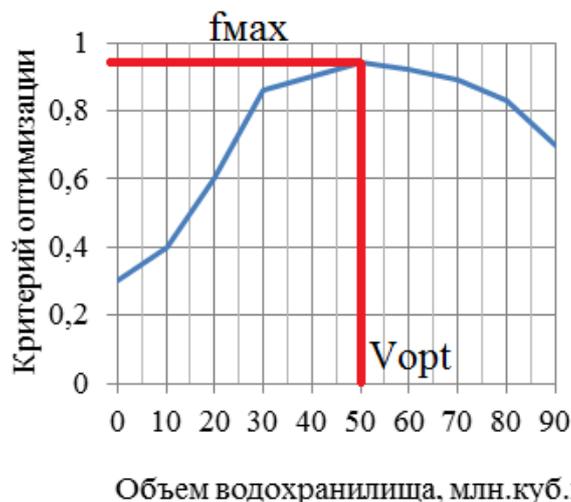


Рисунок 7.1 – Пример зависимости суммарного критерия оптимизации (f) от объемов воды в водохранилище (V)

За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение.

Таблица 7.3 – Выбор объема водохранилища методом Домбровского для неравнозначных критериев

Вариант	V , млн M^3	Нормированные значения целевых функций				f		
		$KP_{чд}$	$\mu_{э}$	$KP_{п}$	$\mu_{п}$		$KP_{эк}$	$\mu_{эк}$
i			0,3		0,2		0,5	

По данным таблицы 7.3 строится зависимость $f = \Psi(V)$. За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение.

7.3. Применение метода «Уступок»

Метод «Уступок» заключается в том, что все критерии оптимизации ($KP_{чд}$, $KP_{п}$, $KP_{эк}$) располагаются в порядке приоритетности. Первым является наименее важный критерий (например $KP_{п}$). Делается его максимизация по искомому параметру (V_1): $KP_{п} \rightarrow \max$. Затем назначается величина допустимого снижения максимального значения первого критерия $KP_{п}^{\max}$ (уступка $\Delta KP_{п}$), которая допускает

его снижение при оптимизации других критериев до величины $KP'_n \geq KP_n^{\max} - \Delta KP_n$ (рисунок 7.2).

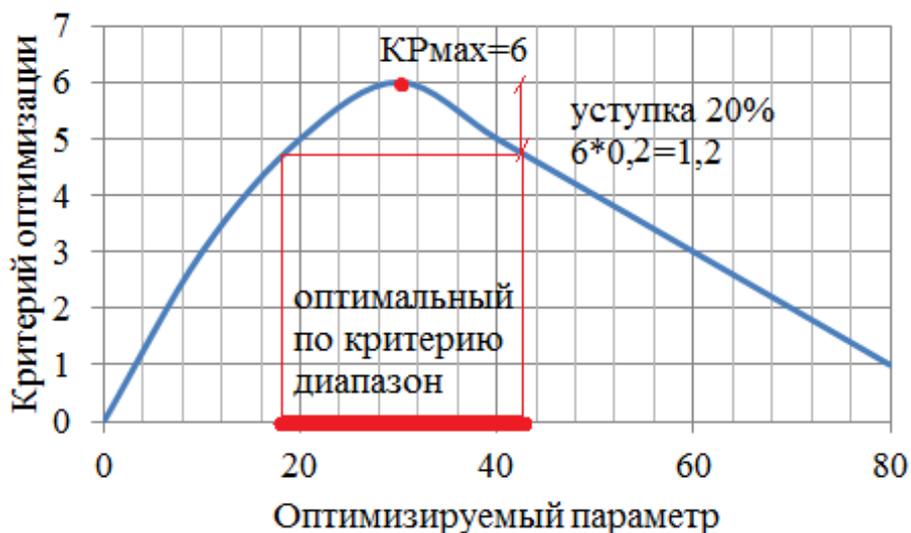


Рисунок 7.2 – Определение приемлемого оптимального диапазона для 1-го критерия при уступке 20 %

Максимизируется второй по важности критерий ($KP_{чд}$) и определяется величина $KP_{чд}^{\max}$, которому соответствует значению оптимизируемого параметра V_2 . При этом, значение первого критерия не должно быть меньше KP'_n . Если данное условие выполняется (рисунок 7.3), то назначается величина уступки для второго критерия $\Delta KP_{чд}$, которая допускает его снижение при оптимизации оставшегося критерия до величины $KP'_{чд} \geq KP_{чд}^{\max} - \Delta KP_{чд}$.

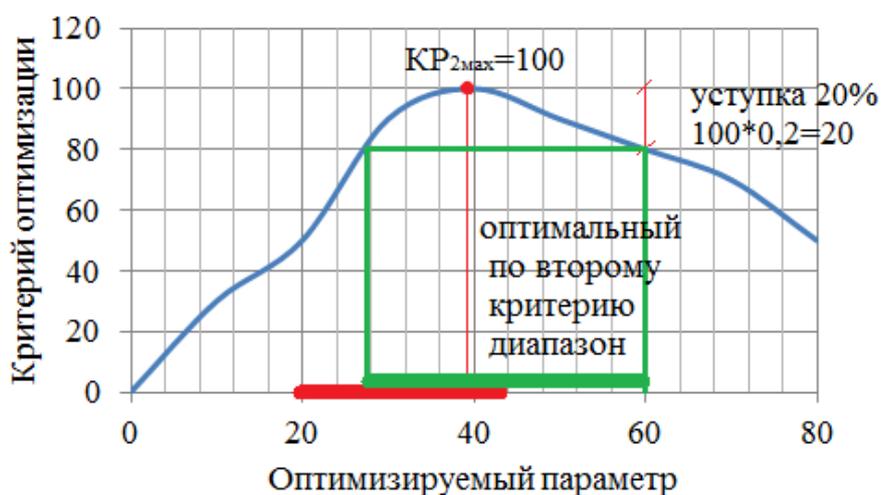


Рисунок 7.3 – Определение приемлемого оптимального диапазона для 2-го критерия при уступке 20 % (оптимальное значение второго критерия попадает в оптимальный диапазон полученный для первого критерия)

Определяется максимум самого важного критерия $KP_{\text{ЭК}}$. При этом соблюдается условие, что значения первых двух критериев не отличались от ранее найденных максимальных значений больше чем на величину соответствующей уступки. Оптимальной считается стратегия, полученная при отыскании максимума последнего критерия ($f_{\text{уст}}$).

Если требования по уступкам не выполняются, то снижается величина максимизируемого критерия.

Таблица 7.4 – Выбор объема водохранилища (V) методом Уступок

Вариант	V , млн м^3	Значения целевых функций		
		$KP_{\text{П}} \rightarrow \text{max}$	$KP_{\text{ЧД}} \rightarrow \text{max}$	$KP_{\text{ЭК}} \rightarrow \text{max}$
i				

7.4. Применение метода «Равной эффективности»

Данный метод основан на выборе компромиссного варианта, для которого эффективности рассматриваемых критериев наилучшим образом соответствуют друг другу:

$$\mathcal{E}\Phi_3 \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{П}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{ЭК}},$$

где \mathcal{E}_i – эффективность i -го критерия, рассчитываемая по выражению:

$$\mathcal{E}\Phi = (KP - KP_{\text{min}})/(KP_{\text{max}} - KP_{\text{min}}) \quad (7.14)$$

где min , max – соответственно, обозначение минимального и максимального значения критерия.

Расчет проводится в табличной форме (таблица 7.5). Принимается вариант решения, в котором значения эффективностей разных критериев $\mathcal{E}\Phi_i$ наилучшим образом соответствуют друг к другу, что равносильно минимальному значению величины:

$$\Delta\mathcal{E}\Phi = |\mathcal{E}\Phi_3 - \mathcal{E}\Phi_{\text{П}}| + |\mathcal{E}\Phi_3 - \mathcal{E}\Phi_{\text{ЭК}}| + |\mathcal{E}\Phi_{\text{П}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{ЭК}}| \rightarrow \text{min} \quad (7.15)$$

Таблица 7.5 – Выбор варианта решения методом «Равной эффективности»

Вар.	V , млн м^3	Расчет эффективности						$\Delta\mathcal{E}\Phi$
		$KP_{\text{ЧД}}$	$\mathcal{E}\Phi_3$	$KP_{\text{П}}$	$\mathcal{E}\Phi_{\text{П}}$	$KP_{\text{ЭК}}$	$\mathcal{E}\Phi_{\text{ЭК}}$	
i								

7.5. Применение метода «Линейной свертки критериев»

Метод «Линейной свертки критериев» позволяет свести многокритериальную задачу оптимизации к однокритериальной. Данный метод применим для равноценных и неравноценных критериев. В последнем случае для свертки используются весовые коэффициенты (μ), учитывающие значимость критериев для принятия решений. Выбирается компромиссный вариант решения, в котором сумма относительных эффективностей максимальна:

для равноценных критериев:

$$\text{ЭФ}_9 + \text{ЭФ}_\Pi + \text{ЭФ}_{\text{ЭК}} \rightarrow \max$$

для неравноценных критериев:

$$\mu_9 \times \text{ЭФ}_9 + \mu_\Pi \times \text{ЭФ}_\Pi + \mu_{\text{ЭК}} \times \text{ЭФ}_{\text{ЭК}} \rightarrow \max$$

$$\mu_i \in [0 \dots 1] \quad \sum \mu_i = 1.$$

Расчет проводится в табличной форме (таблица 7.6).

Таблица 7.6 – Выбор варианта решения методом «Линейной свертки критериев»

Вар.	V, млн м ³	Расчет эффективности			
		ЭФ ₉	ЭФ _Π	ЭФ _{ЭК}	ΣЭФ _J
1					
...					
i					
...					
10					

По данным таблицы 7.6 строится зависимость $\Sigma \text{ЭФ}_J = f(V)$, которая позволяет определить оптимальное значение полезного объема водохранилища.

7.6. Применение метода Фуллера

Данный метод реализуется путем простого попарного перебора вариантов решений по всем критериям оптимизации, поочередно. Перебор вариантов позволяет выявить предпочтения одних вариантов по сравнению с другими, т. е. улучшение критерия. Лучшим ва-

риантом является тот, для которого по всем критериям сумма предпочтений окажется самой высокой.

Значения критериев можно использовать те, которые рассчитывались в методе Домбровского ($KP_{чд}$, $KP_{п}$, $KP_{эк}$). Последовательность расчетов.

1. Выбирается первый критерий оптимизации ($KP_{чд}$).

2. По всем вариантам (0...10), сравнивается его каждое значение со всеми другими (в примере таблицы 7.7 это значение 40) поочередно со всеми другими значениями критерия (13, 28, 50,..., 248, 305) и выявляется количество случаев (предпочтений N), когда значение первого варианта (40) выше сравниваемого (варианты 2, 3 – т. е. количество предпочтений равно 2). Результат записывается в соответствующую ячейку колонки предпочтений критериев.

3. Далее проводится сравнение значения второго варианта первого критерия (13) со всеми другими (40, 28, 50,... 248, 305). Выявляется количество предпочтений, когда значение второго варианта выше сравниваемых (таких вариантов нет, количество предпочтений равно 0). Результат записывается в соответствующую ячейку колонки предпочтений по критериям.

4. Перебор проводится далее аналогичным образом, пока не будут определены все предпочтения по первому критерию. После чего определяется подсчет предпочтений по другим критериям.

5. По всем вариантам определяется сумма предпочтений ($\sum N$) по всем критериям. Выбирается тот вариант, для которого будет получено наибольшее количество предпочтений (в примере таблицы 7.7 это вариант № 7, с количеством предпочтений равным 4).

В случае, если одинаковая сумма предпочтений окажется для нескольких вариантов, то компромиссный вариант выбирается экспертно.

Таблица 7.7 – Пример определения предпочтительного варианта методом Фуллера

Вариант	Критерии			Предпочтения по критериям			Сумма предпочтений
	$KP_{чд}$	$KP_{п}$	$KP_{эк}$	Ф1	Ф2	Ф3	
1	40	72	65	2	1	0	3
2	13	136	80	0	2	1	3
3	28	191	95	1	4	2	7
4	50	234	110	3	6	3	12

Продолжение таблицы 7.7

5	77	240	125	4	7	4	15
6	111	272	140	5	9	5	19
7	151	261	155	6	8	6	20
8	196	225	170	7	5	7	19
9	248	163	185	8	3	8	19
10	305	72	200	9	1	9	19

7.7. Метод циклограмм

В работе метод циклограмм используется для выбора окончательного варианта величины полезного объема из тех значений, которые получены при использовании выше описанных методов многокритериальной оптимизации: метод Домбровского (f), равнозначных критериев; уступок ($f_{уст}$), равной эффективности ($\Delta ЭФ$), свертки критериев ($\Sigma ЭФ$) и метод Фуллера (ΣN).

В методе циклограмм выбор компромиссного варианта определяется на основе поиска экстремума функционала, который представляет собой объем графической области S , с границами равными значениям критериев (рисунок 7.4). В работе функционал можно определять по упрощенной формуле:

$$S = \Sigma N \times \Delta Э + \Sigma N \times f_{уст} + \Sigma Э \times f$$

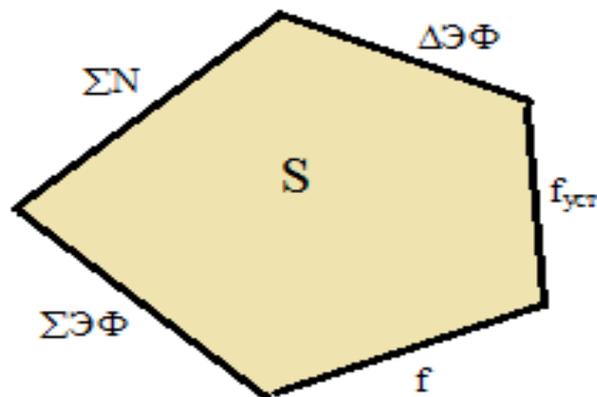


Рисунок 7.4 – Иллюстрация определения функционала (S) в методе циклограмм

Реализация метода циклограмм делается в табличном виде (таблица 7.8)

Таблица 7.8 – Выбор окончательного варианта величины полезного объема водохранилища $V_{плз}^{opt}$ методом циклограмм

Вар.	V, млн м ³	Методы					S
		Домбровского	Уступок	Равной эффективности	Свертки	Фуллера	

Окончательный вариант принимается тот, которому соответствуют наибольшее значение S .

В работе величина полезного объема определяется методом однокритериальной оптимизации и многокритериальной оптимизации. В выводах дается объяснение причин отличия полученных результатов.

ВЫВОДЫ

Выводы делаются по полученным в работе результатам.

1. Указывается объем водных ресурсов, в том числе речного стока для года 75 % и суммарного ресурса воды (вся приходная часть водохозяйственного баланса).
2. Принятая величина полезного объема водохранилища.
3. Оптимальные объемы воды на орошение и ГЭС.

ГЛАВА 3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Введение

Объектом исследований является планируемый для создания ирригационно-энергетический водохозяйственный комплекс, на участке бассейна реки Тим в пределах Курской области. Решаемые вопросы:

- определение оптимального полезного объема водохранилища;
- водораспределение между ГЭС и орошением, на основе оптимизационных расчетов.

Основанием выполнения работы, являются законодательные акты:

- «Водный кодекс российской федерации» от 03.06.2006 № 74-ФЗ [«Собрание законодательства РФ», 05.06.2006, № 23, ст. 2381];
- «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года», утв. распоряжением Правительства РФ от 27 августа 2009 г. № 1235-р.

В настоящее время, в бассейне реки Тим вода используется целей:

- коммунально-бытового хозяйства городов (КБХ);
- сельскохозяйственного водоснабжения;
- промышленности.

Планируется развитие:

- орошения;
- гидроэнергетики.

Источниками воды служат:

- река Тим, вода которой используется для целей промышленности, развития орошения и энергетики;
- подземные воды, гидравлически не связанные с рекой (межпластовые горизонты), используются для КБХ;
- подземные воды, гидравлически связанные с рекой (грунтовые воды), используются для сельскохозяйственного водоснабжения.

I. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Схема бассейна река Тим представлена на рисунке I.1.

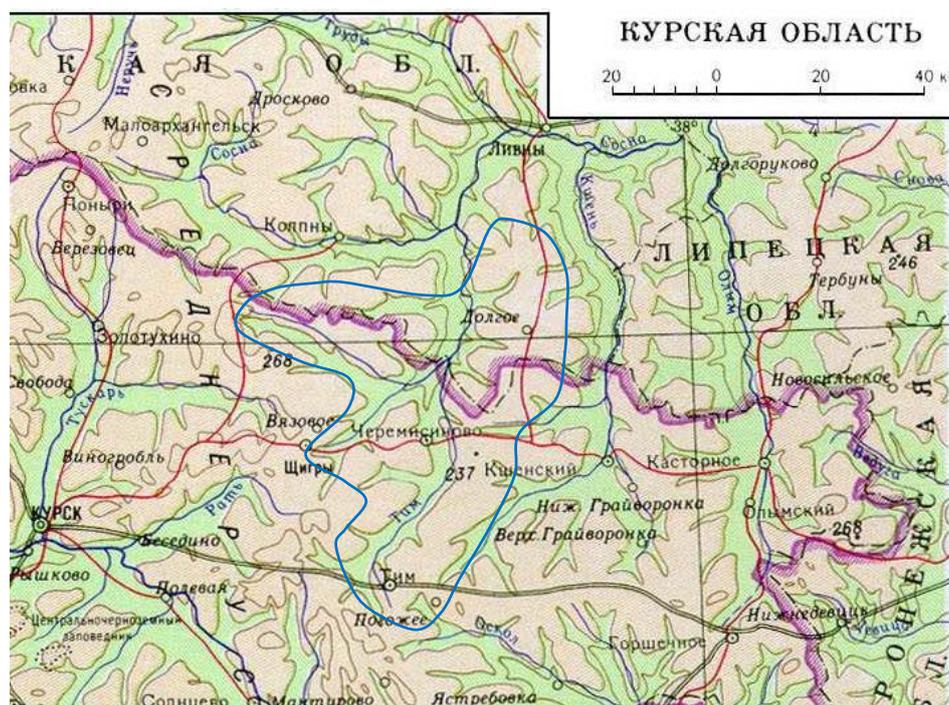


Рисунок I.1 – Схема бассейна реки Тим Курской области

Площадь водосбора реки составляет $F = 2460 \text{ км}^2$, длина реки $L = 120 \text{ км}$, норма стока $W_p = 310 \text{ млн м}^3$.

Таблица I.1 – Гидрологические характеристики бассейна и стока реки Тим

$L, \text{ км}$	$F, \text{ км}^2$	$g, \text{ л/с} \times \text{ км}^2$	$Q_p, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	C_s	Площадь угодий, %	
						$f_{\text{л}}$	$f_{\text{паш}}$
120	2460	4	9,83	0,4	0,8	7	76

Норма стока W_p и среднееголетний расход воды Q_p в реке рассчитаны по формуле:

$$Q_p = g \times F / 1000 = 4 \times 2460 / 1000 = 9,83 \text{ м}^3 / \text{с} W_p =$$

$$= Q_p \times t = 9,83 \times 31,54 = 310 \text{ млн м}^3$$

где $\tau = 31,54$ млн сек. в году.

Кривая обеспеченности позволяет определить объем стока в годы заданной расчетной обеспеченности (рис. I.2). Внутригодовое распределение стока представляется в виде таблицы I.2, в которой указываются объемы стока для лет 75 и 95 % обеспеченности (эти данные будут использованы для водно-балансовых расчетов).

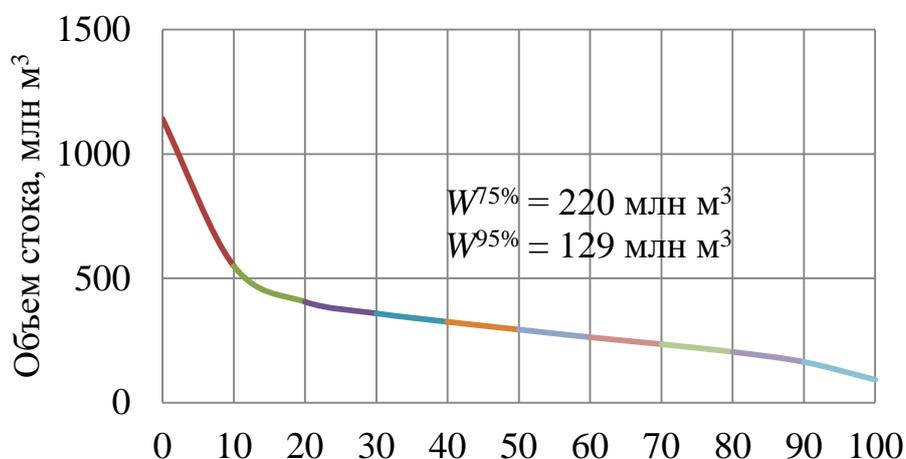


Рисунок I.2 – Кривая обеспеченности годового стока реки Тим в устьевом створе

Таблица I.2 – Внутригодовое распределение объемов стока воды в годы 75 и 95 % обеспеченности, млн м³

P, %	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
75	4,84	3,08	3,74	11,67	125	39	8,36	5,50	3,96	3,30	5,28	6,16	220
95	2,44	1,67	1,93	6,95	75	24	4,50	2,96	2,06	1,80	2,83	3,22	129

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА

Экологический сток рек – часть естественного стока, позволяющая сохранить состояние устойчивого равновесия водной экосистемы. Его значение определяется индивидуально для каждой конкретной реки. Экологический сток должен удовлетворять сле-

дующим условиям:

- обеспечение достаточного для водной биоты объема воды, как объема жизненного пространства;
- изменяться по годам и внутри года (как это наблюдается в естественных условиях);
- обеспечивать сохранение параметров водного потока в пределах диапазона их оптимальных значений (глубина, скорость течения воды, площадь мелководий, площадь заливных земель и продолжительность их затопления и др.).

Расчет величины экологического стока проводится методом «Пропорциональных коэффициентов». В год расчетной обеспеченности (P) величина экологически допустимого стока (за год и по месяцам) определяется как доля от природного речного стока в год данной обеспеченности ($W_p^{P\%}$):

$$W_p^{\text{эк}} = K_{\text{эк}} \times W_p^{P\%},$$

где $K_{\text{эк}}$ – эмпирический коэффициент принимаемый в зависимости от водности года в пределах (0,9...0,7):

Обеспеченность, P %	$K_{\text{эк}}$
≤ 75	0,7
≥ 95	0,9

Результаты определения объемов экологически допустимого стока представляются в табличном виде (табл. II.1).

Таблица II.1 – Внутригодовое распределение объемов экологически допустимого стока воды в устьевом створе, млн м³

$P, \%$	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
75	3,39	2,16	2,62	8,17	87	28	5,85	3,85	2,77	2,31	3,70	4,31	154
95	2,20	1,51	1,74	6,25	67	21	4,05	2,66	1,85	1,62	2,55	2,89	116

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Воднобалансовые расчеты проводятся в соответствии с документом «Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов». Министерство природных ресурсов РФ от 2007-11-30 № 314.

В состав участников ВХК, рассматриваемого объекта, входят водопотребители и водопользователи. В современный период вода используется для целей:

- питьевого водоснабжения:
 - городское коммунально-бытовое хозяйство (КБХ);
 - сельское коммунально-бытовое хозяйство и животноводство (сельскохозяйственное водоснабжение);
- промышленность;
- орошение.

Водопользование осуществляется для целей охраны природы (экологический сток) и гидроэнергетики.

III.1 Объемы водопотребления и водоотведения

III.1.1 Объемы водопотребления

КБХ. Годовой объем водопотребления в коммунально-бытовом хозяйстве (КБХ) определяется в зависимости от численности населения ($N_{\text{КБХ}} = 200$ тыс. чел.), нормы водопотребления (количество воды приходящееся на одного человека в сутки ($g_{\text{КБХ}} = 200$ л/сут×чел.)), расчетного периода времени ($\tau = 365$ сут) и коэффициентом полезного действия ($\eta_{\text{КБХ}} = 0,95$) системы водоснабжения:

$$W_{\text{КБХ}} = N_{\text{КБХ}} \times g_{\text{КБХ}} \times 365 / (10^6 \times \eta_{\text{КБХ}}), \text{ млн м}^3$$

$$W_{\text{КБХ}} = 200 \times 200 \times 365 / (10^6 \times 0,95) = 15 \text{ млн м}^3$$

Сельскохозяйственное водоснабжение. Водопотребление для целей сельскохозяйственного водоснабжения определяется как доля от объема водопотребления в КБХ (табл. III.1):

$$W_{\text{с/х}} = 10 \times 15 / 19 = 8 \text{ млн м}^3$$

Сельскохозяйственное водоснабжение включает потребление воды для целей сельского коммунального хозяйства ($W_{\text{скбх}}$) – 40 % и животноводства ($W_{\text{ж}}$) – 60 %:

$$W_{\text{скбх}} = 40 \times 8 / 100 = 3,2 \text{ млн м}^3 \quad W_{\text{ж}} = 8 - 3,2 = 4,8 \text{ млн м}^3$$

Промышленность. Годовой объем водопотребления промышленностью определяется как доля от объема водопотребления в КБХ:

$$W_{\text{пром}} = 63 \times 15 / 19 = 50 \text{ млн м}^3.$$

Таблица III.1 – Объемы водопотребления из поверхностных и подземных источников в областях России. /http://www.orelgiet.ru/1_11_10zimi.pdf/

Область	Забрано из подземных источников, %	Водопотребление участниками ВХК, %		
		КБХ	Промыш.	С/х водоснабж.
Курская	46	19	63	10

III.1.2 Объемы водоотведения

Объемы водоотведения сточных вод в реку (объемы возвратных вод) определяются в зависимости от коэффициента возвратных вод ($K_{\text{ВВ}}$) и объемов водопотребления:

$$W_{\text{ВВ}i} = K_{\text{ВВ}i} \times W_i, \text{ МЛН М}^3$$

Таблица III.2 – Значения коэффициентов возвратных вод

Водопотребители	W , МЛН М ³	$K_{\text{ВВ}i}$	$W_{\text{ВВ}}$, МЛН М ³
КБХ	15	0,7	10,5
Промышленность	50	0,8	40
С/х водоснабжение, в т. ч.	8	0,5	4
– сельское КБХ	3,2	0,5	1,6
– животноводство	4,8	0,5	2,4
Итого	73		54,5

III.2 Объемы водопользования

Водопользователями на объекте являются: ГЭС и охрана природы. Интересы охраны природы представлены объемами экологического стока. Выработка электроэнергии на ГЭС планируется на основе использования объемов фактического стока реки.

IV. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТОЧНЫХ ВОД

Сточные воды, сбрасываемые водопотребителями в водные объекты, загрязнены, поэтому необходимо учитывать их влияние на качество речной воды. Для этого предлагается использовать показа-

тель «предельной загрязненности» воды. Данная величина может быть выражена в виде:

- безразмерного коэффициента предельной загрязненности ($K_{пз}$);
- объема предельной загрязненности ($W_{пз}$), который выражается в размерности объемов воды.

Физический смысл коэффициента предельной загрязненности – осредненная кратность превышения нормативов качества воды.

Объем предельной загрязненности определяется по формуле:

$$W_{пз i} = K_{пз i} \times W_{вв i}, \text{ млн м}^3$$

где $K_{пз i}$ – коэффициент предельной загрязненности i -го водопотребителя, показывающего осредненную кратность сверхнормативного загрязнения сточных вод.

Таблица IV.1 – Показатели загрязненности сточных вод, млн м³

Источник загрязнения	Показатели загрязненности сточных вод	
	$K_{пз}$	$W_{пз}$
КБХ	10	105
Промышленность	10	400
Сельское КБХ	7	11
Животноводство	20	48
Итого	–	564

V. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС

Анализ использования водных ресурсов на современном этапе проводится на основе составления отчетного водохозяйственного баланса (ВХБ) в целом за год и по месяцам. Воднобалансовые расчеты выполняются в соответствии с [Методика составления водохозяйственных балансов водных объектов. Министерство природных ресурсов РФ от 2007-11-30 № 314]. Уравнение ВХБ для i -го месяца записывается в виде:

$$МВХБ_i = w_{рi} + w_{подi} + \sum w_{ввi} - \sum w_i - \alpha \times w_{подi} - w_{попi},$$

где $w_{рi}$ – объем речного стока в i -й месяц; α – коэффициент гидравлической связи подземных и поверхностных вод; $w_{подi}$ – объем водозабора из подземных вод в i -й месяц; $\sum w_{ввi}$ – суммы объемов возвратных вод в i -й месяц; $\sum w_i$ – сум-

ма объемов водопотребления в i -й месяц; $w_{\text{поп}}i$ – объем попусков в i -й месяц; $\alpha \times w_{\text{под}i}$ – ущерб речному стоку от водозабора из подземных водоносных горизонтов гидравлически связанных с рекой в i -й месяц.

Ущерб речному стоку от водозабора из подземных водоносных горизонтов определяется с учетом коэффициентов гидравлической связи конкретного горизонта. В работе, сельскохозяйственное водоснабжение осуществляется из водоносного горизонта, гидравлически связанного с рекой (α). В этом случае величина ущерба для стока реки за счет изъятия подземных вод, в i -й месяц, составит:

$$\alpha \times w_{\text{под}i} = \alpha \times W_{\text{с/х}} / 12, \text{ млн м}^3$$

Водозабор из подземных горизонтов в i -й месяц определяется как сумма объемов водопотребления для целей питьевого водоснабжения:

$$w_{\text{под}i} = (W_{\text{с/х}} + W_{\text{КБХ}}) / 12, \text{ млн м}^3$$

Объемы попусков, в уравнении ВХБ, учитывают интересы охраны водных объектов:

$$W_{\text{поп}i} = W_{\text{экол}i}$$

Воднобалансовые расчеты представлены в таблице V.1. Дефицитов воды нет, резерв воды составляет $R = 68$ млн м³. Его планируется использовать для орошения и получать дополнительное количество энергии на ГЭС.

**Таблица V.1 – Водохозяйственный баланс для года обеспеченностью
P = 75 %, в месячных интервалах времени, млн м³**

Составляющие баланса	Интервал времени												год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Объем стока реки, w_{jr}	4,84	3,08	3,74	11,67	125	39	8,36	5,5	3,96	3,3	5,28	6,16	220
Забор подземных вод, $w_{п.в.}$	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	23
Объем возвратных вод, $\Sigma W_{ввj}$	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	54,5
Итого приход	11,30	9,54	10,20	18,13	131,46	45,46	14,82	11,96	10,42	9,76	11,74	12,62	297,5
Ущерб речному стоку W_y	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2,4
Водопотребление, Σw_j , в том числе:	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	73
– КБХ	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	15
– промышленность	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	50
– с/х водоснабжение	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	8
Комплексный попуск $W_{поп}$	3,39	2,16	2,62	8,17	87,50	27,30	5,85	3,85	2,77	2,31	3,70	4,31	154
Итого расход	9,67	8,44	8,90	14,45	93,78	33,58	12,14	10,13	9,06	8,59	9,98	10,60	229,4
Баланс ВХБ	1,63	1,10	1,30	3,68	37,68	11,88	2,68	1,83	1,36	1,17	1,76	2,01	68
Фактический сток $W_{фак}$	5,02	3,26	3,92	11,85	125,18	39,18	8,54	5,68	4,14	3,48	5,46	6,34	222,1

VI. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ

VI.1 Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища

Оптимизация полезного объема водохранилища, для целей орошения и гидроэнергетики, проводится в пределах объемов имеющегося ресурса воды $V_{\text{плз}} \subset [0 \dots 68]$ млн м³. Целевая функция представляет собой зависимость суммарного чистого дохода ЧД_{Σ} , получаемого от реализации продукции, получаемой при создании водохранилища, от его объемов (V):

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = f(V) \text{ при ограничении } V \leq V_{\text{max}}$$

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = D_{\Sigma} - Z_{\Sigma}$$

$$D_{\Sigma} = D_{\text{ор}} + D_{\text{гэс}} \quad Z_{\Sigma} = Z_{\text{стр}} + Z_{\text{ущ}}$$

где D_{Σ} – суммарный доход от использования водных ресурсов для целей орошения ($D_{\text{ор}}$) и энергетики ($D_{\text{гэс}}$); V – объем водохранилища; Z_{Σ} – суммарные затраты на создание водохозяйственного комплекса (ВХК); $Z_{\text{стр}}$ – затраты на строительство гидроузла, оросительной системы и гидроэлектростанции (ГЭС); $Z_{\text{ущ}}$ – затраты на компенсацию ущерба объектам экономики и окружающей среде.

$$D_{\text{ор}} = y_{\text{ор}} \times A_1 \times W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / M,$$

где $y_{\text{ор}}$ – удельный доход от реализации продукции полученной на орошаемых землях, принимается равным $y_{\text{ор}} = 250\,000$ р./га; $W_{\text{ор}}$ – объем воды подаваемый для орошения; $\eta_{\text{ор}}$ – к.п.д. оросительной системы ($\eta_{\text{ор}} = 0,85$); A_1 – коэффициент, учитывающий снижение дохода при увеличении орошаемой площади (в учебной работе задается зависимостью $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\text{max}})$); $M = 2350$ м³/га – оросительная норма средневзвешенная для Курской области.

$$D_{\text{гэс}} = c_{\text{гэс}} \times W_{\text{гэс}} \times H \times 1000/432,$$

где $c_{\text{гэс}}$ – удельный доход от ГЭС, принимается равным 3 руб./кВт·ч; $W_{\text{гэс}}$ – объем воды подаваемый на ГЭС: $W_{\text{гэс}} = V_{\text{max}} - W_{\text{ор}}$; H – напор на ГЭС; 432 – коэффициент учитывающий условия работы ГЭС; 1000 – коэффициент, учитывающий увеличение дохода от платы промышленных предприятий за подаваемую мощность.

$$H = \text{ВБ} - \text{НБ} \quad \text{ВБ} = f(V_{\text{пол}}) \quad \text{НБ} = f(Q);$$

$$V_{\text{пол}} = V_{\text{мо}} + VQ = (W_{\text{гэс}} + W_{\text{эк}})/31,54,$$

где ВБ – отметка уровня воды в верхнем бьефе определяется по зависимости H

$= 2,58 \times \ln(V) + 2,15$, м для ($V > 10$ млн м^3 , если $H = 0,0$ м то $V = 0,0$ млн м^3); НБ – отметка уровня воды в нижнем бьефе определяется по зависимости $\text{НБ} = 1,4 \times \ln(Q) + 0,68$ (при $Q > 2 \text{ м}^3/\text{с}$, НБ = $0,0$ м при $Q = 0,0 \text{ м}^3/\text{с}$); $V_{\text{пол}}$ – полный объем воды в водохранилище равный сумме мертвого $V_{\text{мо}}$ и полезного V объемов (мертвый объем водохранилища, в учебной работе, принимается при отметке верхнего бьефа 10м); Q – расход воды пропускаемый через турбины ГЭС.

$$Z_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}}$$

где A_2 – коэффициент, учитывающий увеличение удельных затрат при увеличении объема водохранилища (V), задается выражением $A_2 = 0,5 \cdot (V/V_{\text{max}})^2 + 0,5(V/V_{\text{max}})$; $y_{\text{стр}}$ – удельные затраты на строительство гидроузла, принимается $y_{\text{стр}} = 100 \text{ руб./м}^3$.

$$Z_{\text{ущ}} = A_2 \times F \times y_{\text{ущ}}$$

где $y_{\text{ущ}}$ – удельный ущерб от создания водохранилища, руб./м^2 , принимается равной 120 руб./м^2 .

Площадь водохранилища определяется как отношение полного объема водохранилища ($V_{\text{пол}}$) к средней глубине ($h_{\text{ср}}$):

$$F = V_{\text{пол}}/h_{\text{ср}} \quad h_{\text{ср}} \approx H_{\text{max}}/2$$

Максимальная глубина воды в водохранилище принимается равной отметке верхнего бьефа $H_{\text{max}} = \text{ВБ}$ м.

VI.2 Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением

Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением осуществляется с помощью целевой функции, которая задается в виде зависимости суммарного чистого дохода при реализации продукции, получаемой на орошаемых землях и ГЭС, от используемых ими объемов воды.

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ЧД} = f(W) \rightarrow \max \quad \Sigma \text{ЧД} &= \text{ЧД}_{\text{ор}} + \text{ЧД}_{\text{ГЭС}}; \\ \text{ЧД}_{\text{ор}} &= D_{\text{ор}} - Z_{\text{ор}} \quad \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} = D_{\text{ГЭС}} - Z_{\text{ГЭС}} \quad V_{\text{плз}} = W_{\text{ор}} + W_{\text{ГЭС}}, \end{aligned}$$

где $\Sigma \text{ЧД}$ – суммарный чистый доход от использования водных ресурсов для орошения и ГЭС; $\text{ЧД}_{\text{ор}}$ – чистый доход от орошения; $\text{ЧД}_{\text{ГЭС}}$ – чистый доход от ГЭС; $D_{\text{ор}}$, $Z_{\text{ор}}$ – соответственно доход получаемый от орошения и затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы; $D_{\text{ГЭС}}$, $Z_{\text{ГЭС}}$ – соответственно, доход от продажи электроэнергии получаемой на ГЭС и затраты на строительство и эксплуатацию ГЭС.

Доход получаемый от орошения и ГЭС определяется по зависимостям приведенным в разделе VI.1.

Затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы определяются в зависимости от стоимости воды подаваемой на орошение ($z_{уд\text{ ор}} = 30$ руб./м³) и ее объемов (V , га).

$$Z_{ор} = z_{уд\text{ ор}} \times V_{ор} \times A_2, \text{ млн руб.}$$

Затраты на строительство и эксплуатацию гидроэлектростанции определяется в зависимости от объемов подаваемой на ГЭС воды ($V_{гэс} = V_{плз} - V_{ор}$) и удельных затрат $z_{уд,гэс} = 25$ руб./м³.

$$Z_{гэс} = A_3 \times z_{уд,гэс} \times V_{гэс}, \text{ млн руб.,}$$

где A_3 – коэффициент, учитывающий увеличение удельных затрат при увеличении объемов вырабатываемой энергии: $A_3 = 1 - A_2$.

Все оптимизационные расчеты проводятся в табличной форме (табл. VI.1, VI.2), в которой имеющийся ресурс воды делится на i вариантов минимум на 5 вариантов ($V_i = 0 \dots 68$ млн м³, $i = 1 \dots 5$). Для каждого i -го варианта делается оптимизация водораспределения объемов воды (V_i) между ГЭС и орошением. Для этого каждый объем (V_i) делится на j вариантов ($V_{ij} = 0 \dots V_i$, $j = 1 \dots 10$).

VI.3 Система ограничений

Выработка управляющего решения учитывает ряд ограничений, например:

- ограничение на объем располагаемого ресурса $V_{плз} \leq 68$ млн м³;
- ограничение на объем вырабатываемой энергии $\mathcal{E}_{гэс} \geq \mathcal{E}_{мин.потр}$;
- ограничение на площадь орошения $F_{ор} \geq F_{мин}$.

Мощность ГЭС, по условию работы, должна быть более 1 МВт, что соответствует VI классу гидротехнического сооружения (СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения). Данной мощности соответствует выработка энергии в объеме $\mathcal{E}_{мин} = 2$ т. МВт·ч.

В работе, минимальная площадь орошения ограничивается оросительной способностью реки, которая определяется для товарной части устойчивого стока. Устойчивый сток определяется как минимальный месячный объем стока за темный период года в год 95

% обеспеченности ($w_{\min}^{75\%}$) умноженный на продолжительность поливного периода $T_{\Pi} = 5$ месяцев (с 5...9 мес.). Величина товарной части устойчивого стока W_{yc}^T рассчитывается как разница величины устойчивого стока (за теплый период года табл. VI.2.) минус объем экологического стока.

$$W_{\text{yc}}^T = w_{\min}^{95\%} \times T_{\Pi} \times 0,1 = 2,06 \times 5 \times 0,1 = 1,03 \text{ млн м}^3$$

где 0,1 – коэффициент, учитывающий товарную часть стока в год 95 % обеспеченности (т.к. объем экологического стока определяется как $W_{\text{эк}} = 0,9 \times W_{\text{р}}$).

$$F_{\text{мин}} = W_{\text{yc}}^T \times h_{\text{ор}} / M = 1,03 \times 0,85 \times 10^6 / 2350 = 373 \text{ га}$$

Максимальная площадь ограничивается долей орошаемых культур в составе севооборота принимается

$$F_{\text{мах}} = 5 \% \text{ от } F_{\text{бас}} = 0,05 \times 2460 \times 100 = 12\,300 \text{ га}$$

Таблица 6.1 – Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением, по вариантам полезного объема водохранилища

Вар.	V_1 , млн м ³	A_1	A_2	$Z_{ор}$, млн р.	$ЧД_{ор}$, млн р.	$W_{гэс}$, млн м ³	$V_{пол. i}$, млн м ³	$ВБ$, м	$W_{гэс+W_{эк}}$, млн м ³	Q , м ³ /с	$НБ$, м	$Н$, м	$D_{гэс}$, млн р.	$Z_{гэс}$, млн р.	$ЧД_{гэс}$, млн р.	$\Sigma ЧД$, млн р.
Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{пвз} = 14$ млн м ³																
0	0	1,00	0	0	0	14	34	11,22	168	5,31	3,02	8,20	465	340	125	125
1	1	0,98	0,055	4	116	12	32	11,11	166	5,27	3,01	8,10	413	289	124	240
2	3	0,96	0,12	20	217	11	31	11,00	165	5,23	3,00	8,00	363	239	123	340
3	4	0,94	0,195	48	300	10	30	10,88	164	5,18	2,98	7,90	313	192	122	421
4	5	0,92	0,28	91	363	8	28	10,76	162	5,14	2,97	7,79	265	147	118	481
5	7	0,90	0,375	153	403	7	27	10,63	161	5,10	2,96	7,67	217	106	111	515
6	8	0,89	0,48	235	419	5	25	10,50	159	5,06	2,95	7,55	171	71	100	520
7	10	0,87	0,595	340	409	4	24	10,36	158	5,01	2,94	7,42	126	41	85	493
8	11	0,85	0,72	470	368	3	23	10,21	157	4,97	2,92	7,28	83	19	64	432
9	14	0,82	1	816	191	0	20	9,88	154	4,88	2,90	6,98	0	0	0	191
Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{пвз} = 27$ млн м ³																
0	0	1,00	0	0	0	27	47	12,08	181	5,74	3,13	8,96	1008	675	333	333
1	3	0,98	0,055	9	230	24	44	11,93	178	5,65	3,11	8,83	894	574	320	550
2	5	0,96	0,12	39	430	22	42	11,77	176	5,57	3,08	8,68	782	475	306	737
3	8	0,94	0,195	95	595	19	39	11,60	173	5,48	3,06	8,53	672	380	292	887
4	11	0,92	0,28	181	720	16	36	11,41	170	5,40	3,04	8,37	565	292	273	993
5	14	0,90	0,375	304	801	14	34	11,21	168	5,31	3,02	8,19	461	211	250	1051
6	16	0,89	0,48	467	833	11	31	10,99	165	5,23	2,99	8,00	360	140	220	1052
7	19	0,87	0,595	675	811	8	28	10,76	162	5,14	2,97	7,78	263	82	181	992
8	22	0,85	0,72	933	731	5	25	10,50	159	5,05	2,95	7,55	170	38	132	863
9	27	0,82	1	1620	379	0	20	9,88	154	4,88	2,90	6,98	0	0	0	379
Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{пвз} = 41$ млн м ³																
0	0	1,00	0	0	0	41	61	12,76	195	6,18	3,23	9,53	1627	1025	602	602
1	4	0,98	0,055	14	350	37	57	12,58	191	6,05	3,20	9,38	1442	872	570	920
2	8	0,96	0,12	59	653	33	53	12,38	187	5,92	3,17	9,21	1259	722	538	1191
3	12	0,94	0,195	144	904	29	49	12,18	183	5,79	3,14	9,04	1081	578	503	1406

Продолжение таблицы 6.1

4	16	0,92	1369	0,28	276	1093	25	45	11,95	179	5,66	3,11	8,84	906	443	463	1557
5	21	0,90	1677	0,375	461	1216	21	41	11,70	175	5,53	3,07	8,62	737	320	416	1632
6	25	0,89	1973	0,48	708	1264	16	36	11,42	170	5,40	3,04	8,38	573	213	360	1624
7	29	0,87	2256	0,595	1025	1232	12	32	11,12	166	5,27	3,01	8,11	416	125	291	1523
8	33	0,85	2527	0,72	1417	1110	8	28	10,77	162	5,14	2,97	7,79	266	57	209	1319
9	41	0,82	3035	1	2460	575	0	20	9,88	154	4,88	2,90	6,98	0	0	0	575

Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{\text{поз}} = 54$ млн м^3

0	0	1,00	0	0	0	0	54	74	13,25	208	6,59	3,32	9,93	2235	1350	885	885
1	5	0,98	479	0,055	18	461	49	69	13,06	203	6,42	3,28	9,78	1979	1148	831	1292
2	11	0,96	938	0,12	78	861	43	63	12,85	197	6,25	3,25	9,60	1728	950	778	1638
3	16	0,94	1380	0,195	190	1190	38	58	12,62	192	6,08	3,21	9,41	1482	761	721	1911
4	22	0,92	1803	0,28	363	1440	32	52	12,36	186	5,91	3,17	9,20	1242	583	658	2098
5	27	0,90	2209	0,375	608	1602	27	47	12,08	181	5,74	3,13	8,96	1008	422	586	2187
6	32	0,89	2598	0,48	933	1665	22	42	11,77	176	5,57	3,08	8,68	782	281	501	2166
7	38	0,87	2972	0,595	1349	1622	16	36	11,41	170	5,40	3,04	8,37	565	164	401	2023
8	43	0,85	3329	0,72	1866	1463	11	31	10,99	165	5,23	2,99	8,00	360	76	284	1747
9	54	0,82	3998	1	3240	758	0	20	9,88	154	4,88	2,90	6,98	0	0	0	758

Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{\text{поз}} = 68$ млн м^3

0	0	1,00	0	0	0	0	68	88	13,70	222	7,04	3,41	10,29	2915	1700	1215	1215
1	7	0,98	603	0,055	22	580	61	81	13,49	215	6,82	3,37	10,13	2582	1446	1136	1716
2	14	0,96	1182	0,12	98	1084	54	74	13,27	208	6,61	3,32	9,94	2254	1197	1057	2141
3	20	0,94	1737	0,195	239	1499	48	68	13,02	202	6,39	3,28	9,74	1933	958	975	2473
4	27	0,92	2270	0,28	457	1814	41	61	12,75	195	6,18	3,23	9,52	1618	734	884	2697
5	34	0,90	2782	0,375	765	2017	34	54	12,44	188	5,96	3,18	9,26	1312	531	781	2798
6	41	0,89	3272	0,48	1175	2097	27	47	12,09	181	5,75	3,13	8,97	1016	354	663	2760
7	48	0,87	3742	0,595	1699	2043	20	40	11,69	174	5,53	3,07	8,62	733	207	526	2569
8	54	0,85	4192	0,72	2350	1842	14	34	11,22	168	5,31	3,02	8,20	465	95	369	2211
9	68	0,82	5034	1	4080	954	0	20	9,88	154	4,88	2,90	6,98	0	0	0	954

Примечание. $V_{\text{пол.г}} = V_i + V_{\text{мо}}$, где $V_{\text{мо}}$ – мертвый объем водохранилища (принимается равным 20 млн м^3).

$W_{\text{гэс}} = V_{\text{макс}} - V_i$ – объем воды отдаваемый на ГЭС из полезной емкости водохранилища.

Таблица 6.2 – Оптимизация полезного объема водохранилища

Вар.	V_{opt} , млн $м^3$	$D_{ор}$, млн руб	$D_{гэс}$, млн руб	ΣD , млн руб	A_2	$Z_{стр}$, млн руб.	$V_{пол. i}$, млн $м^3$	ВБ, м	$h_{ср}$, м	$F_{вод. 2}$, $км^2$	$У_{ущ}$, руб./ $м^2$	ΣZ , млн руб.	$\Sigma ЧД$, млн руб
6	8	654	171	825	0,15	116	25	10,50	5,25	1,52	27	143	682
6	16	1299	360	1659	0,35	554	31	11,01	5,50	2,91	121	674	985
5	21	1677	737	2414	0,50	1049	36	11,40	5,70	3,69	221	1270	1144
5	27	2209	1008	3217	0,71	1923	42	11,79	5,90	4,58	391	2315	902
5	34	2782	1312	4094	1,00	3400	54	12,44	6,22	5,47	656	4056	38

По результатам расчетов строятся графики рис. VI.1 и VI.2 по которым определяется оптимальный объем полезной емкости водохранилища и распределение его объемов между орошением и ГЭС.

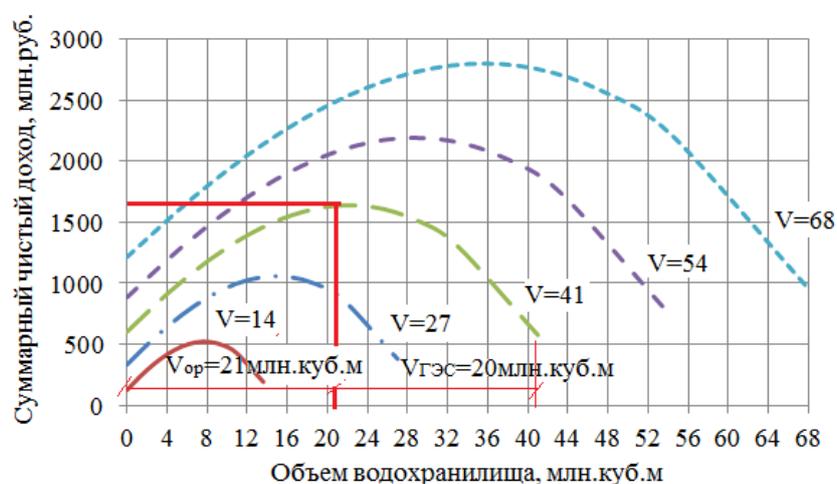


Рисунок VI.1 – Зависимость суммарного чистого дохода от создания водохранилища от объемов полезной емкости

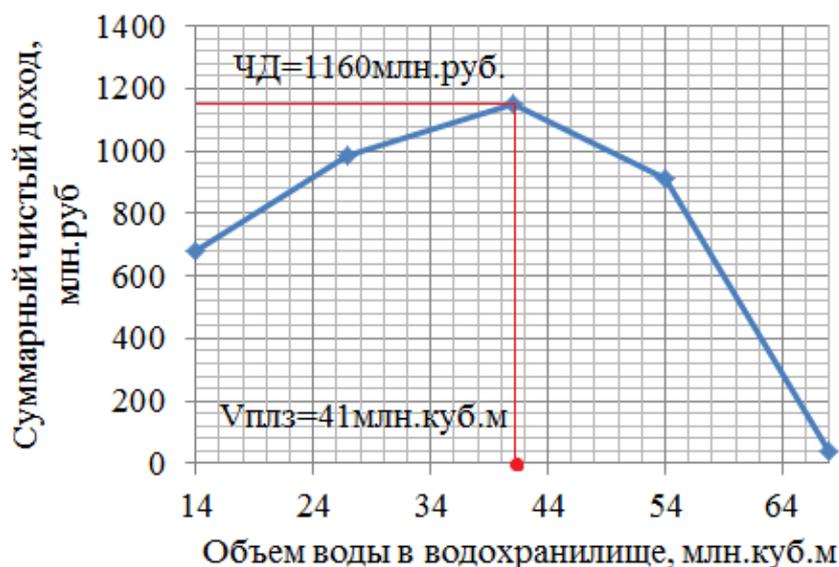


Рисунок VI.2 – Зависимость суммарного чистого дохода от создания водохранилища от объемов полезной емкости (по оси абсцисс откладываются оптимизируемые объемы полезной емкости водохранилища)

Оптимальный объем водохранилища $V_{\text{плз}} = 41$ млн м^3 , данному объему соответствует оптимальное водораспределение между орошением и ГЭС, соответственно: 21 и 20 млн м^3 .

Полученный объем воды для орошения позволяет оросить площадь:

$F_{\text{ор}} = 21 \times 0,85 \times 10^6 / 2350 = 7590$ га, что больше $F_{\text{мин}} = 373$ га и меньше $F_{\text{мак}} = 12\ 300$ га. Требования ограничений на площадь орошения удовлетворяются.

Оптимальный объем воды для ГЭС $V_{\text{ГЭС}}^{\text{opt}} = 20$ млн м^3 совместно с объемом попусков (154 млн м^3) позволяет вырабатывать объем электроэнергии:

$\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} = 174 \times 8,62 / 432 = 3,47$ т. МВт·ч, что больше минимального объема выработки электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{мин.}} = 2$ т. МВт·ч (где 8,62 м напор воды на ГЭС по оптимальному варианту распределения см. таблица 6.1).

Окончательно принимается полезный объем водохранилища $V_{\text{плз}} = 41$ млн м^3 , объем воды для орошения $W_{\text{ор}} = 21$ млн м^3 и $W_{\text{ГЭС}} = 20$ млн м^3 .

VII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Многокритериальная оптимизация проводится с учетом распределения воды между ГЭС и орошением. В целях сокращения расчетов, принимается найденное по однокритериальной оптимизации распределение полезного объема водохранилища (см. гл. VI): $W_{\text{ор}} = 21$ млн м^3 и $W_{\text{ГЭС}} = 20$ млн м^3 . Таким образом принимается, что на долю орошения приходится $(W_{\text{ор}} \times 100 \%) / 41 = 51$ % полезного объема $V_{\text{плз}} = 41$ млн м^3 , при этом доля ГЭС составит: $(W_{\text{ГЭС}} \times 100 \%) / 41 = 49$ %. Полезный объем водохранилища определяется с учетом критериев:

1) экономический: максимизация суммарного чистого дохода от создания водохранилища: $\text{ЧД}_{\Sigma} \rightarrow \text{мак}$;

2) экологический: минимизация показателя качества воды: $K_{\text{пз}} \rightarrow \text{мин}$ или максимизация величины $1 - K_{\text{пз}} \rightarrow \text{мак}$;

3) производственные: максимизация объемов вырабатываемой энергии $\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} \rightarrow \text{мак}$ и площади орошения $F_{\text{ор}} \rightarrow \text{мак}$.

Накладываемые ограничения:

а. ограничение на минимальный объем вырабатываемой энергии на ГЭС: $\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} \geq \mathcal{E}_{\text{мин}}$;

б. ограничение на минимальную площадь орошения: $F_{\text{ор}} \geq 373$ га;

с. ограничение на качество воды в водохранилище, которое должно соответствовать классу не хуже «умеренно загрязненного»: $K_{\text{пз}} \leq 1$.

Значения экономического критерия $\mathcal{CД}_{\Sigma}$ рассчитываются аналогично тому, как это сделано в разделе VI.1:

$\mathcal{CД}_{\Sigma} \rightarrow \max$ при ограничении $V \leq 68$ млн м³

$$D_{\text{ор}} = y_{\text{ор}} \times A_1 \times W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / M \quad D_{\text{ГЭС}} = c_{\text{ГЭС}} \times W_{\text{ГЭС}} \times H \times 200 / 432$$

$$Z_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}} \quad Z_{\text{ущ}} = A_2 \times F \times y_{\text{ущ}},$$

где $c_{\text{ГЭС}} = 3$ руб./кВт·ч; $A_2 = 0,5(V/V_{\text{макс}})^2 + 0,5 \cdot (V/V_{\text{макс}})$; $y_{\text{стр}} = 100$ руб./м³; $y_{\text{ущ}} = 120$ руб./м², $y_{\text{ор}} = 250\,000$ руб./га; $\eta_{\text{ор}} = 0,85$; $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\text{макс}})$; $M = 2350$ м³/Га; (значение 200 – коэффициент учитывающий увеличение дохода от ГЭС за счет стоимости мощности электроэнергии)

Экологический критерий учитывает качество воды в водохранилище, которое формируется за счет стоков с орошаемых земель и затопление земель.

Оценка качества воды в водохранилище делается с помощью формулы Фолленвайдера, приведенной к виду зависимости коэффициента предельной загрязненности ($K_{\text{пз}}$) от: нагрузки на водохранилище ($\Sigma W_{\text{пз}}$), его объема (V) и коэффициента седиментации ($\sigma = 0,5$), полного объема ($V + V_{\text{мо}}$) и объема попуска ($W_{\text{поп}} = W_{\text{эк}}^{95\%} = 116$ млн м³ табл. II.1).

$$K_{\text{пз}} = \frac{W_{\text{пз ор}}}{\left(\sigma + \frac{Vi}{W_{\text{поп}}} \right) (V_i + V_{\text{мо}})},$$

$$W_{\text{пз ор}} = W_{\text{р}}^{95\%} \times F_{\text{ор}} \times K_{\text{пз}}^{\text{ор}} / F_{\text{бас}},$$

где $K_{\text{пз}}^{\text{ор}} = 10$.

Площадь затопления определяется по формуле:

$$F_{\text{зат}} = V_{\text{пол}} / h_{\text{ср}},$$

Оба экологических критериев $K_{\text{пз}} \rightarrow \min$ и $F_{\text{зат}} \rightarrow \min$ минимизируются и могут быть объединены в один путем их нормирования:

$$KР_{\text{эк}} = [(KР_{\text{пз}}/KР_{\text{пз макс}}) + (KР_{\text{зат}}/KР_{\text{зат макс}})]/2$$

Таблица УП.1 – Формирование экономического критерия

Вар.	V_{opt} , млн.м ³	A_1	$D_{ор}$, млн руб	$V_{пол}$, млн м ³	ВБ, м	Q , м ³ /с	НБ, м	H , м	$D_{гэс}$, млн руб.	A_2	$Z_{стр}$, млн руб.	$F_{заг.}$, км ²	$Z_{уш}$, млн руб.	$\Sigma ЧД$, млн руб.
0	0	1,00	0	20	9,88	5,52	3,07	6,81	0	0,00	0	4,05	0	0
1	7	0,98	301	26,8	10,63	5,73	3,12	7,51	106	0,06	37	5,04	33	337
2	14	0,96	591	33,6	11,22	5,95	3,18	8,04	228	0,12	163	5,99	86	569
3	20	0,94	869	40,4	11,69	6,16	3,23	8,47	360	0,20	398	6,91	162	669
4	27	0,92	1135	47,2	12,09	6,38	3,27	8,82	500	0,28	762	7,81	262	611
5	34	0,90	1391	54	12,44	6,59	3,32	9,12	646	0,38	1275	8,68	391	371
6	41	0,89	1636	60,8	12,75	6,81	3,37	9,38	797	0,48	1958	9,54	549	-74
7	48	0,87	1871	67,6	13,02	7,03	3,41	9,61	953	0,60	2832	10,38	741	-749
8	54	0,85	2096	74,4	13,27	7,24	3,45	9,82	1113	0,72	3917	11,21	969	-1677
9	68	0,82	2517	88	13,70	7,67	3,53	10,17	1441	1,00	6800	12,85	1541	-4384

**Таблица VII.2 – Годовой водохозяйственный баланс для обеспеченности
P = 95 %, млн м³**

Составляющие баланса	Год
Объем стока реки, W_p	129
Водозабор подземных вод, $W_{пв}$	23
Объем возвратных вод, $\sum W_{вв}$	54,5
Всего приход	206,5
Ущерб речному стоку $W_{ущ}$	2,4
Водопотребление, $\sum W$, всего:	73
в том числе:	
КБХ	15
промышленность	50
с/х водоснабжение	8
Комплексный попуск $W_{поп}$	116
Итого расход	192
Баланс ВХБ	15
Фактический сток $W_{фак}$	131

Таблица VII.3 – Формирование экологического критерия

Вар.	V , млн м ³	$F_{ор}$, км ²	$W_{пз\text{ }ор}$, млн м ³	$K_{пз}$	ВБ, м	$F_{зат}$, км ²	$KP_{эк}$
0	0	0,00	0	0,00	9,88	4,05	0,16
1	7	12,30	6	0,43	10,63	5,04	0,52
2	14	24,60	13	0,62	11,22	5,99	0,69
3	20	36,89	19	0,71	11,69	6,91	0,79
4	27	49,19	26	0,74	12,09	7,81	0,86
5	34	61,49	32	0,75	12,44	8,68	0,90
6	41	73,79	39	0,75	12,75	9,54	0,93
7	48	86,09	45	0,73	13,02	10,38	0,95
8	54	98,38	52	0,72	13,27	11,21	0,97
9	68	122,98	64	0,67	13,70	12,85	1,00

Производственный критерий:

орошение $F_{ор} = (V \times 21 / 41) \times \eta_{ор} \times 10^6 / M$, га

энергетика $\mathcal{E}_{гэс} = (V \times 20 / 41) \times H / 432$, т МВт·ч

$KP = F_{ор} / F_{ор\text{ }max} + \mathcal{E}_{гэс} / \mathcal{E}_{гэс\text{ }max}$

Таблица VII.4 – Формирование производственного критерия

Вар.	V , млн м ³	$F_{ор}$, га	$V_{пол}$, млн м ³	ВБ, м	НБ, м	H , м	Э, т.МВт·ч	КР
0	0	0	20	11,67	2,05	9,62	0,00	0,00
1	6,8	12	26,8	12,07	2,11	9,96	0,08	0,19
2	13,6	25	33,6	12,42	2,18	10,24	0,16	0,38
3	20,4	37	40,4	12,73	2,24	10,49	0,25	0,57
4	27,2	49	47,2	13,01	2,30	10,70	0,34	0,77
5	34	61	54	13,25	2,36	10,90	0,43	0,97
6	40,8	74	60,8	13,48	2,41	11,07	0,52	1,17
7	47,6	86	67,6	13,69	2,47	11,22	0,62	1,38
8	54,4	98	74,4	13,88	2,52	11,37	0,72	1,58
9	68	123	88	14,23	2,61	11,62	0,91	2,00

VII.1 Применение метода Домбровского для определения параметров водохранилища

Данный метод заключается в поиске максимума функции (f), которая определяется как сумма относительных значений критериев (K_i/K_{max}). Для этого используемые критерии нормируются по их максимальному значению. Учитывая, что критерий качества воды, фактически, должен быть минимизирован, его использование в данном методе требует нормирования с изменением значения на обратное.

Экономический критерий: $K_э = D_{\Sigma}/D_{\Sigma max}$;

Производственный: $K_{п} = (K_{гэс} + K_{ор})/2$;

$K_{гэс} = Э_{гэс}/Э_{гэс max}$ и $K_{ор} = F_{ор}/F_{ор max}$;

Экологический: $K_{эж} = 1 - (K_{пз}/K_{пз max})$.

Равноценные критерии – ни одному из критериев не отдается предпочтений.

$$f \rightarrow \max(f) = K_э + K_{п} + K_{эж}$$

Таблица VII.2 – Выбор объема водохранилища (V) методом Домбровского для равнозначных критериев

Вариант	V , млн м ³	Нормированные значения целевых функций			f
		$K_э$	$K_{п}$	$K_{эж}$	
0	0	0,00	0,00	0,84	0,84
1	6,8	0,50	0,09	0,48	1,08
2	13,6	0,85	0,19	0,31	1,34
3	20,4	1,00	0,29	0,21	1,49

Продолжение таблицы VII.2

4	27,2	0,91	0,38	0,14	1,44
5	34	0,56	0,48	0,10	1,14
6	40,8	-0,11	0,59	0,07	0,55
7	47,6	-1,12	0,69	0,05	-0,38
8	54,4	-2,51	0,79	0,03	-1,68
9	68	-6,55	1,00	0,00	-5,55

По данным таблицы VII.2 строится график зависимости обобщенного критерия (f) от объемов водохранилища $f = \Psi(V)$ (рисунок VII.1).

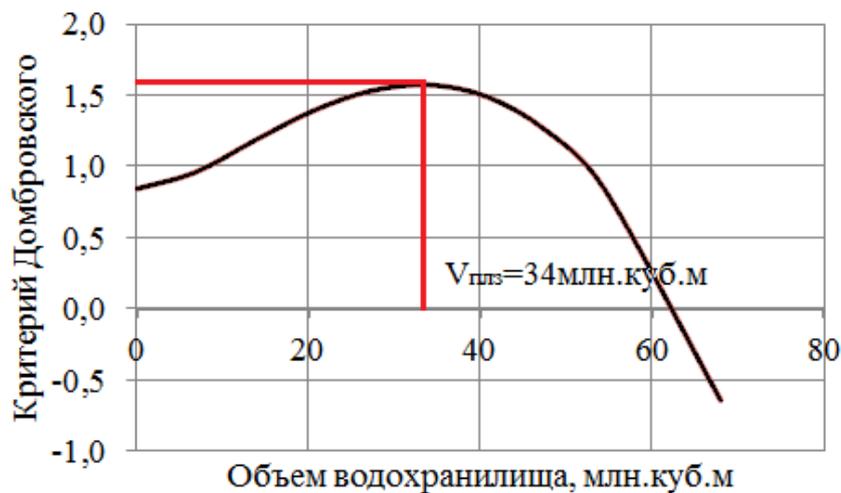


Рисунок VII.1 – Пример зависимости суммарного критерия оптимизации (f) от объема воды в водохранилище (V) для равнозначных критериев

За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение: $V_{плз} = 34$ млн m^3 .

Неравнозначные критерии – учет предпочтений критериев с помощью весовых коэффициентов (μ).

$$f \rightarrow \max(f) = \mu_3 \times K_3 + \mu_{II} \times K_{II} + \mu_{ЭК} \times K_{ЭК}$$

$$\sum \mu_i = 1$$

По данным таблицы VII.3 строится зависимость $f = \Psi(V)$. За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение.

Таблица VII.3 – Выбор объема водохранилища методом Домбровского для неравнозначных критериев

Вариант	V, млн м ³	Нормированные значения целевых функций						f
		K _э	μ _э	K _п	μ _п	K _{эк}	μ _{эк}	
0	0	0,00	0,3	0,00	0,2	0,84	0,5	0,42
1	6,8	0,50		0,09		0,48		
2	13,6	0,85		0,19		0,31		
3	20,4	1,00		0,29		0,21		
4	27,2	0,91		0,38		0,14		
5	34	0,56		0,48		0,10		
6	40,8	-0,11		0,59		0,07		
7	47,6	-1,12		0,69		0,05		
8	54,4	-2,51		0,79		0,03		
9	68	-6,55		1,00		0,00		



Рисунок VII.2 – Пример зависимости суммарного критерия оптимизации (f) от объема воды в водохранилище (V) для неравнозначных критериев

За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение: $V_{\text{плз}} = 22$ млн м³. Приоритетность экологического критерия существенно уменьшило величину полезного объема водохранилища.

VII.2 Применение метода «Уступок»

Для применения метода «Уступок» экономический и производственный критерии сворачиваются в один

$$K_{\text{ЧДП}} = K_{\text{э}} / K_{\text{эмакс}} + K_{\text{п}} / K_{\text{пмакс}}.$$

Метод «Уступок» заключается в том, что все критерии оптимизации ($K_{\text{ЧДП}}$, $K_{\text{эк}}$) располагаются в порядке приоритетности.

Таблица VII.4 – Выбор объема водохранилища (V) методом Уступок

Вариант	V, млн м ³	Значения целевых функций	
		$K_{\text{ЧДП}} \rightarrow \text{макс}$	$K_{\text{эк}} \rightarrow \text{макс}$
0	0	0,00	0,84
1	6,8	0,60	0,48
2	13,6	1,04	0,31
3	20,4	1,29	0,21
4	27,2	1,30	0,14
5	34	1,04	0,10
6	40,8	0,47	0,07
7	47,6	-0,43	0,05
8	54,4	-1,72	0,03
9	68	-5,55	0,00

Первым оптимизируется второй по приоритетности критерий ($K_{\text{эк}}$). Делается его максимизация по искомому параметру: $K_{\text{эк}} \rightarrow \text{макс}$, которому соответствует объем водохранилища $V_{\text{opt}} = 0$ млн м³. Затем назначается величина допустимого снижения максимального значения первого критерия $K_{\text{эк}}^{\text{макс}}$ (уступка $\Delta K_{\text{эк}} = 50\%$), которая допускает его снижение при оптимизации других критериев до величины $K'_{\text{эк}} \geq K_{\text{эк}}^{\text{макс}} - \Delta K_{\text{эк}} = 0,84 - 0,42$.



Рисунок VII.3 – Определение области допустимых значений экологического критерия при 50 % уступке

Максимизируется второй по важности критерий ($K_{\text{чдп}}$) и определяется величина $K_{\text{чдп}}^{\text{max}}$, которой соответствует значение оптимизируемого параметра $V_{2\text{max}} = 21$ млн м³, что не входит в область допустимых значений первого критерия, поэтому следует переопределить уступку первого критерия.

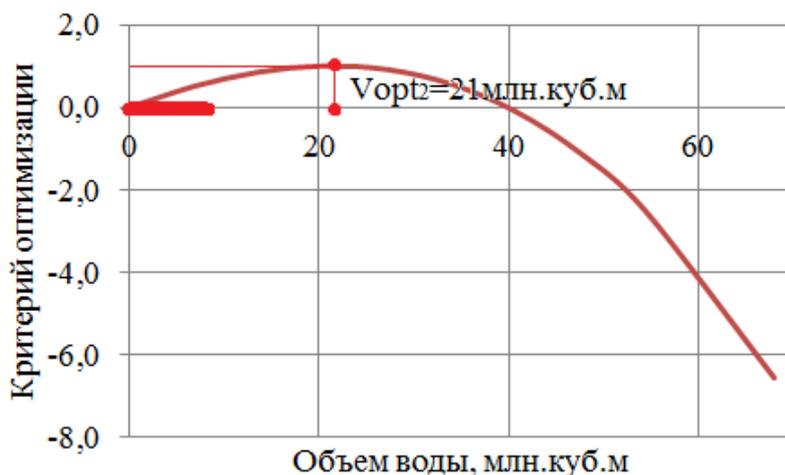


Рисунок VII.4 – Определение оптимального значения полезного объема путем максимизации производственно-экономического критерия

Условие выполняется при уступке по экологическому критерию 76 %. Если это приемлемо, то принимается полезный объем равный $V_{\text{max}} = 21$ млн м³. Если величина уступки не приемлема, то изменяется и значение максимального значения второго критерия.

VII.3 Применение метода «Равной эффективности»

Метод «Равной эффективности» основан на выборе компромиссного варианта, для которого эффективности рассматриваемых критериев наилучшим образом соответствуют друг другу:

$$\text{ЭФ}_{\text{чд}} \approx \text{ЭФ}_{\text{п}} \approx \text{ЭФ}_{\text{эк}},$$

где Э_i – эффективность i -го критерия, рассчитываемая по выражению:

$$\text{ЭФ}_{\text{чд}} = (D_{\Sigma} - D_{\Sigma \text{min}}) / (D_{\Sigma \text{max}} - D_{\Sigma \text{min}}), \quad \text{ЭФ}_{\text{п}} = (\text{Э}_{\text{п}} - \text{Э}_{\text{п min}}) / (\text{Э}_{\text{п max}} - \text{Э}_{\text{п min}}),$$

$$\text{ЭФ}_{\text{эк}} = 1 - (K_{\text{ЭК}} - K_{\text{ЭКmin}}) / (K_{\text{ЭК max}} - K_{\text{ЭКmin}}),$$

где min , max – соответственно, обозначение минимального и максимального значения критерия.

Расчет проводится в табличной форме (табл.VII.5). Принимается вариант решения, в котором кривые $\text{ЭФ}_i = f(V)$ наиболее близко

сходятся друг к другу, что соответствует минимальному значению величины:

$$\Delta \text{ЭФ} = |\text{ЭФ}_{\text{чд}} - \text{ЭФ}_{\text{п}}| + |\text{ЭФ}_{\text{чд}} - \text{ЭФ}_{\text{эк}}| + |\text{ЭФ}_{\text{п}} - \text{ЭФ}_{\text{эк}}| \rightarrow \min$$

Таблица VII.5 – Выбор варианта решения методом «Равной эффективности»

Вар.	V, млн м ³	Расчет эффективности						ΔЭФ
		K _э	ЭФ _э	K _п	ЭФ _п	K _{эк}	ЭФ _{эк}	
0	0	0,00	0,87	0,00	0,00	0,84	1,00	2,00
1	7	0,50	0,93	0,09	0,09	0,48	0,58	1,68
2	14	0,85	0,98	0,19	0,19	0,31	0,36	1,58
3	20	1,00	1,00	0,29	0,29	0,21	0,24	1,51
4	27	0,91	0,99	0,38	0,38	0,14	0,17	1,63
5	34	0,56	0,94	0,48	0,48	0,10	0,12	1,63
6	41	-0,11	0,85	0,59	0,59	0,07	0,09	1,53
7	48	-1,12	0,72	0,69	0,69	0,05	0,06	1,31
8	54	-2,51	0,54	0,79	0,79	0,03	0,04	1,50
9	68	-6,55	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	2,00

В качестве компромиссного принимается вариант ΔЭФ = 1,31, которому соответствует значение полезного объема водохранилища V_{шз} = 48 млн м³.

VII.4 Применение метода «Линейной свертки критериев»

Метод «Линейной свертки критериев» позволяет свести многокритериальную задачу оптимизации к однокритериальной. Данный метод применяется для равноценных критериев. Выбирается компромиссный вариант решения, в котором сумма относительных эффективностей максимальна: ЭФ_{чд} + ЭФ_п + ЭФ_{эк} → max

Расчет проводится в табличной форме (табл.VII.6).

Таблица VII.6 – Выбор варианта решения методом «Линейной свертки критериев»

Вар.	V, млн м ³	Расчет эффективности			
		ЭФ _э	ЭФ _п	ЭФ _{эк}	ΣЭФ _j
0	0	0,87	0,00	1,00	1,87
1	7	0,93	0,09	0,58	1,60
2	14	0,98	0,19	0,36	1,53

Продолжение таблицы VII.6

3	20	1,00	0,29	0,24	1,53
4	27	0,99	0,38	0,17	1,54
5	34	0,94	0,48	0,12	1,55
6	41	0,85	0,59	0,09	1,53
7	48	0,72	0,69	0,06	1,47
8	54	0,54	0,79	0,04	1,37
9	68	0,00	1,00	0,00	1,00

По данным таблицы VII.6 выделяются два максимальных значения суммарного критерия $\Sigma \text{ЭФ}$ равного 1, 87 и 1,55 (рис.VII.5). Первый оптимум отвергается, т.к. соответствует нулевому значению полезного объема, что не приемлемо. Поэтому величина полезного объема принимается равной $V_{\text{плз}} = 34 \text{ млн м}^3$.

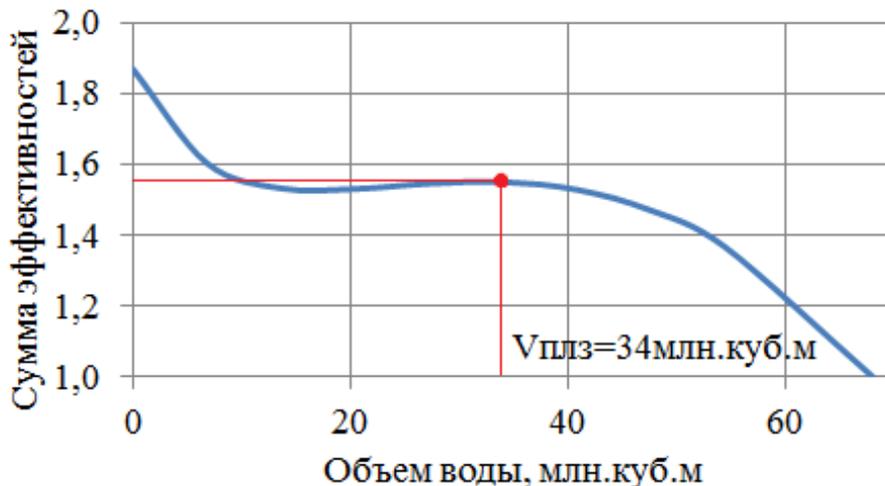


Рисунок VII.5 – Зависимость суммарного критерия от объемов воды в водохранилище

VII.5 Применение метода Фуллера

Данный метод реализуется путем простого попарного перебора вариантов решений по всем критериям оптимизации, поочередно. Перебор вариантов позволяет выявить предпочтения одних вариантов по сравнению с другими, т. е. улучшение критерия. Лучшим вариантом является тот, для которого по всем критериям сумма предпочтений окажется самой высокой.

Значения критериев можно использовать те, которые рассчитывались в методе Домбровского ($K_{\text{зд}}$, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{эк}}$). Последовательность расчетов.

По всем вариантам определяется сумма предпочтений ($\sum N$) по всем критериям. Выбирается тот вариант, для которого будет получено наибольшее количество предпочтений. Значения критериев берутся из таблицы VII.2.

В случае, если одинаковая сумма предпочтений окажется для нескольких вариантов, то компромиссный вариант выбирается экспертно.

Таблица 7.6 – Пример определения предпочтительного варианта методом Фуллера (простой перебор)

Вариант	Критерии			Предпочтения по критериям			Сумма предпочтений
	$K_{\text{чд}}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{эк}}$	$\Phi_{\text{чд}}$	$\Phi_{\text{п}}$	$\Phi_{\text{эк}}$	
0	0,00	0,00	0,84	4	0	9	13
7	0,50	0,09	0,48	5	1	8	14
14	0,85	0,19	0,31	7	2	7	16
20	1,00	0,29	0,21	9	3	6	18
27	0,91	0,38	0,14	8	4	5	17
34	0,56	0,48	0,10	6	5	4	15
41	-0,11	0,59	0,07	3	6	3	12
48	-1,12	0,69	0,05	2	7	2	11
54	-2,51	0,79	0,03	1	8	1	10
68	-6,55	1,00	0,00	0	9	0	9

В качестве компромиссного варианта принимается вариант с наибольшим количеством предпочтений (18), которому соответствует оптимальный объем водохранилища $V_{\text{плз}} = 20 \text{ млн м}^3$

VII.6 Метод циклограмм

Метод циклограмм используется для выбора окончательного варианта величины полезного объема из тех значений которые получены при использовании методов многокритериальной оптимизации: методом Домбровского (f), для равнозначных критериев; равной эффективности ($\Delta \text{ЭФ}$), свертки критериев ($\Sigma \text{ЭФ}$) и методом Фуллера (ΣN).

В методе циклограмм выбор компромиссного варианта определяется на основе поиска экстремума функционала, который представляет собой объем графической области S , с гранями равными

значениям критериев. Функционал определяется по формуле площади треугольника, в котором сумма экономического и экологического критериев являются основанием треугольника, и значение экологического критерия – высота:

$$S = \frac{(\text{Эконом.} + \text{Производ.})}{2} \times \text{Эколог.}$$

Таблица VII.7 – Выбор полезного объема водохранилища ($V_{\text{ПЛЗ}}^{\text{опт}}$) методом циклограмм

V, млн м ³	Методы	Критерии			S
		Эконом.	Производ.	Эколог.	
34	Домбровского	0,56	0,48	0,10	0,05
48	Равной эффективности	-1,12	0,69	0,05	-0,01
34	Свертки	0,94	0,48	0,12	0,09
20	Фуллера	1,00	0,29	0,21	0,14

Окончательно принимается вариант $V_{\text{ПЛЗ}} = 20$ млн м³, которому соответствуют наибольшее значение $S = 0,14$.

ВЫВОДЫ

Выводы делаются по полученным в работе результатам.

1. Указывается объем водных ресурсов, в том числе речного стока для года 75 % и суммарного ресурса воды (вся приходная часть водохозяйственного баланса).

2. Принятая величина полезного объема водохранилища.

3. Оптимальные объемы воды на орошение и ГЭС.

VIII.1 Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-1 ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В БАССЕЙНЕ РЕКИ

Эколого-экономическое обоснование водоохранных мероприятий (ВОМ) проводится на основе формирования нескольких наборов возможных для осуществления мер, позволяющих достичь тре-

буемую эффективность, с учетом экологических показателей, и выбора определенного набора ВОМ с помощью экономических показателей.

Экологические показатели качества воды:

индивидуальные (концентрации загрязняющих веществ, C , мг/л); Концентрации, с учетом водоохранных мероприятий $C^{\text{ВОМ}}$, не должны превышать их нормативных значений ПДК;

$$C^{\text{ВОМ}} \leq \text{ПДК} \text{ или } C^{\text{ВОМ}} = C \times (1 - \mathcal{E}_{\text{ВОМ}}) \leq \text{ПДК}.$$

• комплексные показатели (коэффициент предельной загрязненности, $K_{\text{пз}}$. С учетом водоохранных мероприятий $K_{\text{пз}}^{\text{ВОМ}}$ не должен превышать целевого уровня, соответствующего классу качества естественного фона $K_{\text{пз}}^{\text{ест}} = 1$ «умеренно загрязненный».

$$K_{\text{пз}}^{\text{ВОМ}} = K_{\text{пз}} \times (1 - \mathcal{E}_{\text{ВОМ}}) \leq 1.$$

Экономические показатели представляют затраты на проведение водоохранных мероприятий, которые должны минимизироваться.

$$Z_{\text{ВОМ}} \rightarrow \min$$

Работа выполняется в два этапа, которые включают ряд шагов.

1. Определяется требуемая эффективность ВОМ:

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = \frac{(K_{\text{пз}}^{95\%} - K_{\text{пз}}^{\text{ф}})}{K_{\text{пз}}^{95\%}},$$

где $K_{\text{пз}}^{95\%}$, $K_{\text{пз}}^{\text{ф}}$ – комплексный показатель загрязненности воды, соответственно, для фактических условий (расчетного года) и естественного фона. Вместо фонового уровня может приниматься приемлемый, т. е. возможный для достижения в конкретных условиях поэтапного планирования.

2. Определяется набор требуемых водоохранных мероприятий с помощью модифицированного «Метода взвешенного попарного среднего». В этом случае делается простой перебор мероприятий с определением их совместной эффективности. Алгоритм включает ряд шагов.

3. Составляется матрица эффективности мероприятий (матрица симметричная с нулевой диагональю). Попарная эффективность мероприятий определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ij}^{\text{ВОМ}} = 1 - (1 - \mathcal{E}_i) \times (1 - \mathcal{E}_j),$$

где i, j – номера водоохранных мероприятий в строке и столбце матрицы.

Например, совместная эффективность 1 и 2 мероприятий составит: $1 - (1 - 0,1) \times (1 - 0,2) = 0,28$. Второго и третьего мероприятий: $1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,3) = 0,44$.

Таблица VIII.1 – Первоначальная матрица попарной эффективности водоохранных мероприятий

ВОМ	<i>i</i>	1	2	3	4
<i>j</i>	0*	0,1	0,2	0,3	0,7
1	0,1	0	0,28	0,37	0,73
2	0,2	0,28	0	0,44	0,76
3	0,3	0,37	0,44	0	0,79
4	0,7	0,73	0,76	0,79	0

*Диагональные значения обнуляются.

4. В матрице, по минимальной эффективности, выделяется столбец (*u*) и строка (*v*) (эффективность 0,1). Данные столбец и строка удаляются из матрицы. При этом пересчитываются элементы матрицы ($j \geq 2$) ($i \geq 2$) по формуле:

$$\mathcal{E}_{i,j+1} = 1 - (1 - \mathcal{E}_j) \times (1 - \mathcal{E}_{i,1})$$

В результате матрица сокращается на одну строку и один столбец. Например, для мероприятий 1,2:

$$\mathcal{E}_{(1,2),1} = 1 - (1 - \mathcal{E}_2) \times (1 - \mathcal{E}_{2,1}) = 1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,28) = 0,424.$$

Таблица VIII.2 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (второе приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2	3	4
<i>j</i>	0	0,424	0,559	0,919
1,2	0,424	0	0,44	0,76
3	0,559	0,44	0	0,79
4	0,919	0,76	0,79	0

5. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут объединены все мероприятия.

Таблица VIII.3 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (третье приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2,3	4
<i>j</i>	0	0,75	0,98
1,2,3	0,75	0	0,79
4	0,98	0,79	0

Таблица VIII.4 – Матрица эффективности водоохранных мероприятий (четвертое приближение)

ВОМ	<i>i</i>	1,2,3,4
<i>j</i>	0	0,99
1,2,3,4	0,99	0

Полученные матрицы позволяют каждому классу качества воды поставить набор мероприятий, с помощью которого достигается заданный (в данном примере фоновый) уровень (табл. г). При этом соблюдается условие: эффективность набора мероприятий ($\mathcal{E}^{\text{ВОМ}}$) должна быть не менее требуемой ($\mathcal{E}_{\text{тр}}$): $\mathcal{E}^{\text{ВОМ}} \geq \mathcal{E}_{\text{тр}}$.

По данным предыдущих расчетов получено несколько наборов водоохранных мероприятий, из которых путем проведения оптимизационных расчетов определяется вариант с минимальными затратами. Например, для требуемой эффективности ВОМ $\mathcal{E}_{\text{тр}} = 75\%$, в рассмотренном примере, соответствующие наборы мероприятий: 4+2, 4+3, и 1+2+3.

Определяются затраты для проведения ВОМ по каждому набору. Например, затраты на проведение мероприятий составляют:

Мероприятие	1	2	3	4
Затраты, млн руб.	4,0	2,4	3,1	5,0

Варианты затрат на проведение выбранных наборов мероприятий составляют:

Мероприятие	1+2+3	2+4	3+4
Затраты, млн руб.	9,5	7,4	8,1

Окончательно выбирается вариант с минимальными затратами. Например, вариант с минимальными затратами включает проведение 2 и 4 водоохранного мероприятия.

Варианты заданий

Вариант	Экологическая эффективность мероприятий						Затраты на проведение мероприятий						Требуемая эффективность
	0,40	0,73	0,02	0,01	0,02	1,0	5,0	7,0	6,0	5,0	5,0	0,8	
1	0,40	0,73	0,02	0,01	0,02	1,0	5,0	7,0	6,0	5,0	5,0	0,8	
2	0,28	0,82	0,14	0,20	0,23	4,0	10,0	1,0	8,0	6,0	6,0	0,8	
3	0,74	0,15	0,74	0,71	0,35	9,0	9,0	6,0	2,0	2,0	2,0	0,8	
4	0,57	0,49	0,65	0,68	0,19	7,0	4,0	8,0	7,0	2,0	2,0	0,8	
5	0,79	0,07	0,76	0,15	0,17	2,0	3,0	9,0	4,0	4,0	4,0	0,8	
6	0,81	0,40	0,20	0,69	0,94	7,0	3,0	6,0	10,0	2,0	2,0	0,8	
7	0,97	0,17	0,96	0,07	0,30	5,0	8,0	10,0	4,0	5,0	4,0	0,8	
8	0,13	0,63	0,79	0,85	0,08	1,0	1,0	7,0	6,0	4,0	4,0	0,85	
9	0,30	0,27	0,37	0,38	0,82	9,0	8,0	3,0	1,0	3,0	3,0	0,85	
10	0,55	0,65	0,70	0,15	0,71	2,0	8,0	5,0	9,0	4,0	4,0	0,85	
11	0,17	0,70	0,23	0,96	0,99	4,0	2,0	7,0	6,0	1,0	1,0	0,85	
12	0,15	0,71	0,81	0,42	0,15	4,0	10,0	2,0	10,0	5,0	5,0	0,85	
13	0,09	0,25	0,06	0,65	0,19	2,0	3,0	2,0	10,0	10,0	10,0	0,85	
14	0,69	0,32	0,27	0,35	0,09	5,0	3,0	2,0	3,0	6,0	6,0	0,85	
15	0,78	0,13	0,05	0,83	0,73	7,0	7,0	7,0	4,0	9,0	9,0	0,9	
16	0,71	0,07	0,56	0,19	0,86	10,0	10,0	2,0	9,0	4,0	4,0	0,9	
17	0,03	0,32	0,25	0,78	0,55	4,0	4,0	4,0	8,0	10,0	10,0	0,9	
18	0,53	0,82	0,72	0,20	0,87	5,0	10,0	1,0	2,0	4,0	4,0	0,9	
19	0,05	0,19	0,01	0,98	0,68	6,0	6,0	1,0	7,0	10,0	10,0	0,9	
20	0,32	0,52	0,71	0,46	0,94	3,0	8,0	1,0	8,0	3,0	3,0	0,9	

IX. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-2 ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖДУ ГЭС И ОРОШЕНИЕМ

Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением осуществляется с помощью целевой функции, которая задается в виде зависимости суммарного чистого дохода при реализации продукции, получаемой на орошаемых землях и ГЭС, от используемых ими объемов воды.

$$\Sigma \text{ЧД} = f(W) \rightarrow \max$$

$$\Sigma \text{ЧД} = \text{ЧД}_{\text{ор}} + \text{ЧД}_{\text{ГЭС}}$$

$$\text{ЧД}_{\text{ор}} = D_{\text{ор}} - Z_{\text{ор}} \quad \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} = D_{\text{ГЭС}} - Z_{\text{ГЭС}}$$

$$V_{\text{шпз}} = W_{\text{ор}} + W_{\text{ГЭС}},$$

где $\Sigma \text{ЧД}$ – суммарный чистый доход от использования водных ресурсов для орошения и ГЭС; $\text{ЧД}_{\text{ор}}$ – чистый доход от орошения; $\text{ЧД}_{\text{ГЭС}}$ – чистый доход от ГЭС; $D_{\text{ор}}$, $Z_{\text{ор}}$ – соответственно доход получаемый от орошения и затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы; $D_{\text{ГЭС}}$, $Z_{\text{ГЭС}}$ – соответственно, доход от продажи электроэнергии получаемой на ГЭС и затраты на строительство и эксплуатацию ГЭС.

Затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы определяются в зависимости от стоимости воды подаваемой на орошение ($z_{\text{уд ор}} = 30 \text{ руб./м}^3$) и ее объемов (V , га).

$$Z_{\text{ор}} = z_{\text{уд ор}} \times V_{\text{ор}} \times A_2, \text{ млн руб.}$$

Затраты на строительство и эксплуатацию гидроэлектростанции определяется в зависимости от объемов подаваемой на ГЭС воды ($V_{\text{ГЭС}} = V_{\text{шпз}} - V_{\text{ор}}$) и удельных затрат $z_{\text{уд ГЭС}} = 25 \text{ руб/м}^3$.

$$Z_{\text{ГЭС}} = A_3 \times z_{\text{уд ГЭС}} \times V_{\text{ГЭС}}, \text{ млн руб.,}$$

где A_3 – коэффициент, учитывающий увеличение удельных затрат при увеличении объемов вырабатываемой энергии: $A_3 = 1 - A_2$.

Все оптимизационные расчеты проводятся в табличной форме, в которой имеющийся ресурс воды делится на 5 вариантов ($V_i = 0 \dots V_{\text{max}}, i = 1 \dots 5$).

Выработка управляющего решения учитывает ряд ограничений:

- ограничение на минимальный объем вырабатываемой энергии $E_{\text{ГЭС}} \geq E_{\text{мин.потр}}$;

- ограничение на минимальную площадь орошения $F_{\text{ор}} \geq F_{\text{мин}}$.
- ограничение на максимальную площадь орошения $F_{\text{ор}} \leq F_{\text{макс}}$.
- мощность ГЭС, по условию работы, должна быть не менее 1 МВт, что соответствует VI классу гидротехнического сооружения.

В работе, минимальная и максимальная площади орошения задаются в исходных данных.

Полученные в результате оптимизационных расчетов объемы воды для орошения и ГЭС проверяются на соответствие ограничениям. В случае соблюдения ограничений, полученные объемы принимаются.

Варианты заданий

Вариант	Ресурс воды, млн м ³	Удельный доход от орошения, т руб./га	Оросительная норма, м ³ /га	Мертвый объем водохранилища, млн м ³	Экологический сток, млн м ³	Площадь орошения, т га	
						Максимальная	Минимальная
1	26,7	366	3720	15,0	5,4	123	0,61
2	5,5	262	1340	20,0	29,9	35	3,49
3	22,5	292	1430	11,0	27,6	131	13,40
4	17,0	378	2890	14,0	7,6	76	4,99
5	5,4	341	1620	17,0	30,4	27	2,86
6	18,5	394	1480	19,0	42,1	79	10,62
7	5,1	312	1870	19,0	68,8	27	2,33
8	6,2	339	1690	10,0	70	30	3,11
9	4,8	330	1490	18,0	17,6	24	2,73
10	19,2	256	2050	20,0	45,8	127	7,97
11	13,5	377	2710	10,0	17,1	60	4,23
12	11,0	397	2950	12,0	82,8	47	3,17
13	22,8	340	2270	14,0	9,1	113	8,53
14	8,5	291	1180	15,0	17	49	6,16
15	6,6	268	2380	18,0	41,7	41	2,35
16	1,9	301	2570	19,0	11,9	10	0,64
17	22,9	282	2650	13,0	62,1	138	7,36
18	11,2	319	1360	17,0	55	59	6,99
19	16,1	394	2020	19,0	11,6	69	6,79
20	26,7	366	3720	15,0	5,4	123	0,61

Пример выполнения расчетов по оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением

Исходные данные

Ресурс воды, млн м ³	Удельный доход от орошения, т. руб./га	Оросительная норма, м ³ /га	Мертвый объем водохранилища, млн м ³	Экологический сток, млн м ³	Площадь орошения, т га	
					Максимальная	Минимальная
30	400	3050	20	10	100	1

Таблица IX. 1 – Расчет величины чистого дохода от использования ирригационно-энергетического водохранилища

Объем, млн м ³	A ₁	Д _{ор} , млн руб.	A ₂	Зор, млн руб.	ЧД _{ор} , млн руб.	W _{ГЭС} , млн м ³	V _{полн.i} , млн м ³	ВБ, м	W _{ГЭС+WЭК} , млн м ³	Q, м ³ /с	НБ, м	Н, м	Д _{ГЭС} , млн руб.	Z _{ГЭС} , млн руб.	ЧД _{ГЭС} , млн руб.	ΣЧД, млн руб.
0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30	50	12,24	40	1,27	2,33	9,91	1651,72	1000,00	651,72	651,72
5	0,97	539,10	0,10	14,58	524,52	25	45	11,97	35	1,11	2,15	9,83	1432,88	789,93	642,95	1167,47
10	0,94	1042,86	0,22	66,67	976,19	20	40	11,67	30	0,95	1,93	9,74	1217,17	583,33	633,84	1610,03
15	0,90	1513,01	0,38	168,75	1344,26	15	35	11,32	25	0,79	1,67	9,65	1005,01	390,63	614,39	1958,65
20	0,88	1951,21	0,56	333,33	1617,87	10	30	10,93	20	0,63	1,36	9,56	796,90	222,22	574,68	2192,55
25	0,85	2359,05	0,76	572,92	1786,13	5	25	10,45	15	0,48	0,96	9,50	593,45	88,54	504,91	2291,04
30	0,82	2738,05	1,00	900,00	1838,05	0	20	9,88	10	0,32	0,39	9,49	395,30	0,00	395,30	2233,35

Максимальный чистый доход от использования водохранилища для целей орошения и ГЭС составляет 2291,04 млн руб. Ему соответствует объем воды для орошения $W_{op}^{opt} = 25$ млн m^3 и $W_{гэс}^{opt} = 5$ млн m^3 . Для ГЭС получен оптимальный объем воды, который составляет часть полезного объема водохранилища. Учитывая, что ГЭС использует и объем экологического стока, общий объем воды для ГЭС равен $W_{гэс} = 15$ млн m^3 .

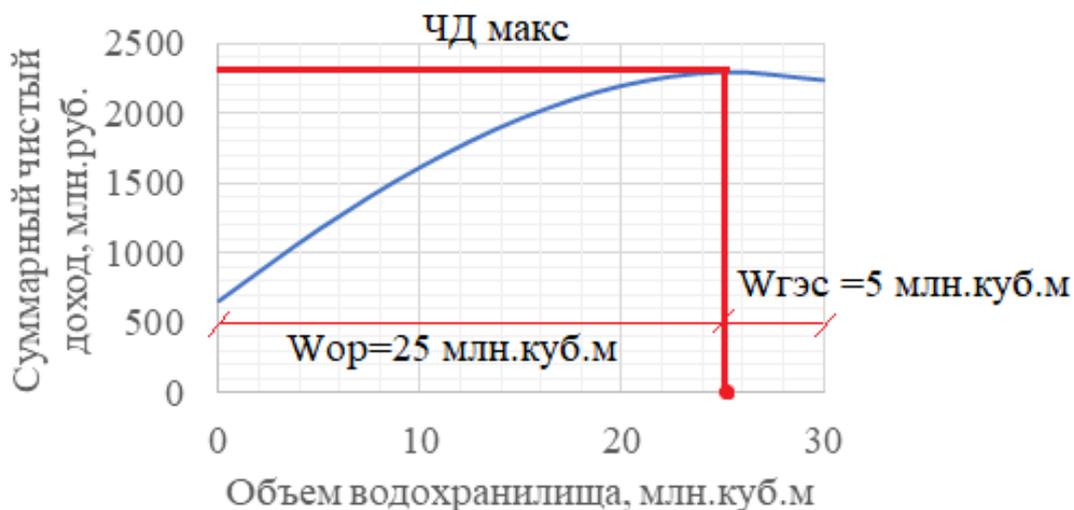


Рисунок IX.1. – Изменение чистого дохода в зависимости от объемов использования воды из водохранилища для целей орошения и гидроэнергетики

Х. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе рассматривается ирригационное водохранилище. Располагаемый ресурс воды ($V_{ресурс}$, млн m^3) обеспечивает оросительную способность F :

$$F = V_{ресурс} \times \eta_{op} \times 1000/M, \text{ т га}$$

где η_{op} – к.п.д. оросительной системы; M – оросительная норма, $m^3/\text{га}$.

Увеличению полезного объема позволяет орошать большую площадь сельскохозяйственных культур и получать больший доход. Однако, при увеличении полезного объема увеличиваются затраты на строительство и эксплуатацию гидроузла. Поэтому, если не зада-

на площадь орошения, а ставится задача – обосновать оптимальную площадь орошения, то вопрос об определении полезного объема водохранилища можно решить с помощью однокритериальной оптимизации.

Полезный объем водохранилища определяется с помощью экономического критерия, который учитывает получение чистого дохода для всего водохозяйственного комплекса (ВХК).

Экономический критерий (максимизация суммарного чистого дохода от создания водохранилища) определяется по формулам:

$$\text{ЧД}_\Sigma = \text{Д}_\Sigma - \text{З}_\Sigma$$

$$\text{Д}_\Sigma = \text{Д}_{\text{ор}} \quad \text{З}_\Sigma = \text{З}_{\text{стр}} + \text{З}_{\text{ор}}$$

$$\text{Д}_{\text{ор}} = y_{\text{ор}} \times A_1 \times W_{\text{ор}} \times \eta_{\text{ор}} / M$$

$$\text{З}_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}} \quad \text{З}_{\text{ор}} = z_{\text{уд ор}} \times V_{\text{ор}} \times A_2$$

где $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\text{ресурс}})$; $A_2 = 0,5(V/V_{\text{ресурс}})^2 + 0,5(V/V_{\text{ресурс}})$;

$$y_{\text{стр}} = 100 \text{ руб./м}^3; \quad z_{\text{уд ор}} = 30 \text{ руб./м}^3;$$

$$y_{\text{ор}} = 280 \dots 420 \text{ т. руб./га}; \quad \eta_{\text{ор}} = 0,85.$$

Система ограничений включает условия РГР-2, которые дополняются ограничениями на величину используемого объема стока реки:

- ограничение величины полезного объема, которая не должна превышать 30 % от нормы стока, т. е. коэффициент зарегулированности стока не должен превышать $\alpha \leq 0,3$;
- минимальный объем водохранилища не должен быть меньше 1...5 млн м³, т.е. должен превышать точность определения объема речного стока, которая при инструментальной съемке составляет 5 %.

Варианты заданий

Вариант	Ресурс воды, млн м ³	Удельный доход от орошения, т. руб./га	Оросительная норма, м ³ /га
1	188	317	1270
2	154	319	2010
3	118	393	1750
4	88	459	1810
5	94	382	2570
6	107	490	1650
7	175	460	2990
8	177	314	2980

Продолжение таблицы

9	83	348	2430
10	93	497	2900
11	23	394	2190
12	94	325	2410
13	23	319	2940
14	52	491	1710
15	30	437	2260
16	68	500	1950
17	42	317	1830
18	114	473	1780
19	156	343	2860
20	109	316	2250

Исходные данные

Ресурс воды, млн м ³	Удельный доход от орошения, руб./га	Оросительная норма, м ³ /га
30	400 000	3100

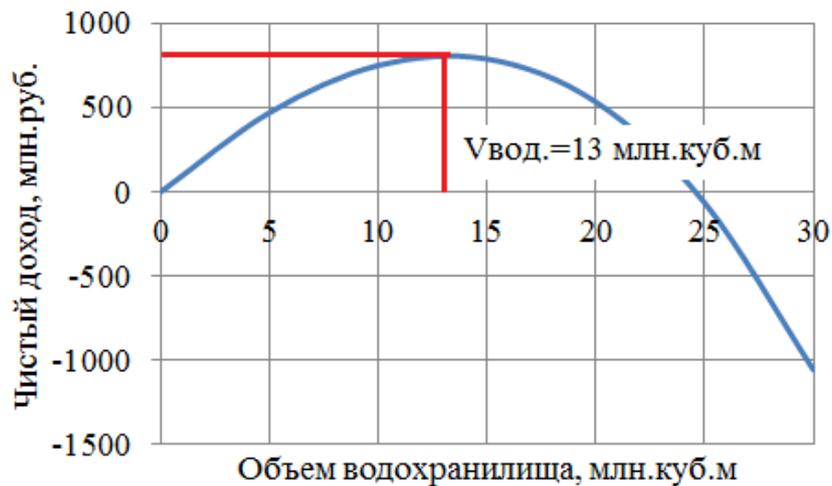


Рисунок X.1 – Зависимость чистого дохода, получаемого при использовании водохранилища для ирригационных, от его полезного объема

Располагая ресурсом воды в 30 млн м³ экономически оптимально создание водохранилища ирригационного назначения с полезным объемом 13 млн м³.

XI. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Многокритериальная оптимизация полезного объема водохранилища проводится для ирригационных целей его использования. Полезный объем водохранилища определяется с учетом критериев:

1) экономический: максимизация суммарного чистого дохода от создания водохранилища: $ЧД_{\Sigma} \rightarrow \max$;

2) экологический: минимизация показателя качества воды: $K_{пз} \rightarrow \min$ или максимизация величины $1 - K_{пз} \rightarrow \max$;

3) производственные: максимизация объема сельскохозяйственной продукции.

$$ЧД_{\Sigma} \rightarrow \max$$

$$D_{op} = y_{op} \times A_1 \times W_{op} \times \eta_{op} / M$$

$$Z_{стр} = A_2 \times V \times y_{стр}$$

$$Z_{ущ} = A_2 \times F \times y_{ущ}$$

$$Z_{op} = Z_{уд\ op} \times V_{op} \times A_2, \text{ млн руб.}$$

$$A_2 = 0,5(V/V_{\max})^2 + 0,5(V/V_{\max});$$

$$A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\max}),$$

где $z_{op} = 30$ руб./га; $y_{стр} = 100$ руб./м³; $y_{op} = 250 \dots 4000$ т. руб./га; $\eta_{op} = 0,85$;

$$M = 600 \dots 3000 \text{ м}^3/\text{га};$$

Экологический критерий учитывает:

- качество воды в водохранилище, которое формируется за счет стоков с орошаемых земель (оценка качества воды в водохранилище делается с помощью формулы Фолленвайдера, приведенной к виду зависимости коэффициента предельной загрязненности ($K_{пз}$));

- затопление плодородных земель (площадь затопления $F_{зат}$).

Оба экологических критериев $K_{пз} \rightarrow \min$ и $F_{зат} \rightarrow \min$ минимизируются и могут быть объединены в один путем их нормирования:

$$KР_{эк} = [(KР_{пз}/KР_{пз\ \max}) + (KР_{зат}/KР_{зат\ \max})] / 2$$

Накладываемые ограничения:

а. ограничение на минимальную площадь орошения: $F_{op} \geq 10$ га;

в. ограничение на качество воды в водохранилище, которое должно соответствовать классу «умеренно загрязненному»: $K_{пз} \leq 1$.

Таблица XI.1 – Формирование экономического критерия

Вар.	V_{opt} , млн M^3	A_1	D_{op} , млн руб	A_2	$Z_{стр}$, млн руб.	Z_{op} , млн руб	Z , млн руб.	$\Sigma ЧД$, млн руб.	$KP_{чд}$
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00
2	5	0,97	411,07	0,10	48,61	14,58	63,19	347,87	0,69
3	10	0,94	795,18	0,22	222,22	66,67	288,89	506,29	1,00
4	15	0,90	1153,67	0,38	562,50	168,75	731,25	422,42	0,83
5	20	0,88	1487,79	0,56	1111,11	333,33	1444,44	43,35	0,09
6	25	0,85	1798,77	0,76	1909,72	572,92	2482,64	-683,87	-1,35
7	30	0,82	2087,76	1,00	3000,00	900,00	3900,00	-1812,24	-3,58

Таблица XI.2 – Формирование экологического критерия

Вар.	V , млн M^3	F_{op} , KM^2	$W_{пз op}$, млн M^3	$K_{пз}$	ВБ, м	$F_{зат}$, KM^2	$KP_{эк}$
1	0	0,00	0	0,00	9,83	6,67	0,20
2	5	1,42	21	1,36	10,40	8,33	0,31
3	10	2,83	85	3,78	10,88	10,00	0,45
4	15	4,25	191	6,24	11,27	11,67	0,61
5	20	5,67	340	8,50	11,62	13,33	0,75
6	25	7,08	531	10,49	11,92	15,00	0,88
7	30	8,50	765	12,24	12,19	16,67	1,00

Производственный критерий:

орошение $F_{op} = (V \times 21 / 41) \times \eta_{op} \times 10^6 / M$, га

энергетика $\Theta_{ГЭС} = (V \times 20 / 41) \times H / 432$, т. МВт·ч

$KP = F_{op} / F_{op \max} + \Theta_{ГЭС} / \Theta_{ГЭС \max}$

Таблица XI.3 – Формирование производственного критерия

Вар.	V , млн M^3	F_{op} , га	$KP_{п}$
1	0	0,00	0,00
2	5	1,42	0,17
3	10	2,83	0,33
4	15	4,25	0,50
5	20	5,67	0,67
6	25	7,08	0,83

Определение полезного объема водохранилища методом Домбровского (равнозначные критерии)

Данный метод заключается в поиске максимума функции (f), которая определяется как сумма относительных значений критериев (K_i/K_{\max}).

Равноценные критерии – ни одному из критериев не отдается предпочтений.

$$f \rightarrow \max(f) = K_3 + K_{\Pi} + K_{\text{ЭК}}$$

Таблица XI.4 – Выбор объема водохранилища (V) методом Домбровского для равнозначных критериев

Вариант	V , млн м ³	Нормированные значения целевых функций			f
		K_3	K_{Π}	$K_{\text{ЭК}}$	
1	0	0,00	0,20	0,00	0,20
2	5	0,69	0,31	0,17	1,16
3	10	1,00	0,45	0,33	1,79
4	15	0,83	0,61	0,50	1,94
5	20	0,09	0,75	0,67	1,50
6	25	-1,35	0,88	0,83	0,36
7	30	-3,58	1,00	1,00	-1,58



Рисунок XI.1 – Зависимость суммарного критерия оптимизации Домбровского от объема воды в водохранилище для равнозначных критериев

За компромиссный принимается вариант, в котором критерий имеет максимальное значение: $V_{\text{ПЛЗ}} = 14$ млн м³.

Определение полезного объема водохранилища методом Домбровского (неравнозначные критерии)

Неравнозначные критерии – учет предпочтений критериев с помощью весовых коэффициентов (μ).

$$f \rightarrow \max(f) = \mu_3 \times K_3 + \mu_{\Pi} \times K_{\Pi} + \mu_{\text{ЭК}} \times K_{\text{ЭК}}$$

$$\sum \mu_i = 1$$

Таблица XI.5 – Выбор объема водохранилища методом Домбровского для неравнозначных критериев

Вариант	V, млн м ³	Нормированные значения целевых функций						f
		K ₃	μ_3	K _Π	μ_{Π}	K _{ЭК}	$\mu_{\text{ЭК}}$	
0	0	0,00	0,3	0,20	0,2	0,00	0,5	0,04
1	5	0,69		0,31		0,17		0,30
2	10	1,00		0,45		0,33		0,49
3	15	0,83		0,61		0,50		0,59
4	20	0,09		0,75		0,67		0,57
5	25	-1,35		0,88		0,83		0,40
6	30	-3,58		1,00		1,00		0,08
7	0	0,00		0,20		0,00		0,04

За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение.

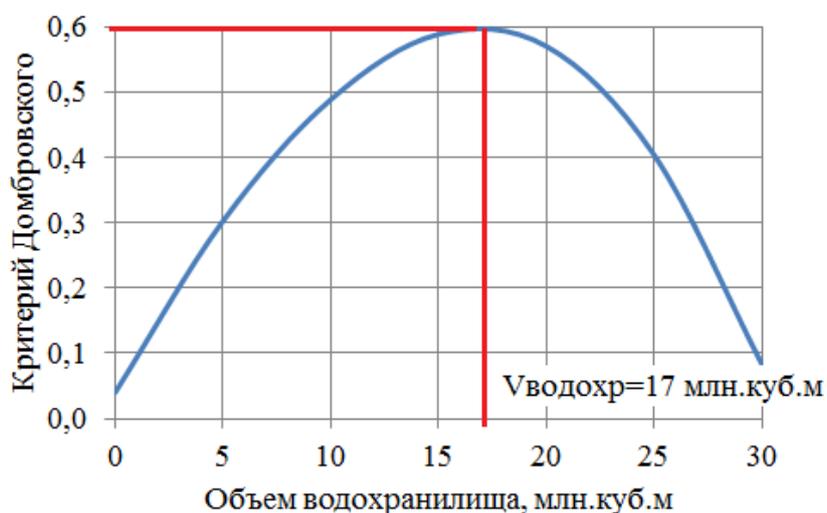


Рисунок XI.2 – Зависимость суммарного критерия оптимизации от объема воды в водохранилище для неравнозначных критериев

В данном случае компромиссный вариант, в котором функция f имеет максимальное значение, соответствует полезному объему $V_{\text{ПВЗ}} = 17$ млн м³. Приоритетность экологического критерия увеличи-

ло величину полезного объема водохранилища. Это связано с тем, что увеличение значимости экологического критерия ослабило влияние экономического, имеющего отрицательные, заведомо экономически не выгодные, варианты.

Определение полезного объема водохранилища методом «Равной эффективности»

Метод «Равной эффективности» основан на выборе компромиссного варианта, для которого эффективности рассматриваемых критериев наилучшим образом соответствуют друг другу:

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{чд}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{п}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{эк}},$$

где \mathcal{E}_i – эффективность i -го критерия, рассчитываемая по выражению:

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{чд}} = (D_{\Sigma} - D_{\Sigma \text{min}}) / (D_{\Sigma \text{max}} - D_{\Sigma \text{min}}),$$

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{п}} = (\mathcal{E}_{\text{п}} - \mathcal{E}_{\text{п min}}) / (\mathcal{E}_{\text{п max}} - \mathcal{E}_{\text{п min}}),$$

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{эк}} = 1 - (K_{\text{эк}} - K_{\text{эк min}}) / (K_{\text{эк max}} - K_{\text{эк min}}),$$

где *min*, *max* – соответственно, обозначение минимального и максимального значения критерия.

Принимается вариант решения, в котором кривые $\mathcal{E}\Phi_i = f(V)$ наиболее близко сходятся друг к другу, что соответствует минимальному значению величины:

$$\Delta\mathcal{E}\Phi = |\mathcal{E}\Phi_{\text{чд}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{п}}| + |\mathcal{E}\Phi_{\text{чд}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{эк}}| + |\mathcal{E}\Phi_{\text{п}} - \mathcal{E}\Phi_{\text{эк}}| \rightarrow \min$$

Таблица XI.6 – Выбор варианта решения методом «Равной эффективности»

Вар.	V, млн м ³	Расчет эффективности						ΔЭФ
		K _э	ЭФ _э	K _п	ЭФ _п	K _{эк}	ЭФ _{эк}	
1	0	0	0,78	0,2	0	0	1	2,00
2	5	0,69	0,98	0,45	1,145	0,17	0,83	0,63
3	10	1	1	0,61	1,8778	0,33	0,67	2,42
4	15	0,83	0,99	0,75	2,519	0,5	0,5	4,04
5	20	0,09	0,94	0,88	3,1144	0,67	0,33	5,57
6	25	-1,35	0,85	1	3,664	0,83	0,17	6,99
7	30	-3,58	0,72	0,69	2,2442	1	0	4,49

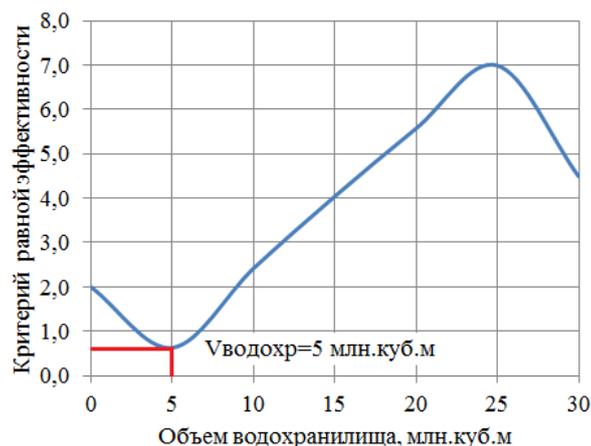


Рисунок XI.3 – Зависимость суммарного критерия метода оптимизации равной эффективности от объема воды в водохранилище

В качестве компромиссного принимается вариант $\Delta \text{ЭФ} = 0,63$, которому соответствует значение полезного объема водохранилища $V_{\text{плз}} = 5$ млн м^3 . Это фактически говорит, что создание водохранилища в данных условиях практически не выгодно.

Варианты заданий

Вар.	$V_{\text{ресурс}},$ млн м^3	Удельная прибыль от орошения, т. руб./ м^3	Оросительная норма, $\text{м}^3/\text{га}$	$K_{\text{плз ор}}$	$F_{\text{бас}},$ км^2	Объем попусков, млн м^3	Мертвый объем, млн м^3
1	68	50	2424	8	1247	186	32
2	64	60	1982	10	1903	72	22
3	48	54	2031	8	1675	171	14
4	88	58	2080	9	2828	81	24
5	30	62	1157	8	2516	135	23
6	72	61	2772	7	2901	94	21
7	77	51	1647	6	1732	101	29
8	99	69	2421	9	1993	46	11
9	70	56	1181	10	1458	51	16
10	39	50	2961	4	1435	122	15
11	66	50	1121	6	1846	47	19
12	86	68	2430	8	1411	157	22
13	88	63	2064	9	2616	66	28
14	91	56	1243	5	2951	51	18
15	75	57	1067	5	1571	154	28
16	79	70	1795	4	2251	67	17
17	69	50	1167	8	1957	128	22
18	66	66	1633	3	2391	86	10
19	36	68	1631	9	2833	154	11
20	53	69	2550	9	2974	141	33
21	72	67	1920	10	1799	61	34

ПРИЛОЖЕНИЕ

**Таблица 1 – Типовое внутригодовое распределение речного стока
для лет разной обеспеченности, %**

Район	P, %	Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Хвойных лесов	50	2,9	2,5	2,3	19,1	35	9	6,2	4,1	2,8	5	6,9	4,2
	75	2,7	2,3	2,1	20,3	37,3	9,6	5,5	3,6	2,4	4,3	6,1	3,8
	95	2,3	2	1,8	21,6	39,8	10,2	4,7	3,1	2,1	3,8	5,3	3,3
Смешанных лесов	50	0,7	1	1,4	57,8	15,9	4,4	4	1,7	1	2,6	6,2	3,3
	75	0,8	1	2,3	62,8	15,4	4,4	3,9	2	1,2	2,6	1,9	1,7
	95	0,7	0,9	2	63,8	15,6	4,4	3,8	1,9	1,1	2,5	1,8	1,5
Лесостепь	50	2,7	1,8	1,6	5,3	58,2	11,2	5,3	1,5	1,9	2,3	5,2	3
	75	2,2	1,4	1,7	5,3	56,7	17,9	3,8	2,5	1,8	1,5	2,4	2,8
	95	1,9	1,3	1,5	5,4	58,1	18,3	3,5	2,3	1,6	1,4	2,2	2,5
Степь	50	2,9	2,4	2,5	3,8	55,8	10,9	4,8	3,7	3,3	3	3,8	3,1
	75	2,7	2,2	2,4	3,8	56,4	11	4,7	3,6	3,3	3	3,8	3,1
	95	2,5	2	2,2	3,9	56,6	11,1	4,7	3,7	3,3	3	3,9	3,1

**Таблица 2 – Значения модульных коэффициентов речного стока
K ($C_s = 2 \times C_v$)**

P, %	Коэффициент изменчивости C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,001	1,49	2,09	2,82	3,68	4,67	5,78	7,03	8,40	9,89	11,50
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,67	1,80	1,94	2,06	2,19	2,30
20	1,08	1,16	1,24	1,31	1,38	1,44	1,50	1,54	1,58	1,61
30	1,05	1,09	1,13	1,16	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20
40	1,02	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	0,89	0,96	0,92
50	0,99	0,98	0,97	0,95	0,92	0,89	0,85	0,80	0,75	0,70
60	0,97	0,94	0,89	0,85	0,80	0,75	0,69	0,63	0,57	0,51
70	0,95	0,89	0,82	0,76	0,69	0,62	0,55	0,49	0,42	0,36
80	0,91	0,83	0,75	0,66	0,57	0,50	0,50	0,42	0,35	0,28
90	0,87	0,75	0,64	0,53	0,44	0,35	0,27	0,21	0,15	0,11
99	0,78	0,59	0,44	0,30	0,21	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Законодательные

1. Водный кодекс российской федерации: принятого ГД РФ 2006.06.03. – № 74–ФЗ / Собрание законодательства РФ, 05.06.2006, № 23, ст. 2381.

2. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года: утв. распоряжением Правительства РФ 2009.08.27. – № 1235-р.

Нормативные

3. Методика составления водохозяйственных балансов водных объектов. Министерство природных ресурсов РФ от 2007-11-30 № 314.

4. Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты: утверждена приказом МПР РФ от 12 декабря 2007 г. N 328.

5. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба: утверждена Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды 09 марта 1999 г.

Учебные

6. Водохозяйственные системы и водопользование: учебник / Под ред. Л. Д. Ратковича и В. Н. Маркин. М. : ИНФРА-М, 2019. С. 452.

7. **Галямина И. Г.** Управление процессами. М. : МГУП, 2011. 446 с.

8. **Галямина И. Г.** Задачи по комплексному использованию водных ресурсов: учебное пособие. М. : МГУП, 2002.

9. **Иванов А. Н., Неговская Т. А.** Гидрология и регулирование стока: учебник. М. : Колос, 1979. С. 384.

10. **Галямина И. Г.** Курс лекций по управлению техногенными комплексами. М. : ФГБОУ ВПО МГУП, 2011. 298 с.

11. **Мумладзе Р. Г.** Управление водохозяйственными системами: учебник / Р. Г. Мумладзе [и др.]. М. : КНОРУС, 2010. 208 с.

Дополнительные

12. **Маркин В. Н., Раткович Л. Д., Соколова С. А.** Обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне реки: учебное пособие. М. : МГУП. 2006. С. 91.

13. **Маркин В. Н., Раткович Л. Д., Федоров С. А.** Разработка мероприятий по комплексному использованию и охране водных

объектов в бассейне реки: Учебное пособие. М. : МГУП, 2011. 102 с.

14. **Раткович Л. Д., Маркин В. Н., Глазунова И. В.** Вопросы рационального использования водных ресурсов и проектного обоснования водохозяйственных систем: монография. М. : МГУП, 2013. 258 с.

15. **Шабанов В. В., Галямина И. Г., Юрченко Н. Ф.** Комплексное использование водных ресурсов и охрана природы: учебник. М. : Агропромиздат, 1994.

16. **Шабанов В. В., Маркин В. Н.** Эколого водохозяйственная оценка водных объектов: монография. М. : МГУП, 2009.

17. **Бин И. Ван, Лаукс П.** Планирование и управление водохозяйственными системами. Введение в методы, модели и приложения: монография. М. : Юстицинформ, 2009. 660 с.

18. Институт менеджмента, маркетинга и финансов. математика интерактивный обучающий курс. Тема 5. Сетевое планирование и управление [Электронный ресурс]. URL: <http://math.immf.ru/lections/305.html>.

19. **Костевич Л. С., Лапко А. А.** Теория игр. Исследование операций: монография. Минск : Вышэйшая школа. 1982. 230 с.

20. Моделирование водохозяйственных систем (эколого-экономические аспекты): монография / Под ред. В. Г. Пряжинской. М. : ИВП РАН, 1992. С. 350.

21. **Моисеев Н. Н.** Математические задачи системного анализа: учебное пособие. М. : Наука, 1981.С. 488.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. Теоретический курс управление водохозяйственными системами.....	3
Термины и определения.....	3
1. Цель, задачи и стратегия управления водными ресурсами.....	4
2. Общие вопросы методологии управления.....	9
3. Информационное обеспечение в управлении ВХС.....	12
4. Классификация математических моделей и их применение в управлении водными ресурсами.....	16
5. Перечень задач, решаемых при управлении водохозяйственными комплексами.....	20
6. Оптимизационный метод принятия решений.....	21
7. Производственные функции водопользователей.....	23
8. Планирование – как функция управления.....	26
8.1. Управленческое решение.....	27
8.2 Эффективность управленческого решения.....	27
9. Управление статьями водохозяйственного баланса.....	28
9.1. Увеличение объема приходной части ВХБ.....	28
9.2. Методы сокращения объемов расходной части ВХБ.....	30
10. Определение ущербов от ограничения водоподачи при оперативном управлении режимами комплексных гидроузлов.....	31
11. Управление качества вод.....	33
12. Оптимизация в управлении.....	37
12.1. Методы оптимизации для решения задач водораспределения.....	38
12.2. Критериальная оптимизация.....	42
ГЛАВА 2. Расчеты практической части управления водохозяйственными системами.....	45
Управление водными ресурсами ирригационно-энергетической водохозяйственной системы.....	45
Введение.....	47
1. Гидрологические данные.....	49
2. Определение объемов экологического стока.....	50
3. Использование водных ресурсов.....	50
3.1. Объемы водопотребления и водоотведения.....	50
3.1.1. Объемы водопотребления.....	50
3.1.2. Объемы водоотведения.....	54
3.2. Объемы водопользования.....	54
4. Характеристика загрязненности сточных вод.....	54
5. Водохозяйственный баланс.....	55
6. Определение оптимального полезного объема водохранилища.....	57
6.1. Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища.....	58

6.2. Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением.....	60
6.3. Система ограничений.....	61
7. Определение полезного объема водохранилища с помощью многокритериальной оптимизации.....	64
7.1 Формирование критериев оптимизации.....	64
7.1.1 Экономический критерий.....	64
7.1.2 Производственный критерий.....	65
7.1.3 Экологический критерий.....	65
7.2 Применение метода Домбровского для определения полезного объема водохранилища.....	67
7.3 Применение метода «Уступок».....	68
7.4 Применение метода «Равной эффективности».....	70
7.5 Применение метода «Линейной свертки критериев».....	71
7.6 Применение метода Фуллера.....	71
7.7 Метод циклограмм.....	73
Выводы.....	74
ГЛАВА 3. Пример выполнения работы.....	75
Введение.....	75
I. Гидрогеологические данные.....	76
II. Определение объемов экологического стока.....	77
III. Использование водных ресурсов.....	78
III.1 Объемы водопотребления и водоотведения.....	79
III.1.1 Объемы водопотребления.....	79
III.1.2 Объемы водоотведения.....	80
III.2 Объемы водопользования.....	80
IV. Характеристика загрязненности сточных вод.....	80
V. Водохозяйственный баланс.....	81
VI. Оптимизационные расчеты.....	84
VI. 1 Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища.....	84
VI. 2 Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением.....	85
VI.3 Система ограничений.....	86
VII. Определение полезного объема водохранилища с помощью многоцелевой оптимизации.....	91
VII.1 Применение метода Домбровского для определения параметров водохранилища.....	95
VII. 2 Применение метода «уступок».....	97
VII. 3 Применение метода «равной эффективности».....	99
VII. 4 Применение метода «линейной свертки критериев».....	100
VII. 5 Применение метода Фуллера.....	101
VII. 6 Метод циклограмм.....	102

Выводы.....	103
VIII.1 Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР–1 Эколого-экономическое обоснование водоохранных мероприятий в бассейне реки.....	103
IX. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР–2 Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением.....	108
X. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-3 Определение полезного объема водохранилища с помощью однокритериальной оптимизации.....	112
XI. Выполнение расчетно-графической работы по примеру РГР-4 Определение полезного объема водохранилища с помощью многокритериальной оптимизации.....	115
Приложение.....	121
Библиографический список.....	122

Учебное издание

Галямина Ирина Геннадьевна
Матвеева Татьяна Ивановна
Маркин Вячеслав Николаевич
Раткович Лев Данилович
Глазунова Ирина Викторовна
Бакштанин Александр Михайлович

**УПРАВЛЕНИЕ
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ
СИСТЕМАМИ**

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Оригинал-макет *Алексей Карев*

Дизайн обложки *Полина Шапошникова*

Подписано в печать 20.07.2020. Формат 60х90/16
Усл.-печ. л. 7,94. Тираж 100 экз. Заказ № 97

ООО «Мегаполис»
www.m-megapolis.ru
Тел.: 8 (495) 643-28-71
E-mail: zakaz@m-megapolis.ru
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5