

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ -  
МСХА им. К.А. ТИМИРЯЗЕВА  
ИНСТИТУТ МЕЛИОРАЦИИ, ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И СТРОИТЕЛЬСТВА  
ИМЕНИ А.Н. КОСТЯКОВА

**В.Н. Маркин, Т.И. Матвеева**

# **УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ**

учебное пособие

*Рекомендовано УМО по образованию в области природообустройства и водопользования в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки Природообустройство и водопользование.*



Москва

Издательство РГАУ-МСХА

2015

УДК 336:342.743(075.8)

ББК 67.402я73

**Маркин В.Н., Матвеева Т.И. Управление водохозяйственными системами: учебное пособие/В.Н. Маркин, Т.И. Матвеева - М.: РГАУ-МСХА, 2015.- с.172**

В работе представлен курс лекций и учебное пособие для выполнения практического задания. В учебном пособии рассматриваются вопросы обоснования принятия решений по выбору полезного объема водохранилища и водораспределения между ГЭС и орошением на основе оптимизационных расчетов. Материал изложен в теоретическом формате и дан пример 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 так же проводить промежуточную проверку знаний студентов. Учебное пособие позволяет решать оптимизационные вопросы на основе исходных данных конкретного объекта и задания их по вариантам.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Природообустройство и водопользование», является основой для проведения дисциплины «Управление водохозяйственными системами».

*Рецензенты:* заведующий кафедрой Природообустройство и водопользование Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова, профессор **Ю.В. Бондаренко**; профессор кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока, **В.В. Ильинич**.

ISBN

©Маркин В.Н., Матвеева Т.И., 2015

©ФГБОУ ВО РГАУ-ТСХА им.К.А.Тимирязева, 2015

©Издательство РГАУ-МСХА, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КУРС УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	6
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	6
1.ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ .....	8
2.ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ.....	14
3.ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВХС .....	17
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ. 22	
5. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	33
6.УЧЕТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПРИЗНАКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДОЛГОСРОЧНОГО И СРЕДЕНЕСРОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	36
7. ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ.....	40
9.ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ .....	47
10.ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ФУНКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ .....	54
10.1.Управленческое решение .....	54
10.2 Эффективность управленческого решения .....	55
11.СЕТЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВХС .....	56
11.1 Сетевое планирование в условиях неопределенности.....	61
11.2 Оптимизация сетевых параметров.....	64
12.УПРАВЛЕНИЕ СТАТЬЯМИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА66	
12.1 Увеличение объемов приходной части ВХБ.....	66
12.2 Методы сокращения объемов расходной части ВХБ.....	68
12.3 Имитационное моделирование ВХС.....	70
12.4 Целевые показатели при оптимизации водохозяйственных балансов .....	72
13.ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ КАК СРЕДСТВО ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВХС.....	74
13.1 Диспетчерское управление гидроузлом .....	74
13.2 Определение ущербов от ограничения водоподачи при оперативном управлении режимами комплексных гидроузлов.....	76
14.УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОД .....	78
15.МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИЯ В УПРАВЛЕНИИ.....	84
16.УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ.....	89
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ .....	94
ВВЕДЕНИЕ .....	95
1.ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ .....	96
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА.....	99
3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....	100
3.1 Объемы водопотребления и водоотведения .....	100

3.1.1 Объемы водопотребления .....	100
3.1.2 Объемы водоотведения.....	104
3.2 Объемы водопользования .....	105
4. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТОЧНЫХ ВОД.....	105
5.ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС .....	106
<b>6.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУ ГЭС И ОРОШЕНИЕМ .....</b>	<b>110</b>
6.1 Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища .....	111
6.2 Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением.....	114
6.3 Система ограничений .....	116
<b>7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ .....</b>	<b>120</b>
7.1 Формирование критериев оптимизации .....	121
7.1.1 Экономический критерий .....	121
7.1.2 Производственный критерий .....	121
7.1.3 Экологический критерий .....	121
7.2 Применение метода Домбровского для определения полезного объема водохранилища.....	123
7.3 Применение метода «Уступок» .....	125
7.4 Применение метода «Равной эффективности» .....	127
7.5 Применение метода «Линейной свертки критериев» .....	127
7.6 Применение метода Фуллера .....	128
7.7 Метод циклограмм .....	130
<b>ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....</b>	<b>132</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>132</b>
<b>I.ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.....</b>	<b>133</b>
<b>II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА .....</b>	<b>135</b>
<b>III.ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....</b>	<b>136</b>
III.1 Объемы водопотребления и водоотведения .....	136
III.1.1 Объемы водопотребления.....	136
III.1.2 Объемы водоотведения .....	137
III.2 Объемы водопользования .....	138
<b>IV. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СТОЧНЫХ ВОД .....</b>	<b>138</b>
<b>V.ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС.....</b>	<b>139</b>
<b>VI. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ .....</b>	<b>142</b>
VI.1 Постановка задачи оптимизации полезного объема водохранилища.....	142
VI.2 Постановка задачи оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением.....	144
VI.3 Система ограничений.....	145

<b>VII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ .....</b>	<b>152</b>
<b>VII.1 Применение метода Домбровского для определения параметров водохранилища .....</b>	<b>157</b>
<b>VII.2 Применение метода «Уступок» .....</b>	<b>160</b>
<b>VII.3 Применение метода «Равной эффективности» .....</b>	<b>162</b>
<b>VII.4 Применение метода «Линейной свертки критериев» .....</b>	<b>163</b>
<b>VII.5 Применение метода Фуллера.....</b>	<b>165</b>
<b>VII.6 Метод циклограмм .....</b>	<b>166</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>168</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>170</b>

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КУРС УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

*Теоретический курс предназначен для обучения бакалавров по направлению «Природообустройство и водопользования» и магистров по направлению «Управление водохозяйственными системами в условиях многоцелевого водопользования».*

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1. **Водохозяйственная система** - совокупность природных и технических объектов связанных между собой территориально и функционально.
2. **Диспетчерский график** - это графическое воплощение правил управления режимом водоема, регламентирующий порядок его наполнения и сработки.
3. **Качество воды**- характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования.
4. **Критерий оптимизации** - математический эквивалент цели операции, позволяющий количественно оценить степень достижения данной цели.
5. **Методология управления** - это совокупность методов, техники и процедур, используемых при познании процессов управления с целью обеспечения эффективного функционирования системы.
6. **Методы управления** - это совокупность приемов и способов воздействия на управляемый объект для достижения поставленных целей.
7. **Моделирование** - это создание образа реального объекта, заменяющего его для получения информации, путем проведения экспериментов.
8. **Оптимизация** - процесс выбора наилучшего варианта управления системой из возможных, при заданных требованиях и ограничениях.
9. **Планирование** - непрерывный процесс установления и конкретизации целей развития системы и ее структурных подразделений, определения средств их достижения, сроков и последовательности реализации, распределения ресурсов.

10. **Производственная функция** – зависимость объема получаемой продукции от использования водных ресурсов.
11. **Система**-это единое целое, состоящее из взаимозависимых элементов (компонентов).
12. **Системный подход** - общий метод исследования объекта как единого целого, состоящего из совокупности взаимосвязанных и взаимозависимых элементов.
13. **Стратегия управления** - долговременное и качественно определенное направление деятельности в соответствии с поставленной целью.
14. **Управление водными ресурсами** - это процесс планирования, организации, мотивации и контроля водохозяйственной деятельности, для достижения поставленных целей.
15. **Управление** - это целенаправленный и постоянный процесс воздействия субъекта управления на объект управления.
16. **Управленческое решение** - это выбор наилучшей альтернативы из числа возможных, предполагающей набор эффективных действий, направленный на устранение проблем, которые возникли на объекте управления.
17. **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**

*Понятийный аппарат управления: определение, цели. Стратегия управления. Основные понятия системного анализа, Условия осуществимости управления, виды управления, процесс принятия решений при управлении.*

**Управление**—это целенаправленный и постоянный процесс воздействия субъекта управления на объект управления. 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», 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.



Рис.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;



Рис.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 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 не зависимости от проведения ремонтных работ (внутренние факторы));
- *оперативность* – способность выполнения работ в установленные сроки (в соответствии с поговоркой – хороша ложка к обеду);
- *гибкость* - способность быстро адаптироваться, 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. **Наличие цели управления**, т.е. набор количественных и/или качественных характеристик, определяющих требуемое состояние системы. (*Если цель неизвестна, управление не имеет смысла, а изменение состояний превращается в бесцельное блуждание*).
2. **Мониторинг объекта управления**, что позволяет получать необходимую информацию об объекте, в том числе происходящие в системе изменения, и отклик системы на управляющее воздействие.
3. **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)*.
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 (рис.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*).

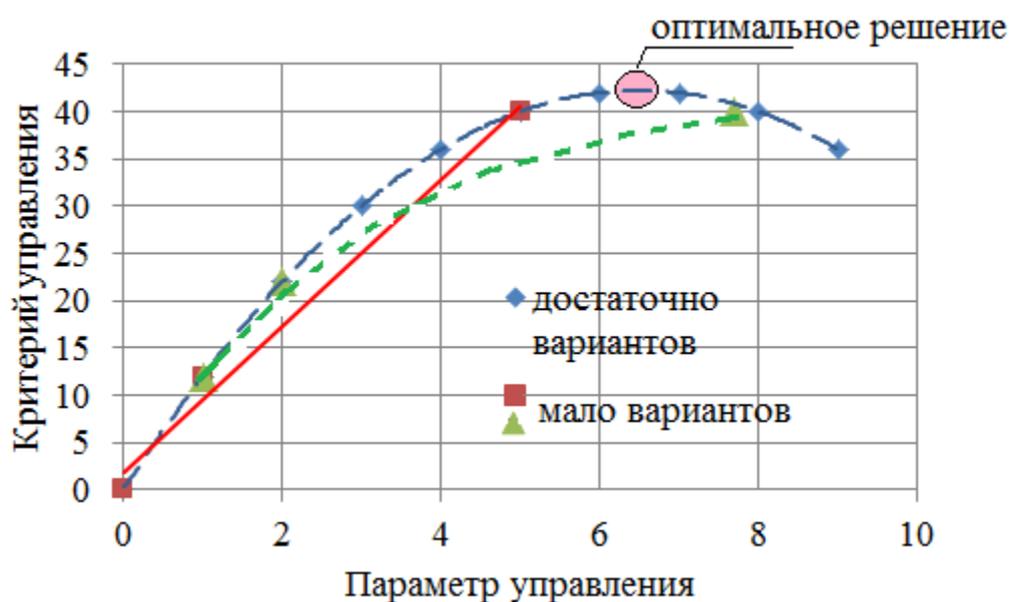


Рис.1.3 Выбор оптимального вариант при достаточном (есть оптимальное решение) и малом количестве (картина сильно искажается, что приводит к невозможности определения оптимального решения) альтернатив.

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. Система как объект управления. Водохозяйственная система Особенности систем. Методы управления: всеобщий диалектико-материалистический, общенаучный, специальный, системный подход. Принципы системного подхода. Этапы принятия решений.*

**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. Водохозяйственная система включает, например: водные объекты, пользователей водными ресурсами, технические средства и сооружения, позволяющие 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:

- **эмерджентность** - 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 структурных (в первую очередь информационных) связей** - играет решающую роль в сохранении целостности и функционировании 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. При этом река является внешней средой, но претерпевает воздействие от водохранилища. 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

Общенаучные методы, которые включают:

- аналогии (основаны на схожести признаков систем, при этом параметры и характеристики хорошо изученных систем, распространяются, по определенным правилам, на малоизученные системы);
- раздельного анализа (для изучения поведения системы, она делится на составляющие, и изучается их поведение в составе системы и влияние на нее),
- синтеза (изучение возможностей объекта в целом),
- интуиции (принятие управляющего решения на основе богатого опыта);
- специальные методы – основанные на использовании специального инструментария, например, математического моделирования;

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

### 3.ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВХС

*Принципы организации информационного обеспечения управления, требования к информационному обеспечению. Источники информации. Структура принятия решения в управлении.*

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  $Q_r$ , 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  $УНБ$ :

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

- поиски решения по каждой подзадаче (например, пропускная способность водосброса при отметке ФПУ  $Q_{пр\max} = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ , 4-х турбин ГЭС  $Q_{ГЭС\max} = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ , судоходных шлюзов  $Q_{\max \text{ шл.}} = 400 \text{ м}^3/\text{с}$ . Если расход половодья составит  $Q_{\max} = 1600 \text{ м}^3/\text{с}$ , 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  $1,1\text{ м}/\text{с}$  и глубина потока  $8\text{ м}$  получим допустимый удельный расход  $q_{\text{доп}}=1,1 \times 8=8,8\text{ м}^2/\text{с}$ . При ширине русла в нижнем бьефе  $200\text{ м}$ , 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  $1,5$  часа. На ГЭС две турбины с пропускной способностью  $500$  и  $300\text{ м}^3/\text{с}$ , при времени открытия  $1$  и  $0,5$  часа. Выбрать оптимальный вариант, которому соответствует минимальное время маневрирования затворами.

Строится матрица парного сравнения пропускной способности возможных вариантов:

Табл.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 вариант позволяющие пропускать расчетный расход  $800\text{ м}^3/\text{с}$ . Теперь составляется матрица времени маневрирования затворам:

Табл.3.2

*Оценка времени маневрирования водопропускными сооружениями при пропуске половодья*

<b>Вариант</b>	<b>Водосброс</b>		<b>ГЭС</b>	
	<b>2</b>	<b>1,5</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>
<b>2</b>	2	3,5	3	2,5
<b>1,5</b>	3,5	1,5	2,5	2
<b>1</b>	3	2,5	1	1,5
<b>0,5</b>	2,5	2	1,5	0,5

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

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

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 часов после начала подъема воды сделана аппроксимация данных и по полученному уравнению сделан прогноз, который показал, что через 8 часов уровень составит 115,5 м. Фактический расход, через 8 часов, составил 120 м, что говорит о необходимости корректировки прогноза.

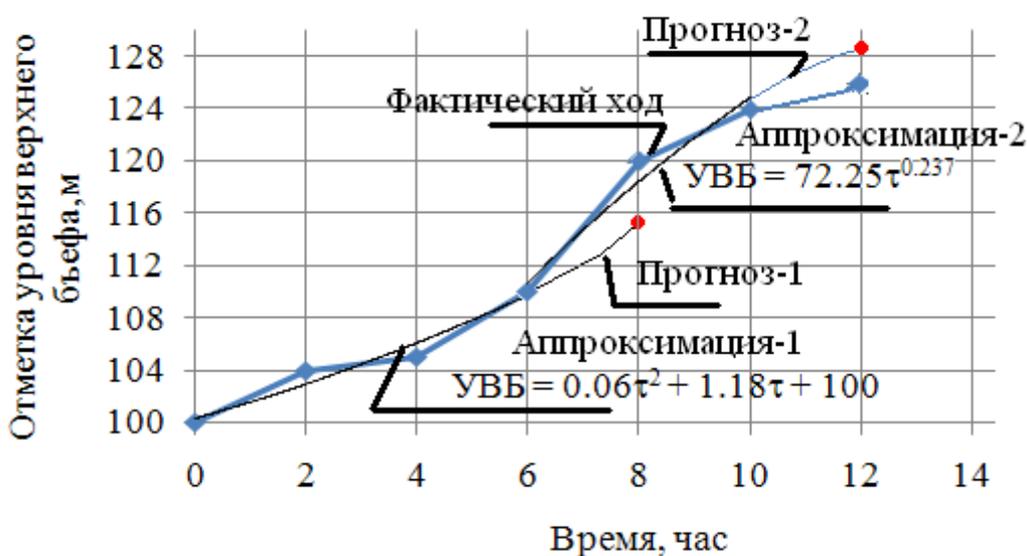


Рис.3.1 Прогноз изменения уровней воды во время половодья и его корректировка на основе накапливаемых данных.

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

*Моделирование. Цель и задачи моделирования. Требования к моделям.*

*Классификация моделей по характеру, масштабу и способу моделирования.*

**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). 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  $W_p$ , водозабор из подземных вод  $W_{пв}$ , возвратные воды  $W_{вв}$ , водопотребление  $W$ , ущерб речному стоку  $W_{ущ}$  и попуски  $W_{ноп}$ .

$$\text{целевая функция } ВХБ = W_p + W_{пв} + W_{вв} - W - W_{ущ} - W_{ноп}.$$

$$\text{ограничения } W_p \leq W_p^{p\%} \quad W \geq W_{план} \quad W_{пв} \leq W \quad ВХБ + W_{ноп} \geq W_{экол} \quad ВХБ \geq 0.$$

Учитывая, что  $W_{пв}$  полностью включено в объемах  $W$  и по арифметическим законам может сократиться, перепишем уравнение баланса в виде:  $ВХБ = W_p + W_{вв} - W' - W_{ущ} - W_{ноп}$ .

$$W' = W - W_{пв}$$

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

### **Классификация математических моделей**

Все математические модели можно разделить на группы по характеру решаемых проблем и характеру предсказания результатов (рис.4.1). По характеру предсказания результатов выделяют модели функциональные и структурные.



Рис.4.1 Классификация математических моделей

**Функциональные модели** - используют количественные величины, характеризующие явление или объект. При этом одни из них рассматриваются как независимые переменные, а другие — как функции от этих величин. Математическая модель обычно представляет собой систему уравнений разного типа (дифференциальных, алгебраических и т. д.), устанавливающих количественные зависимости между рассматриваемыми величинами.

**Структурные модели** - характеризует структуру сложного объекта, состоящего из отдельных частей, между которыми существуют определенные связи. Как правило, эти связи не поддаются количественному измерению. Для построения таких моделей удобно использовать теорию графов. **Граф** — это математический объект, представляющий собой некоторое множество точек (вершин) на плоскости или в пространстве, некоторые из которых соединены линиями (ребрами). Рассмотрим пример структурной модели для прогноза времени проектирования гидроузла.

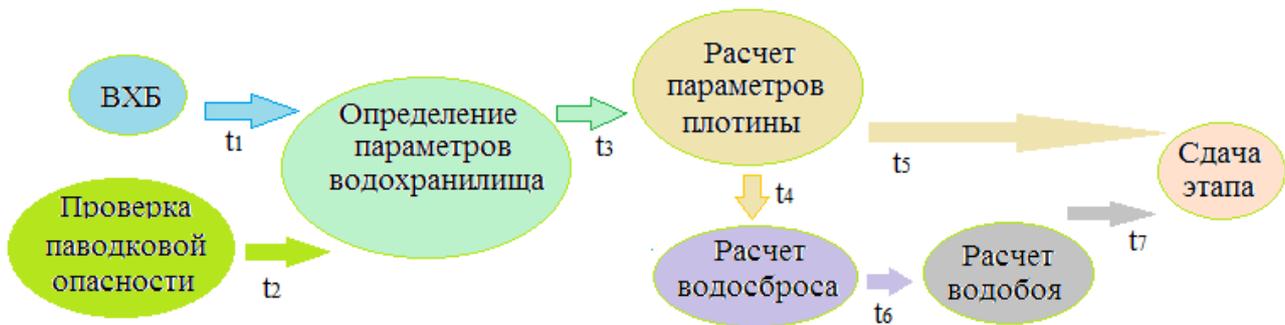


Рис.4.2 Структурная модель этапа проектирования водохранилищного гидроузла

Граф, моделирующий процесс проектирования позволяет выявить «узкое» место проекта – это этап определения основных параметров водохранилища. На этот этап поступают исходные данные с двух этапов: воднобалансовых расчетов (ВХБ) и проверки паводковой обстановки. Если здесь произойдет сбой, дальнейшее выполнение проекта будет задержано.

Время необходимое на выполнение проекта составит:

$$T = \max[(t_1, t_2) + t_3 + t_4 + \max(t_5 + t_6, t_7)]$$

Функциональные модели различаются на детерминированные и вероятностно-статистические.

**Детерминистические модели** - дают определенные, однозначные предсказания. Например, в реку сбрасываются загрязняющие вещества со сточными водами завода и стоками с сельскохозяйственных угодий (рис.4.3). Сосредоточенные сточные воды завода поступают в реку по канализационной трубе с концентрацией  $C_{свв}$  и в объеме сточных вод  $Q_{свв}$ . Стоки с сельскохозяйственных угодий – это рассредоточенные стоки, поступающие в реку на участке (L2-L1) с интенсивностью  $q$ . После поступления загрязнений в реку их концентрация снижается под действием самоочищения воды. Процесс самоочищения характеризуется коэффициентом самоочищения  $k$ .

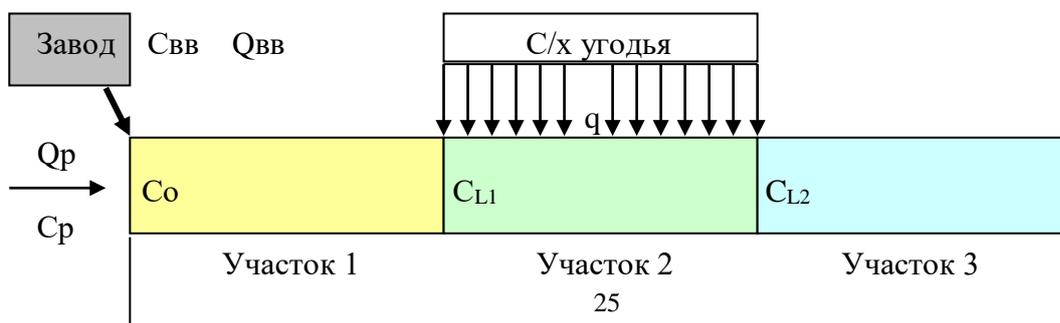




Рис.4.3 Схема формирования качества воды на участке реки

Данная схема описывается следующей системой уравнений.

Участок 1:  $C_x = C_p - (C_p - C_0) \times \exp(-x \times k)$       $C_0 = (C_p \times Q_p + C_{свв} \times Q_{свв}) / (Q_p + Q_{свв})$   
 $x = 0 \dots L1$

Участок 2:  $C_x = q/k - (q/k - C_{L1}) \times \exp(-x \times k)$       $x = 0 \dots (L2 - L1)$

Участок 3:  $C_x = C_p - (C_p - C_{L2}) \times \exp(-x \times k)$       $x = 0 \dots (L3 - L2)$

Табл. 4.1

Исходные данные для расчета влияния источников на загрязнение реки

С <sub>р</sub> , мг/л	С <sub>свв</sub> , мг/л	Q <sub>р</sub> , м <sup>3</sup> /с	Q <sub>свв</sub> , м <sup>3</sup> /с	q, мг/км	L1, км	L2, км	L3, км	k, 1/км
0	2	10	1	0.03	5	5	5	0.2



Рис.4.4 Изменение концентрации загрязняющего вещества в речной воде

Данная модель учитывает процессы: поступления вещества в реку, смешение загрязненных стоков с речной водой и самоочищение воды. Все процессы описаны детерминированными уравнениями, полученными путем решения дифференциального уравнения:  $dC/dx = -k \times C + q$      граничное условие:  $C(x=0) = C_0$ . Получаемый результат точно определен исходными данными и граничным условием.

**Вероятностно-статистические** - основаны на статистической информации, а предсказания, полученные с их помощью, имеют вероятностный характер. Рассмотрим пример. Требуется сделать прогноз изменения расходов воды в реке  $Q(t)$ . На основе анализа исходных данных за прошедшие годы, строится матрица переходных вероятностей  $P_{ij}$ . Каждый компонент матрицы показывает, с какой вероятностью расход воды  $Q(t-1)$ , за время  $\Delta t=t-(t-1)$  перейдет в состояние  $Q(t)$ , т.е. из состояния  $i(t-1)$  в состояние  $j(t)$ . Часто имеет место ситуация, когда точно не известно значение расхода  $Q(t-1)$ . Поэтому расчеты проводятся для целого набора (матрицы) начальной ситуации  $Q(t-1)$ .

Табл.4.2

Статистические данные изменения расходов воды в реке по годам за месяц летней межени (период времени  $t-1 \dots t$ )

Период	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с									
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
(t-1)	10	12	15	21	14	17	9	6	11	
(t)	7	12	16	20	8	11	15	13	9	
Период	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с									
	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	
(t-1)	7	14	18	20	9	11	17	14	13	
(t)	7	19	14	17	16	8	20	13	15	

Для построения матрицы переходных вероятностей выделим, для примера, два ( $n=2$ ) состояния, с диапазоном расходов  $\Delta Q = (Q_{\max} - Q_{\min})/n$ .

Диапазоны состояний, м <sup>3</sup> /с	
i	j
6...13.5	13.6...21

Теперь подсчитывается количество случаев перехода системы из одного состояния в другое.

Состояние	N	Количество переходов n		Вероятность переходов $P=n/N$	
		i	j	i	j
i	9	6	3	0.67	0.33
j	9	3	6	0.33	0.67

Прогноз максимальных расходов делается по выражению:

$$|Q(t-1)| \times |P_{ij}| = \begin{vmatrix} 13,5 \\ 21 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0,67 & 0,33 \\ 0,33 & 0,67 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 16 \\ 18,5 \end{vmatrix}$$

Результаты прогноза показывают, что расходы воды будут находиться в диапазоне значений 16...18.5 м<sup>3</sup>/с. При этом наиболее вероятным будет значение 16 м<sup>3</sup>/с, так как вероятность появления данного расхода составляет 67%.

Рассмотрим еще один пример использования вероятностных зависимостей. Предположим, что необходимо определить вероятность безотказной работы системы водоснабжения города. Система включает две насосные станции: первого и второго подъема, которые работают последовательно. Вероятности отказов в работе каждой станции равны  $P_{от}=0.1$ . Тогда вероятность безотказной работы одной станции составит:  $P_{бо}=1-P_{от} = 1-0.1=0.9$ . При этом вероятность отказа при работе двух станций составит:  $P_{2 от} = 1-P_{бо} \times P_{бо}$ . Рассмотрим разные варианты работы станций: с резервными насосами и без резервных насосов.

№ схемы	Состав схемы	Схема	Вероятность отказа
1	Без резервных насосов	1+1	$1-0.9*0.9 = 0.19$
2	Резервный насос на второй станции	1+2	$1-0.9*0.9^2 = 0.11$
3	Резервный насос на первой станции	2+1	$1-0.9^2*0.9 = 0.11$
4	Резервный насос на двух станциях	2+2	$1-0.9^2*0.9^2 = 0.02$

Если допустимая величина отказа работы станций составляет 0.05, то данному условию удовлетворяет только 4-ый вариант, характеризующийся наличием резервных насосов на каждой станции.

Математическое моделирование незаменимо в тех случаях, когда натурный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам.

### **Основные этапы математического моделирования**

**1. Построение модели.** На этом этапе задается некоторый объект — явление природы, конструкция, экономический план и т. д. При этом, как правило, четкое описание ситуации затруднено. Сначала выявляются основные особенности явления и связи между ними на качественном уровне. Затем найденные качественные зависимости формулируются на языке математики, то есть строится математическая модель.

*Пример. Требуется определить почвенные влагозапасы в слое 0...50см почвы для разработки режима орошения сельскохозяйственной культуры. Для решения данной задачи необходимо построить математическую модель, позволяющую рассчитывать содержание влаги в расчетный год. Расчетный период времени – декада. Воспользуется моделью Шабанова В.В.:*

$$W(t) = W_{\infty} - (W_{\infty} - W(t-1)) \times \exp(-k \times t)$$

*$W(t)$  – почвенные влагозапасы в момент времени  $t$ ,  $W_{\infty}$  – почвенные влагозапасы, соответствующие состоянию равновесия при отсутствии внешнего воздействия. Внешним воздействием для почвенной системы является выпадение осадков или проведение полива,  $k$  – коэффициент, учитывающий скорость изменения почвенных влагозапасов за счет суммарного испарения и водообмена между почвенными слоями.*

$$W_{\infty} = W_{зв}, \quad W(t-1) = W(t) + O_c(t) \quad k = e/W_{зв},$$

*где  $W_{зв}$  – влажность завядания,  $O_c(t)$  – количество выпавших осадков,  $e$  – интенсивность испарения.*

**2. Проверка адекватности модели.** На этом этапе выясняется, согласуются ли результаты эксперимента с теоретическими следствиями из модели в пределах определенной точности.

*Например, используя модель прогноза почвенных влагозапасов, рассчитываются влагозапасы за прошедший период, которые сравниваются с имеющимися фактическими данными. Как видно на рисунке 4.5 расчетные значения хорошо согласуются с фактическими. Это говорит о том, что построенная математическая модель пригодна для использования.*

Параметр	Месяцы и декады											
	IV			V			VI			VII		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Осадки, мм	10	20	22	15	11	26	32	17	20	25	10	20
Интенсивность испарения, мм/нед	8	8	10	9	15	20	15	10	15	10	8	12

Влажность завядания  $W_{зв} = 50$  мм.  $W(t=0) = 180$  мм.

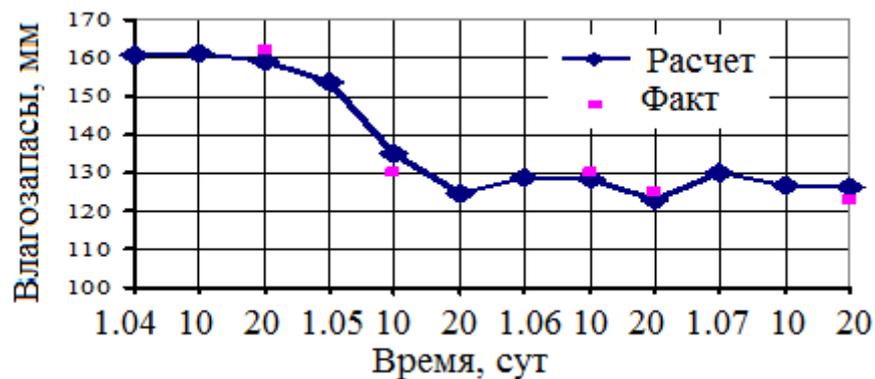


Рис. 4.5 Сопоставление рассчитанных и фактических влагозапасов почвы

**3. Решение математической задачи, для которой создана модель.** На этом этапе большое внимание уделяется разработке алгоритмов и численных методов решения задачи на ЭВМ, при помощи которых результат может быть найден с необходимой точностью и за допустимое время.

Расчеты, проведенные по представленной выше модели прогноза почвенных влагозапасов представлены на графике, с использованием исходных данных расчетного периода.

Параметр	Месяцы и декады											
	IV			V			VI			VII		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Осадки, мм	20	25	30	10	16	40	27	17	18	37	9	15
Интенсивность испарения, мм/нед.	11	12	15	15	10	29	12	14	11	19	16	12

Влагозапасы на начало расчетного периода  $W(t=0) = 138$  мм



Рис. 4.6 Прогноз влагозапасов в слое 0...50см почвы

**4. Интерпретация полученных по математической модели данных.** На данном этапе проводится анализ полученных с помощью моделирования данных. Например, рассчитанные значения влагозапасов сравниваются с оптимальными для растений нижним пределом влагозапасов (120мм) и делается вывод о необходимом режиме орошения.

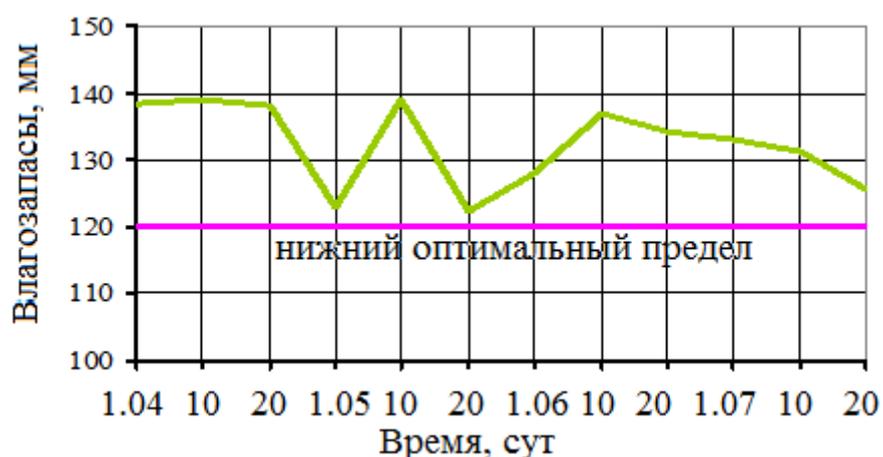


Рис. 4.7 Прогноз изменения влагозапасов с учетом орошения

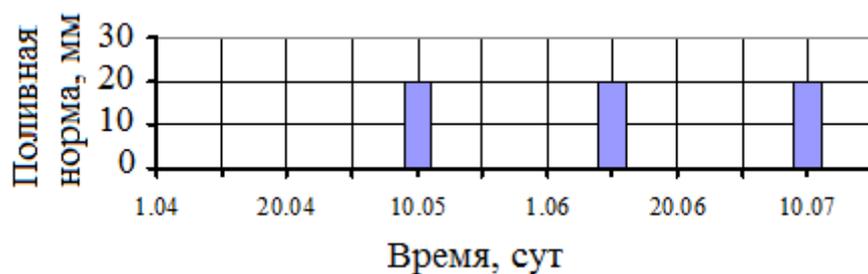


Рис.4.8 Режим орошения

**5. Модификация модели.** На этом этапе происходит либо усложнение модели, чтобы она была более адекватной действительности, либо ее упрощение для использования в инженерной практике.

Например, в представленной модели использовались среднедекадные значения осадков и испарения. На рисунке 4.9 показано, что допустимо использовать среднемесячные значения, при этом ошибка составит не более 6-8%, что допустимо.



Рис.4.

Время, сут

анием

среднедекадных и среднемесячных значений осадков и испарения

Особым инструментом принятия управляющего решения служит имитационное моделирование. Имитационные модели отвечают на вопрос: «Что будет, если в системе происходят изменения?» и позволяют выявлять поведение системы (изменение ее состава, структуры и свойств) под действием внешних и внутренних факторов. 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 пуски в нижний бьеф  $W_n$ . Излишки воды  $+\Delta W$  идут на наполнение водохранилища, а дефициты  $-\Delta W$  говорят о его сработке. Все составляющие изменяются во времени ( $\tau$ ).

$$\Delta W(\tau) = W_p(\tau) + W_{вв}(\tau) - W(\tau, Y) - W_n(\tau, Y)$$

$$V(\tau) = \pm \Delta W(\tau) + V_n V_{мо} \leq V(\tau) \leq V_{пол}. W_n(\tau) \leq W_{дон}.$$

где  $V_n$  - 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  $(W+W_n)$  от требуемых значений  $(W^{треб}+W_n^{треб})$ , то возможна оптимизация режима осуществления попусков и водоподачи.

$$|(W+W_n)-(W^{треб}+W_n^{треб})| \rightarrow \min$$

В отличие от имитационных моделей, прогнозные - отвечают на вопрос: «Что будет, при не измен составе и свойстве системы. Например, для условий предыдущей задачи исключается возможность управления попусками и водопотреблением, они задаются в однозначном виде.

$$\Delta W(\tau) = W_p(\tau) + W_{вв}(\tau) - W(\tau) - W_n(\tau)$$

$$V(\tau) = \pm \Delta W(\tau) + V_n V_{мо} \leq V(\tau) \leq V_{пол}. \quad W_n(\tau) \leq W_{дон}.$$

## 5. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

*Задачи стратегического планирования развития ВХС. Задачи перспективного планирования развития ВХС. Задачи оперативного планирования и управления ВХС.*

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

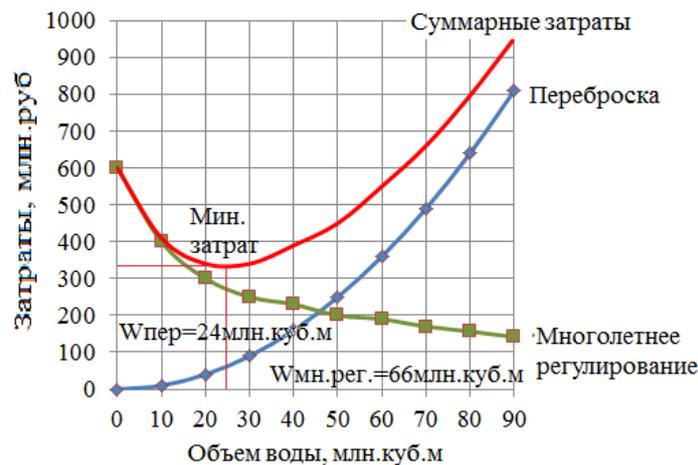
В связи с данной классификацией выделяются задачи управления водохозяйственными системами, которые определяют особенности управления.

### **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  $\Sigma W$ . В связи этим, проверяется водообеспеченность отраслей располагаемыми ресурсами воды  $W_{рас}$ . Делается это на основе воднобалансовых расчетов  $W_{рас} - \Sigma W = \Delta W$ , 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  $W_{пер} = \Delta W_{и/или}$  многолетнего регулирования стока  $W_{мн} = \Delta W$ );

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

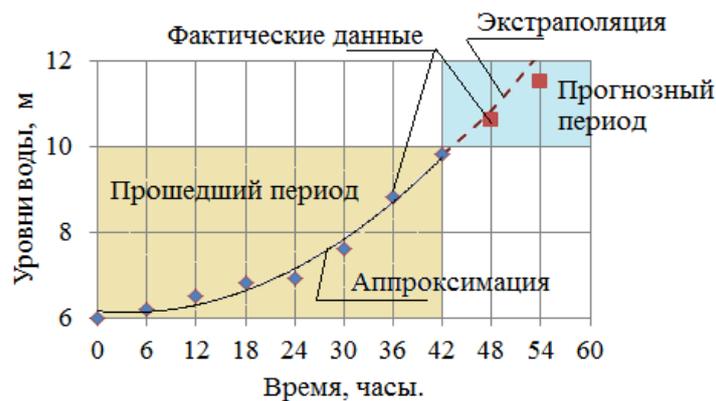


*Рис.5.1 Выбор оптимального варианта покрытия дефицита воды 90млн.м<sup>3</sup> путем переброски и многолетнего регулирования стока;*

- 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).

## **2. Задачи оперативного управления.**

- Мониторинг состояния системы (например, во время половодья проводится отслеживание изменения уровней воды в водохранилище УВ, выявляется тенденция изменения УВ и прогноз уровней на ближайшие дни и часы (рис.5.2)).



*Рис.5.2 Краткосрочный прогноз изменения уровня воды в водохранилище на основе данных наблюдений.*

- Оперативное распределение водных ресурсов (например, в конкретных условиях, при высокой степени неопределенности погодных явлений, требуется подача воды на орошение из ирригационного водохранилища);
- оперативные планы работы ВХС (например, при управлении объемами водохранилища требуется: раздача воды потребителям, осуществление пусков для ГЭС и судоходства. Это осуществляется в соответствии с оперативными планами работы гидроузла);
- выбор оптимальных режимов функционирования ВХС в экстремальных ситуациях (например, выбор варианта пропуска половодья с учетом пропускной способности: водосброса, ГЭС, судоходного шлюза);
- контроль состояния, использования и охраны водных ресурсов (контроль качества воды в водохранилище, определение испарения, фильтрации, проверка состояния водоохранной зоны, оценка эффективности работы очистных сооружений и др.).

## **6.УЧЕТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПРИЗНАКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДОЛГОСРОЧНОГО И СРЕДНЕСРОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Задачи долгосрочного и средне срочного управления решаются на разных уровнях при разработке Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), что позволяет учесть территориальный признак:

- в масштабах страны, региона (в рамках Общегосударственной схемы);

- бассейна реки (в рамках бассейновых Схем);
- бассейнов трансграничных водных объектов (в рамках Схем трансграничных водных объектов).

**В составе Общей федеральной схемы РФ рассматриваются вопросы:**

1. оценка существующей водохозяйственной и экологической обстановки;
2. прогноз развития водного хозяйства;
3. оценка состояния безопасности гидротехнических сооружений;
4. оценка потребности в водоохранных и водохозяйственных мероприятиях;
5. планирование развития системы мониторинга водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений;
6. оценка потребности в финансировании водного хозяйства РФ;
7. оценка социально-экономических и экологических последствий реализации мероприятий схемы.

**В составе Бассейновых схем выполняются:**

1. оценка существующей водохозяйственной и экологической обстановки
2. прогноз развития водохозяйственного комплекса;
3. оценка требований на воду, объемов и качества сточных вод;
4. определение величин санитарного и экологического попусков;
5. оценка проявлений вредного воздействия вод на территории бассейна;
6. составление водохозяйственных расчетов и балансов;
7. обоснование намечаемых инженерных мероприятий,
8. оценка социально-экономических и экологических последствий реализации мероприятий.

**В бассейновых схемах трансграничных водных объектов** рассматриваются все вопросы бассейновых схем, дополнительно к которым определяются требованиями международных договоров РФ направленные на решение трансграничных проблем:

1. распределения водных ресурсов в бассейнах трансграничных рек,
2. регулирования паводков,

3. трансграничного переноса загрязнений,
4. взаимоотношений при аварийных ситуациях.
5. предложения по использованию и охране трансграничных водных объектов,
6. развитию системы мониторинга,
7. предложения по разработке норм и стандартов.

**Общая федеральная схема Российской Федерации** выполняется в три этапа.

**На первом этапе** разрабатывается Стратегия развития водного хозяйства РФ, в которой на основе анализа современного использования водных ресурсов и экологического состояния водных объектов намечаются основные направления государственной водохозяйственной политики и развития водного хозяйства на расчетный перспективный период. Стратегия представляется на согласование в Государственную водную службу МПР России.

**На втором этапе** разрабатываются Основные положения схемы с прогнозом развития водного хозяйства, с предложениями по лимитам водопользования по бассейнам водных объектов и субъектам РФ, с перечнем рекомендуемых водохозяйственных и водоохраных мероприятий, предложениями с необходимыми расчетами по финансированию мероприятий и совершенствованию экономических отношений при использовании и охране водных ресурсов, предложениями по совершенствованию государственного управления водным фондом. В составе Основных положений разрабатывается концепция интегрированной информационной системы по водным ресурсам страны, их использованию и охране с анализом информационных потоков и предложениями по сбору, обработке, хранению и выдаче информации.

Основные положения согласовываются с Государственной водной службой МПР России, органами исполнительной власти субъектов РФ, заинтересованными министерствами и ведомствами.

**На третьем этапе** разрабатывается непосредственно общая федеральная схема комплексного использования и охраны водных ресурсов Российской Федерации на расчетный период с учетом положений Стратегии, показателей и результатов согласования Основных положений.

**Бассейновые схемы** выполняются в два этапа.

**На первом этапе** разрабатываются Основные положения бассейновой схемы. Состав Основных положений согласовывается с Заказчиком и должен включать анализ водохозяйственных и экологических проблем в бассейне и определение основных направлений их решения, предложения по лимитам водопользования, составу водохозяйственных и водоохраных мероприятий, предложения по совершенствованию экономических отношений при использовании и охране водных ресурсов в бассейне, включая предложения по удельным показателям платы за водопользование.

В составе Основных положений разрабатывается концепция бассейновой информационной базы данных, как составной части государственного управления водным фондом бассейна.

Основные положения согласовываются с бассейновыми водными управлениями МПР России, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, с заинтересованными министерствами и ведомствами и их территориальными органами.

**На втором этапе** разрабатывается непосредственно бассейновая схема с учетом предложений и показателей Основных положений и результатов их согласования.

При необходимости количество этапов разработки бассейновой схемы может быть увеличено с учетом конкретных задач, определенных техническим заданием на разработку схемы. В частности, в качестве отдельного этапа может быть выделена разработка бассейновой информационной системы, водохозяйственные расчеты и балансы, разработка и внедрение отдельных компьютерных программ и т.д.

## 7. ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ

*Оптимизация. Критерий оптимизации, их свойства. Целевые функции, их классификация. Основные классы задач, решаемые с помощью оптимизационных операций. Частные критерии оптимизации. Многокритериальная оптимизация, решаемые задачи.*

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

Выделяют две группы целевых функций:

- **качественные** – которые отражают возможность (истина - 1) или не возможность (ложь - 0) достижения цели (*например, проводятся мероприятия по предотвращению оползневых явлений. Критерий оптимизации ( $\Phi$ ) выражается в виде:  $\Phi = \{1, \text{ если оползня нет; } 0, \text{ если оползень прошел}$* );
- **количественные** – которые отражают увеличение или снижение показателя, характеризующего уровень достижения цели и зависящего от стратегий и неконтролируемых факторов (неконтролируемые факторы определяют обстановку проведения управляющего воздействия, но не зависят от управления). *Например, обоснование орошения. Критерий - максимальная урожайность в зависимости от оросительной нормы. Неконтролируемые параметры: почвенное плодородие, метеоусловия, агротехнические мероприятия.*

### **Основные задачи оптимизации**

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.

К данным типам задач относятся задачи:

- определения оптимальной структуры водохозяйственного комплекса. Выбор оптимального варианта делается с помощью критерия сравнительной экономической эффективности. При этом сопоставляются варианты и оптимальным считается вариант с минимальными приведенными динамическим затратам:

$$\bar{Z}_i = \sum_{t=1}^T K_i^t (1 + E_0)^{t_0 - t} + \sum_{t=t_0}^m C_i^t (1 + E_0)^{t_0 - t},$$

где  $T$  - срок строительства;  $K_i^t$  - капитальные вложения в году  $t$  по варианту  $i$ ;  $E_0$  - коэффициент учета фактора времени;  $C_i^t$  - ежегодные издержки в году  $t$  по варианту  $i$ ;  $t_0$  - первый год эксплуатации;  $m$  - срок изменения издержек от начала эксплуатации объекта до полного его освоения.

- Разработка водохозяйственной политики в области использования и охраны водных ресурсов в бассейне реки на ближайшие 15-20 лет.
- Оптимизация управления при планировании водохозяйственных и водоохраных мероприятий.

– В задачах планирования водоохраных мероприятий по предотвращению загрязнения водных объектов может использоваться экономический критерий:

$$\circ \sum Z_{\text{пр.}i}^{\text{оч.}} - \sum Y_{\text{щ}j} \rightarrow \min,$$

где  $\sum Z_{\text{пр.}i}^{\text{ВОМ.}}$  - суммарные приведенные затраты на проведение  $i$ -го водоохранного мероприятия;  $\sum Y_{\text{щ}}$  - суммарный предотвращенный ущерб от загрязнения водного объекта  $j$ -м источником загрязнения.

– В задачах выбора варианта управления водными ресурсами, когда решается вопрос по определению доли переброски и доли регулирования стока, используется критерий:

$$\sum D_z - (\sum Z_{\text{пр.}i}^{\text{пер.}} + \sum Z_{\text{пр.}j}^{\text{р.с.}}) \rightarrow \min,$$

где  $\sum D_z$  - суммарный доход от мероприятий по управлению водными ресурсами, полученный  $z$ -м водопользователем;  $\sum Z_{\text{пр.}i}^{\text{пер.}}$  - суммарные приведенные затраты на переброску стока по  $i$ -му варианту;  $\sum Z_{\text{пр.}j}^{\text{р.с.}}$  - суммарные приведенные затраты, связанные с регулированием стока  $j$ -м водохранилищем.

Задачи оперативного управления ориентированы на разработку оптимальных оперативных режимов работы ВХС, элементами которого являются оперативные планы-графики наполнения и сработки водохранилищ, распределения воды между потребителями в условиях дефицита воды, планы управления элементами ВХС в экстремальных условиях (работа водосбросных сооружений в период катастрофического половодья).

## 8. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Оценка деятельности по управлению водохозяйственной системой может быть сделана с помощью разных критериев (частных или локальных). *Например: суммарный чистый доход, прибыль каждого конкретного участника ВХК, степень воздействия на окружающую среды.* При этом, решение приводящее к оптимуму одного критерия не является оптимальным по другим критериям. В этом случае говорят о принятии компромиссного решения, которое достаточно хорошо соответствует всем критериальным требованиям, т.е. решается многокритериальная задача. Основные вопросы решаемые в этом случае сводятся к следующему.

1. Выбор схемы компромисса, т.е. разработка правила сравнения решений.

В этом случае рассматриваются вопросы выбора частных критериев, их сопоставимости, оценки результатов рассматриваемых вариантов. *Например, выбор решения об объеме производства, планируемого для создания. Критерии: максимум дохода  $D \rightarrow \text{макс.}$ , минимум воздействия на окружающую среду ( $V \rightarrow \text{мин.}$ ).*

2. Нормализация критериев. Для сравнения все критерии должны быть сопоставимыми между собой. *Например, нельзя сравнить критерии, выражаемые в денежных единицах с критериями в размерности массы, объема и т.п. Сопоставимость критериев делается путем нормирования или разработкой специального сравнительного показателя. Для предыдущего примера, критерии измеряются в разных размерностях (рубли и объем сброса загрязненных сточных вод), поэтому они не сопоставимы. Сделать данные критерии сопоставимыми можно путем нормирования по допустимым значениям вариантов. Доход не менее  $D_{\text{доп}}$  и объем сброса загрязняющих веществ не более  $V_{\text{доп}}$ :  $D_n = D/D_{\text{доп}}$ ,  $V_n = V/V_{\text{доп}}$ . Учитывая, что один критерий максимизируется, а второй минимизируется, поэтому нормированием можно изменить второй критерий, чтобы сделать его максимизируемым  $V_n = 1 - V/V_{\text{доп}}$ . Оценка вариантов делается при максимальном значении суммы частных критериев  $D_n + V_n \rightarrow \text{макс.}$*

3. Определяется область компромиссных решений. В данной области улучшение решения по одному критерию не приводит к существенному ухудшению по другим критериям. Определение данной области сужает сферу поиска компромиссных решений. *Например, определение устойчивости откосов земляной плотины, проводится с помощью построения цилиндрических поверхностей. Поверхности описываются радиусом окружности, центр которой располагается внутри области допустимых компромиссных решений (в данном случае наиболее опасных по условию сдвига пластов).*

Учет приоритетов - делается в случае, если локальные критерии имеют разную степень значимости. Для этого можно воспользоваться весовыми коэффициентами. *Например, оптимизация условий выращивания растений, с учетом влияния на урожайность: влажности почвы (регулируется с помощью орошения) и содержания в почве питательных веществ (регулируется внесением удобрений). Данные факторы очень важны для урожая, но их влияние на урожайность не равноценно. Так эффект от внесения удобрений может увеличить урожайность в 4 раза, а орошение в 2 раза. Поэтому значимость регулирования данных факторов (при отсутствии экстремальных условий) можно оценить как  $4/(4+2)$  к  $2/(4+2)$ , т.е.  $0,67:0,33$ . На данные коэффициенты, при проведении оптимизационных расчетов, умножаются соответствующие критерии.*

Оптимизация может проводиться по одному или нескольким критериям одновременно. В зависимости от этого применяются одно и многокритериальные методы.

### **Однокритериальная оптимизация**

Однокритериальная оптимизация проводится с помощью одного функционала и одного критерия. Например: функционал – зависимость чистого дохода от объемов воды; критерий – максимум чистого дохода. Данные методы относительно просты и позволяют получать однозначные решения. При этом, требуется выделить основной критерий, который и определяет функционал. В этом заключается главный недостаток, который позволяет учесть другие важные факторы выбора оптимального значения только в виде ограничений, которые не влияют на вид функционала. Например, поиск оптимального объема водохранилища по критерию чистого дохода от его использования, не учитывает (сложно учесть) ущербы водным и наземным системам, социальные и производственные факторы. В данном случае применяются методы многокритериальной оптимизации.

### **Многокритериальная оптимизация**

Многокритериальная оптимизация позволяет выделить значимые критерии, что упрощает математическое выражение. Однако, при этом, получаемое решение существенно зависит от значимости критериев (что определяется, в основном, методом «экспертной оценки»), их количества, обоснованности применения и степени разработанности аппарата математического описания данного критерия.

## 9.ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

*Производственная функция. Методы построения производственных функций: физический; статистический; оптимизационный. Их использование и применение.*

**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 (Э) и мощность (N) зависят от расхода и напора на ГЭС:

$$\text{Э}=f(Q,H), \quad (9.1)$$

где Э—объем произведенной электрической энергии за год; Q—расход, пропущенный через турбины воды; H—напор на гидроэлектростанции.

Формулу (9.1) можно раскрыть следующим образом:

$$\text{Э}=9,81 \times Q \times H \times T \times \eta, \quad (9.2)$$

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;  $\eta$ —коэффициент полезного действия агрегата,  $\eta=0,85$ .

Учитывая, что расход воды связан с объемом (W) воды  $Q=W/T$ , формула (9.2) преобразуется в выражение:

$$\text{Э}=W \times H / 432, \quad (9.3)$$

Мощность вырабатываемая на ГЭС составит:

$$N=\Theta/T \quad (9.4)$$

Для судоходства производственная функция имеет вид:

$$P=f(W) \quad (9.5)$$

где P-объем перевезенных грузов за навигацию; W-объем навигационного попуска.

$$P=\sum P_g \quad (9.6)$$

$$P_g=P_c \times Z$$

где  $P_g$ -количество груза, перевезенного за навигацию  $g$ -м судном;  $P_c$ -количество груза, перевезенного за один рейс;  $Z$ -количество рейсов за навигацию.

$$P_c=P_r \times e, \quad (9.7)$$

где  $P_r$ -расчетная грузоподъемность судна;  $e$ -коэффициент использования расчетной грузоподъемности.

$$e=H_n/H_p, \quad (9.8)$$

где  $H_n$ -глубина на перекате (средняя за навигацию);  $H_p$ -расчетная осадка судна.

Глубина на перекате зависит от расхода воды в реке:

$$H=f(Q), \quad (9.9)$$

где  $Q$ -средний расход воды (на перекате) в реке за навигацию.

Расчетная осадка судна  $H_p$  определяется по зависимости:

$$H_p=H_{oc}+h, \quad (9.10)$$

где  $H_{oc}$ -расчетная осадка судна, зависящая от грузоподъемности;  $h$ -необходимый запас воды под днищем судна.

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. Модель выражает относительную урожайность культуры ( $S=Y/Y_{max.}$ ) от оросительной нормы ( $M$ ). Учитывая связь объема воды ( $W_{op}$ ) для орошения с орошаемой площадью ( $F_{op}$ ) и оросительной нормой, получается производственная функция для орошения.

$$S = \left[ \frac{(w_{opt} - w_o) \cdot \frac{M}{M_{opt}} + w_o}{w_{opt}} \right]^{Y \cdot w_{opt}} \cdot \left[ \frac{1 - \left( (w_{opt} - w_o) \cdot \frac{M}{M_{opt}} + w_o \right)}{(1 - w_{opt})} \right]^{Y \cdot (1 - w_{opt})}$$

$$W_{op} = F_{op} \cdot M / \eta, \quad (9.11)$$

где  $S$ —относительная урожайность;  $Y_{max}$ —максимально возможная в конкретных условиях урожайность, ц/га;  $F_{op}$ —площадь орошения, га;  $w_{opt}$  —оптимальная влажность почвы, %;  $w_o$  —средне многолетняя влажность почвы, %;  $M_{opt}$ —биологически оптимальная оросительная норма, м<sup>3</sup>/га;  $\eta$  - коэффициент полезного действия оросительной системы.

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

$$Y = f(W) \quad (9.12),$$

где  $Y$ —урожайность;  $M$ —оросительная норма;  $W$ —годовой объем воды подаваемый для орошения;  $F$ —площадь орошения;  $\eta_{op}$ —коэффициент полезного действия оросительной системы.

Удобно использовать нормированные зависимости:

$$S = f(W/W^*) \quad (9.13)$$

где  $W_{opt}$ —оптимальный годовой объем воды для орошения.

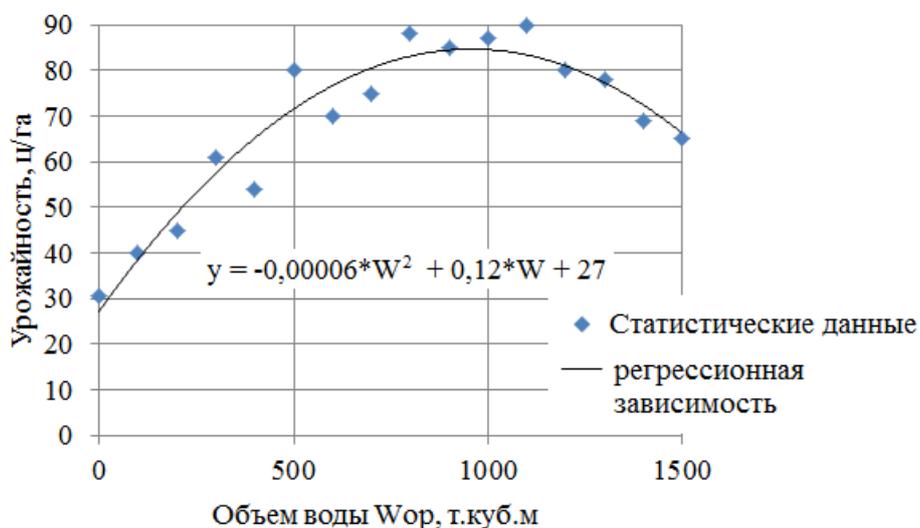
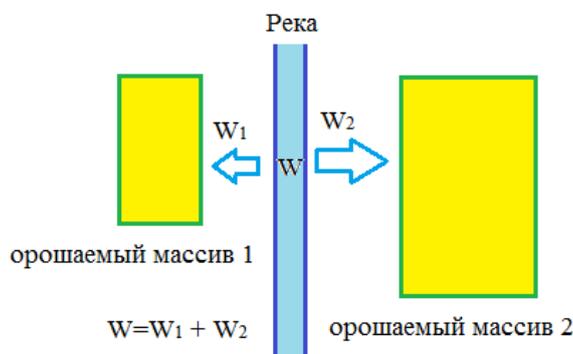


Рис. 9.1 Статистическая зависимость урожайности многолетних трав от объема подаваемой на орошение воды (площадь орошения 500га)

**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 орошаемыми массивами.



Предположим, что рассматривается  $N$  вариантов распределения водных ресурсов. Производственную функцию можно представить в виде:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = f(W), \quad (9.14)$$

где  $\text{ЧД}_{\Sigma}$  – суммарный чистый доход, получаемый от реализации урожая всех орошаемых массивов;  $W$  – объем воды, выделяемый для орошения конкретного массива.

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

$$\text{ЧД}_{\Sigma} \rightarrow \max \quad (9.15)$$

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

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = \sum \text{ЧД}_{ij} \quad (9.16)$$

где  $\text{ЧД}_{ij}$  – чистый доход, получаемый от орошения  $i$ -того массива в  $j$ -ом варианте распределения водных ресурсов.

Прибыль  $\text{ЧД}_{ij}$  определяется по зависимости:

$$\text{ЧД}_{ij} = \text{Ц}_{ij} - \text{С}_{ij}, \quad (9.17)$$

где  $\text{Ц}_{ij}$  – стоимость продукции, получаемой с  $i$ -того массива в  $j$ -том варианте распределения водных ресурсов;  $\text{С}_{ij}$  – затраты на производство продукции  $i$ -того массива в  $j$ -том варианте распределения водных ресурсов.

Стоимость продукции получаемой на  $i$ -том массива  $C_{ij}$  определяется по зависимости:

$$C_{ij}=Y_{ij}\times F_i\times c_i \quad (9.18)$$

где  $Y_{ij}$ —урожайность на  $i$ -том массиве в  $j$ -том варианте распределения водных ресурсов;  $F_i$ —площадь  $i$ -того массива;  $c_i$ —цена продукции, получаемой на  $i$ -том массиве.

Издержки выражаются в зависимости от орошаемой площади ( $F_i$ ):

$$C_{ij}=c_i\times F_i \quad (9.19)$$

где  $c_i$ —удельные затраты на 1га площади.

Урожайность культуры на  $i$ -том массиве  $Y_{ij}$  зависит от оросительной нормы  $M_{ij}$ .

$$Y_{ij}=f(M_{ij}) \quad (9.20)$$

Оросительная норма  $M_{ij}$ , в свою очередь, зависит от объема воды, выделяемой  $i$ -тому массиву в  $j$ -том варианте распределения водных ресурсов:

$$M_{ij}=W_{ij}\cdot\eta/F_i \quad (9.21)$$

где  $W_{ij}$ —объем водных ресурсов, выделяемый  $j$ -той культуре в  $i$  - том варианте распределения;  $\eta$ —КПД оросительной системы.

Накладываются ограничения на минимальную ( $M_{\min}$ ) и максимальную ( $M_{\max}$ ) оросительную норму, суммарный объем водопотребления ( $W_{\text{потр}}$ ):

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max} \quad W_{\text{потр}} \geq \sum W_i$$

В результате оптимизации получается значение максимального чистого дохода от варианта подаваемой воды ( $W_j=0\dots W_{\max j}$ ).

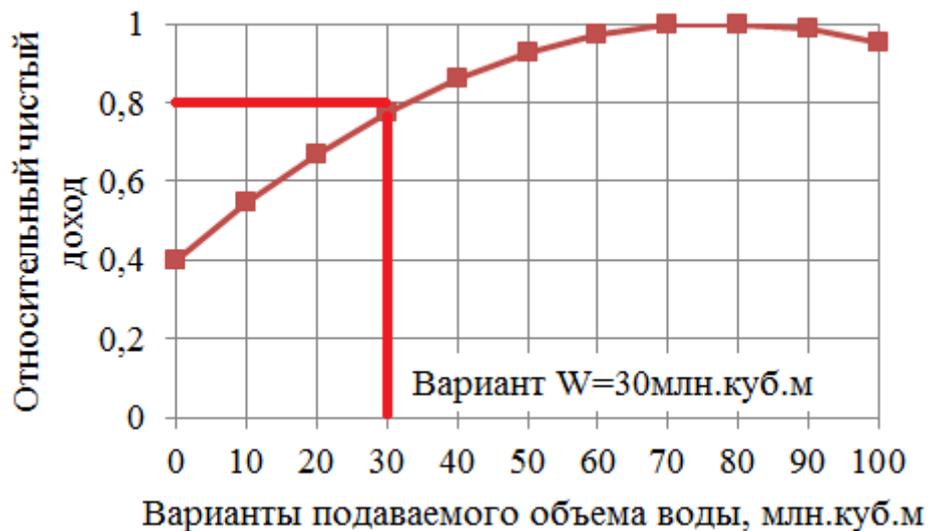


Рис.9.1 Производственная функция чистого дохода от орошения в зависимости от объемов распределяемой воды, полученная путем оптимизации водораспределения между двумя орошаемыми массивами

Каждая точка производственной функции (рис.9.1) получается как оптимальная величина для каждого варианта распределения объема воды (рис.9.2).

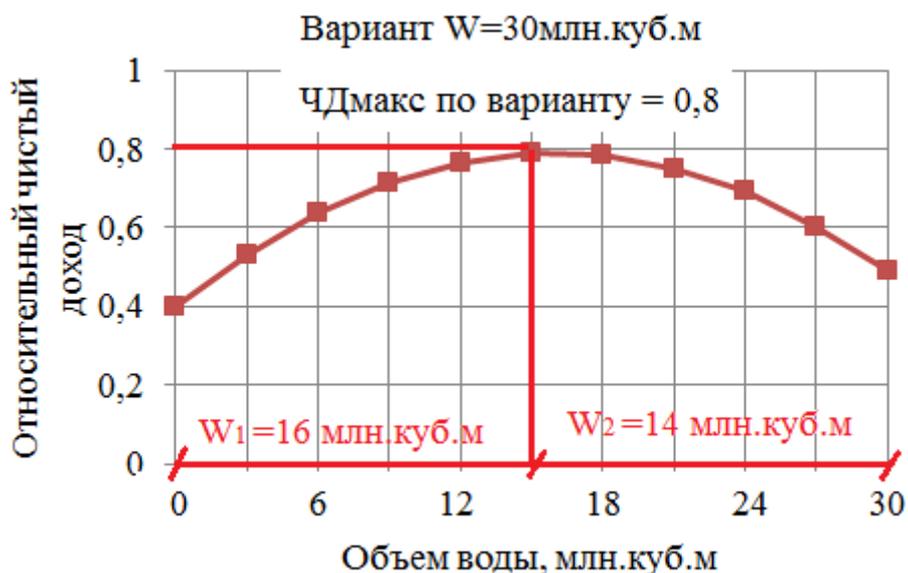


Рис.9.2 Оптимизация водораспределения между двумя орошаемыми массивами для варианта подаваемой воды  $W=30$  млн.м<sup>3</sup>

В рыбном хозяйстве производственная функция учитывает зависимость объемов рыбной товарной продукции вылавливаемой в верхнем и нижнем бьефах гидроузла при разных режимах наполнения и сработки водохранилища.

$$P = P_{н.б.} + P_{в.б.} \quad P_{н.б.} = f(Q_{п.}) \quad P_{в.б.} = f(V_{в.}) \quad (9.22)$$

где  $P_{н.б.}$ ,  $P_{в.б.}$ —объем продукции рыбного хозяйства в нижнем и верхнем бьефах соответственно;  $Q_{п.}$ —расход рыбохозяйственных попусков из водохранилища;  $V_{в.}$ —объем водохранилища.

Оптимизация проводится по критерию максимальной рыбной продукции:

$$P \rightarrow \max \quad (9.23)$$

Объем продукции рыбного хозяйства определяется следующим образом:

$$P_{н.б.} = p_{н.б.} \cdot F_{н.б.} \quad P_{в.б.} = p_{в.б.} \cdot F_{в.б.}, \quad (9.24)$$

где  $p_{н.б.}$ ,  $p_{в.б.}$ —рыбопродуктивность в нижнем и верхнем бьефах соответственно;  $F_{н.б.}$ ,  $F_{в.б.}$ —площадь нерестилищ в нижнем и верхнем бьефах соответственно.

Площадь нерестилища в нижнем бьефе определяется объемом попуска воды из водохранилища:

$$F_{н.б.} = K_{н.б.} \cdot Q_{п.} \quad (9.25)$$

где  $K_{н.б.}$ —коэффициент зависящий от формы русла и рельефа поймы.

Площадь нерестилища в верхнем бьефе:

$$F_{в.б.} = K_{в.б.} \cdot F_{в.} \quad (9.26)$$

где  $F_{в.}$ —площадь водохранилища;  $K_{в.б.}$ —коэффициент учитывающий рельеф местности и глубину водохранилища.

Площадь водохранилища зависит от полезного объема водохранилища и может быть определена по батиграфической кривой  $F_{в.} = f(V_{в.})$ . Объем водохранилища определяется формулой:

$$V_{в.}^i = V_{в.}^{*i} - W_{п.}^i \quad (9.27),$$

где  $V_{в.}^i$ —объем водохранилища в конце  $i$ -го месяца (первого месяца, в котором проводится рыбохозяйственный попуск);  $V_{в.}^{*i}$ —объем водохранилища в начале  $i$ -го месяца без учета рыбохозяйственного попуска;  $W_{п.}^i$ —объем рыбохозяйственного попуска в  $i$ -ом месяце.

Объем рыбохозяйственного попуска в  $i$ -ом месяце:

$$W_{п.}^i = Q_{п.}^i \cdot \tau \quad (9.28)$$

где  $Q_{п.}^i$ —расход рыбохозяйственного попуска в  $i$ -том месяце;  $\tau$ —продолжительность  $i$ -того месяца, млн.с.

Ограничения задаются по объемам вылова рыбы ( $R_{\min} \leq R_{в.б.} \leq R_{\max}$ ), объемам попусков ( $Q_{\min} \leq Q_{п} \leq Q_{\max}$ ), площади и объемы водохранилища. В результате получают зависимость рыбной продукции от разных вариантов режима наполнения и сработки водохранилища. Каждый вариант предусматривает работу водохранилища в определенный месяц года.

## 10. ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ФУНКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ

*Планирование и его принципы. Управленческое решение. Стадии управленческих решений. Эффективность управленческого решения. Требования к эффективности решений.*

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

### 10.1. 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 информации; 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.

## 10.2 Эффективность управленческого решения

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

- исходить из достижимых целей;
- наличие реальных ресурсов и времени;
- предусматривать механизм реализации;
- устойчивость при возможных ошибках при определении исходных 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:

$$K_k = 100 \times (P_v - P_n) / P_n,$$

где  $K_k$  – коэффициент качества управленческих решений (УР);  $P_n$  – количество принятых УР;  $P_v$  – количество выполненных УР;  $P_n$  – количество выполненных некачественных решений.

## 11. СЕТЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ВХС

*Понятие сетевого планирования и управления. Сетевой график.  
Характеристика и свойства графов. Сетевое планирование в  
условиях неопределенности. Оптимизация сетевых параметров.*

В управлении большими системами, в том числе и водохозяйственными системами, часто используются методы сетевого планирования. **Сетевое планирование и управление (СПУ)** — это метод планирования и управления деятельностью, на основе использования сетевого графика, как средства информации об объекте или процессе. **Сетевой график**—это модель, отражающая комплекс работ и событий, связанных с реализацией некоторой деятельности, в их логической и технологической последовательности и связи. Анализ сетевой модели позволяет:

- выявить взаимосвязи этапов деятельности;
- определить наиболее оптимальный порядок выполнения этапов.

Математический аппарат сетевых моделей базируется на теории графов. **Граф** - это множество вершин (А, Б, В,...) связанных между собой ребрами (дугами) (аб, ав, бв,...). Вершины называются событиями, и ребра (дуги) – работой. Ребра (дуги), имеющие общую вершину, называются смежными: аб и бв с вершиной Б). Граф отражает пути перехода от одной вершины к другой. **Путь** - это конечная последовательность ребер (дуг), в которой конец предыдущего ребра совпадает с началом следующего. Если выстраивается путь, в котором начальная вершина совпадает с конечной, то путь называется контуром. Самый большой путь называется критическим. Граф может быть ориентированным и неориентированным. В ориентированном графе связи вершин заданы дугами. Соответственно, неориентированный граф – вместо дуг имеет ребра. Это отличие позволяет учесть пути от одной вершины к другой и обратно (например, аб и ба), и возможность остаться в исходной вершине при переходе (например, дуга аа). Граф задается разными способами: графически или в виде матрицы.

В графическом графе указываются параметры работы и/или события (например, время или стоимость выполнения этапа).

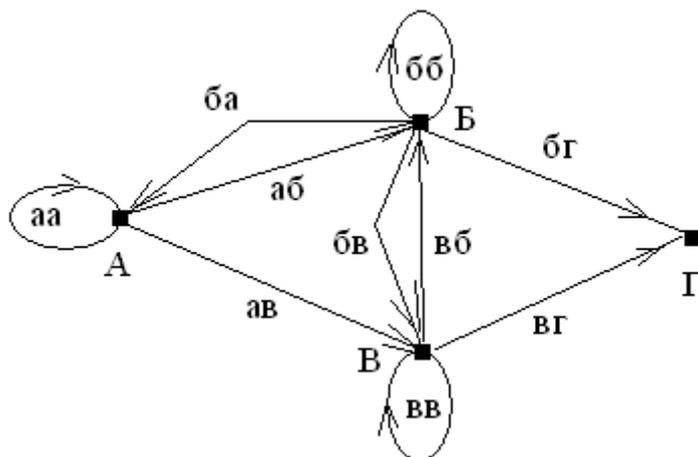


Рис.11.1 Ориентированный граф

(события: А, Б, В, Г; работы: аб, ав, бг, вг, аа и др.).

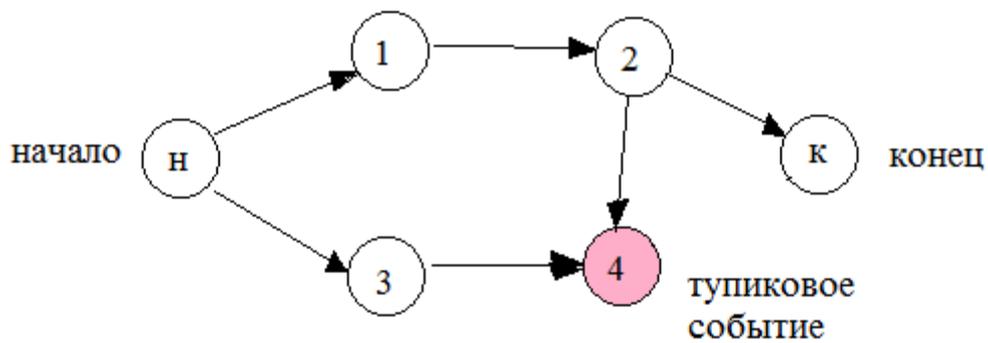
В матричном виде граф записывается как матрица работ или вершин. Так матрица вершин – это квадратная симметричная матрица, каждый элемент которой равен количеству ребер идущих от определенной вершины.

Матрица вершин ориентированного графа.

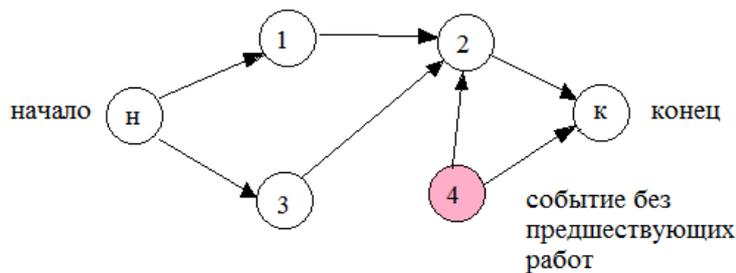
Вершина	А	Б	В	Г
А	1	1	1	0
Б	1	1	1	1
В	0	1	1	1
Г	0	0	0	0

Сетевая модель должна удовлетворять требованиям:

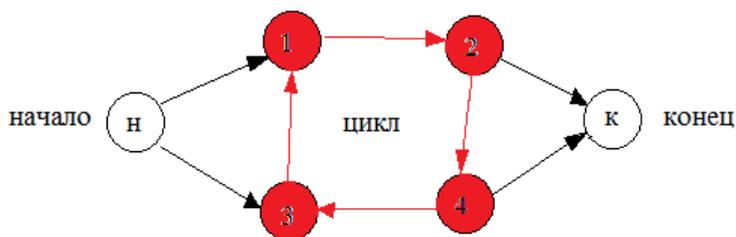
- отсутствие тупиковых событий (кроме конечного);



- отсутствие событий (кроме начального), которым не предшествует ни одна работа;



- отсутствие циклов.

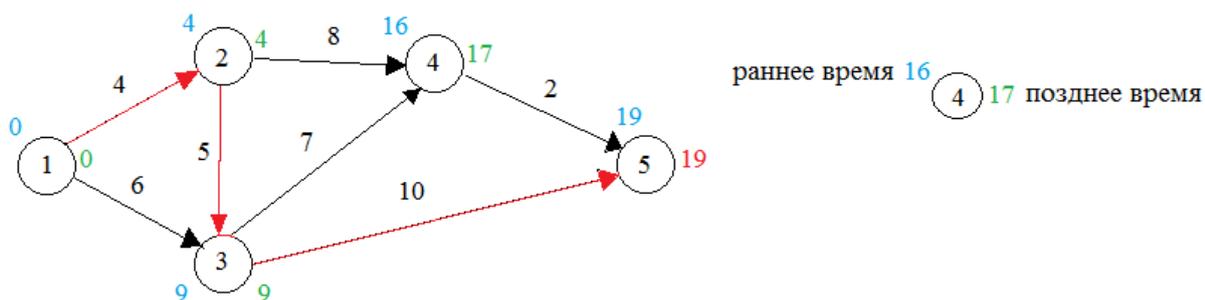


Характеристиками событий являются ранний и поздний срок совершения события и его резерв.

**Ранний срок**  $t_p(j)$  свершения события  $j$  – это самый ранний момент, к которому завершаются работы, предшествующие этому событию (для примера сетевой модели: ранний срок наступления события 7 равно  $6+5=11$ ; для события 5:  $6+3=9$ ):

$$t_p(j) = \max\{t_p(i) + t(i,j)\}$$

максимум берется по всем событиям  $i$ , непосредственно предшествующим событию  $j$ .



Дл

я события 2 раннее время равно 4. Событие 3 совершается двумя путями: (1-2-3) время равно  $4+5=9$ ; (1-3) время равно 6. Ранний срок определяется как максимум времени, т.е. 9.

**Поздний срок**  $t_n(i)$  свершения события  $i$  – это предельный момент, после которого остается минимум времени необходимого для выполнения работ, следующих за этим событием (для примера сетевой модели: поздний срок наступления события 7:  $6+5+1=12$ ; для события 5:  $6+4=10$ ).

$$t_n(i) = \min\{t_n(j) - t(i,j)\}$$

минимум берется по всем событиям  $j$ , непосредственно следующим за событием  $i$ . Поздний срок определяется обратным ходом.

В примере, для события 4 (путь 4-5) поздний срок равен  $19-2=17$ . Позднее время для события 2 определяется по минимальному времени путей:

$$(2-4-5) 19-2-8=9;$$

$$(2-3-4-5) 19-2-7-5=5;$$

$$(2-3-5) 19-10-5=4. \text{ Поздним сроком будет минимальное время 4.}$$

**Резерв  $R(i)$  события  $i$**  - это предельный срок задержки свершения события  $i$  без нарушения срока наступления завершающего события. Определяется как поздний срок минус ранний срок.

*В примере, для события 4 резерв составляет  $17-16=1$ . Работы, лежащие на критическом пути, резервов времени не имеют.*

Оптимизация сетевой модели, выражается в перераспределении ресурсов с ненапряженных работ на критические. Ускорение выполнения работ можно путем более точной оценки степени трудности своевременного выполнения всех работ. Для этих целей определяется коэффициент напряженности:

$$K_H(i,j) = (t(L_{\max}) - t_{кр}^*) / (t_{кр} - t_{кр}^*)$$

где  $t(L_{\max})$  — продолжительность максимального пути, проходящего через работу  $(i,j)$  (*например, для события 4 это путь 1-2-3-4-5: равный 18*);  $t_{кр}^*$  — продолжительность отрезка рассматриваемого пути (от рассматриваемого события до конца), совпадающего с критическим путем (*например, для события 4 это часть критического пути 3-5: равен 10*). Коэффициент напряженности для событий 4:

$$K_H(1,4) = (18 - 10) / (19 - 10) = 0,89$$

Коэффициент напряженности изменяется от нуля до единицы, причем, чем он ближе к единице, тем сложнее выполнить данную работу в установленный срок. Самыми напряженными являются работы критического пути, для которых коэффициент равен 1. На основе этого коэффициента все работы делятся на группы:

1. напряженные ( $K_H(i,j) > 0,8$ );
2. критические ( $0,6 < K_H(i,j) < 0,8$ );
3. резервные ( $K_H(i,j) < 0,6$ ).

Сложность сетевого графика определяется коэффициентом сложности, который равен отношению количества работ к количеству событий:

$$K_c = N_p / N_c$$

Для рассматриваемого примера  $K_c=7/5=1,4$ . Если коэффициент сложности находится в пределах 1...1,5 график считается простым; 1,5...2 – средней сложности, более 2 – сложными. Более простая схема управления предпочтительнее.

### 11.1 Сетевое планирование в условиях неопределенности

Продолжительность выполнения работ может задаваться в виде минимального и максимального срока. Минимальный срок  $t_{min}$  характеризует продолжительность выполнения работы при наиболее благоприятных условиях, а максимальный срок  $t_{max}$  — при наиболее неблагоприятных. Таким образом продолжительность работы представляет случайную величину и ее ожидаемое значение  $t_{ож}$  оценивается по формуле:

$$t_{ож}(i,j)=[3 \times t_{min}(i,j)+2 \times t_{max}(i,j)]/5$$

Степень отклонения вероятных значений срока выполнения работы от ожидаемого, характеризуется дисперсией  $S^2$ :

$$S^2(i,j)=[t_{max}(i,j)-t_{min}(i,j)]^2/25$$

Для построения вероятностной сетевой модели решаются дополнительные задачи:

- определение вероятности того, что критический путь  $t_{кр}$  превысит нормативное время выполнения работ  $T$ :  $P(t_{кр} < T)$ ;
- определение максимального срока выполнения комплекса работ  $T$  при заданном уровне вероятности  $P$ .

Вероятность того, что критический путь  $t_{кр}$  превысит нормативное время выполнения работ  $T$  определяется по формуле:

$$P(t_{кр} < T)=0,5+0,5 \cdot \Phi(z),$$

$$z=(T-t_{кр})/S_{кр};$$

где  $z$  - нормированное отклонение случайной величины (см. табл.9.1);  $S_{кр}$  - среднеквадратическое отклонение, вычисляемое как корень квадратный из дисперсии продолжительности критического пути.

Вероятность  $P(t_{кр} < T) \geq 0,8$  предполагает своевременность выполнения комплекса работ.

Максимальный срок выполнения комплекса работ  $T$  при заданной вероятности  $P$  определяется по формуле:

$$T = t_{ож}(L_{кр}) + z \times S_{кр}$$

Табл.11.1

Координаты функции стандартного нормального распределения

$z$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\Phi z$	0,0797	0,1585	0,2358	0,3108	0,3829	0,4515	0,5161	0,5763	0,6319	0,6827
$z$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$\Phi z$	0,7287	0,7699	0,8064	0,8385	0,8664	0,8904	0,9104	0,9281	0,9545	0,9643
$z$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
$\Phi z$	0,9722	0,9786	0,9836	0,9876	0,9907	0,9931	0,9949	0,9963	0,9975	0,9980

Пример сетевой модели.

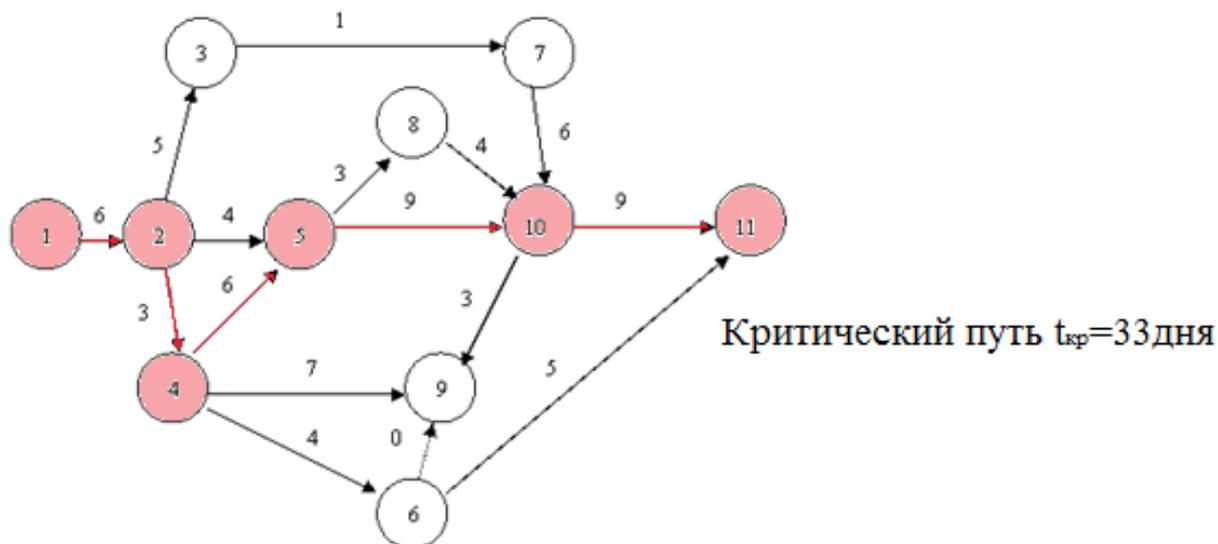


Рис.11.2 Ориентированный граф

Работы и события модели заданы в таблице. Требуется:

- рассчитать характеристики сетевой модели;
- оценить вероятность выполнения комплекса работ за  $T=35$  и  $30$  дней;

- оценить максимально возможный срок выполнения всего комплекса работ с вероятностью 95%.

$$t_{ож}(i,j)=[3 \times t_{\min}(i,j)+2 \times t_{\max}(i,j)]/5$$

$$t_{ож}(1,2)=(3 \cdot 5+2 \cdot 7,5)/5=6$$

$$t_{ож}(2,3)=(3 \cdot 4+2 \cdot 6,5)/5=5;$$

$$S^2(i,j)=[t_{\max}(i,j)-t_{\min}(i,j)]^2/25$$

$$S^2(1,2)=(7,5-5)^2/25=0,25;$$

$$S^2(2,3)=(6,5-4)^2/25=0,25.$$

Табл.11.2

Определение ожидаемой продолжительности работ и дисперсии  
(сетевой модели показанной на рис.11.2).

Работа (i,j)	Продолжительность (исходные данные)		Ожидаемая продолжительность $t_{ож}(i,j)$	Дисперсия $S^2(i,j)$
	$t_{\min}(i,j)$	$t_{\max}(i,j)$		
(1.2)	5	7.5	6	0.25
(2.3)	4	6.5	5	0.25
(2.4)	3	6	3	1.00
(2.5)	1	5.5	4	0.25
(3.7)	0.5	3.5	1	0.36
(4.5)	5	7.5	6	0.25
(4.6)	3	5.5	4	0.25
(4.9)	5	10	7	1.00
(5.8)	2	4.5	3	0.25
(5.10)	7	12	9	1.00
(6.9)	0	0	0	0.00
(6.11)	3	8	5	1.00
(7.10)	4	9	6	1.00
(8.10)	2	7	4	1.00
(9.10)	1	6	3	1.00
(10.11)	8	10.5	9	0.25

Критический путь (1, 2, 4, 5, 10, 11), а его продолжительность равна  $t_{кр}=t_{ож}=33$  дня. Дисперсия критического пути составляет:

$$S^2_{кр}=S^2(1,2)+S^2(2,4)+S^2(4,5)+S^2(5,10)+S^2(10,11)=$$

$$=0,25+1,00+0,25+1,00+0,25=2,75.$$

Среднеквадратическое отклонение равно корню квадратному из дисперсии  $S_{кр}=1,66$ . Вероятность выполнения комплекса работ за 30 и 35 суток составит:

$$P(t_{кр}<30)=0,5+0,5 \cdot \Phi\{(30-33)/1,66\}=0,5-0,5 \cdot \Phi(1,8)=0,5-0,5 \cdot 0,95=0,025$$

$$P(t_{кр}<35)=0,5+0,5 \cdot \Phi\{(35-33)/1,66\}=0,5+0,5 \cdot \Phi(1,2)=0,5+0,5 \cdot 0,77=0,885$$

Таким образом, вероятность выполнения комплекса работ более чем за 35 дней, составляет 88,5%, а за 30 дней - 2,5%.

Оценка максимально возможного срока выполнения комплекса работ с вероятностью 95% требует определения значения аргумента  $z$  для заданной вероятности. Для  $\Phi(z)=95\%$  по таблице берется значение  $z=1,9$ . Максимальный срок выполнения всего комплекса работ при заданной вероятности  $P=95\%$  составляет:

$$T=t_{ож}(L_{кр})+z \cdot S_{кр}=33+1,9 \times 1,66=36,2 \text{ дн.}$$

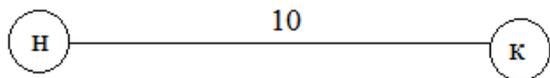
## 11.2 Оптимизация сетевых параметров

Оптимизация сетевого графика проводится по времени и ресурсам. Цель оптимизации:

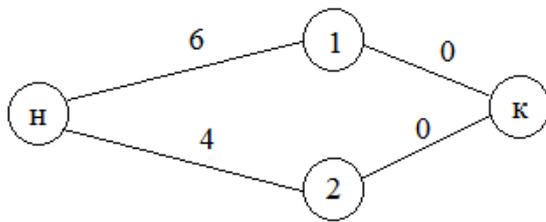
- по времени – сократить продолжительность критического пути. (Учитываются коэффициенты напряженности путей. Оптимизация использует резервы работ путей с минимальными коэффициентами напряженности  $K_n \leq 0,8$ );
- по ресурсам – выровнять загрузку на исполнителей и сократить численность занятых.

Оптимизация сетевого графика проводится путем:

- изменения схемы сетевого графика, например, путем разделения продолжительной работы на несколько работ, выполняемых параллельно;

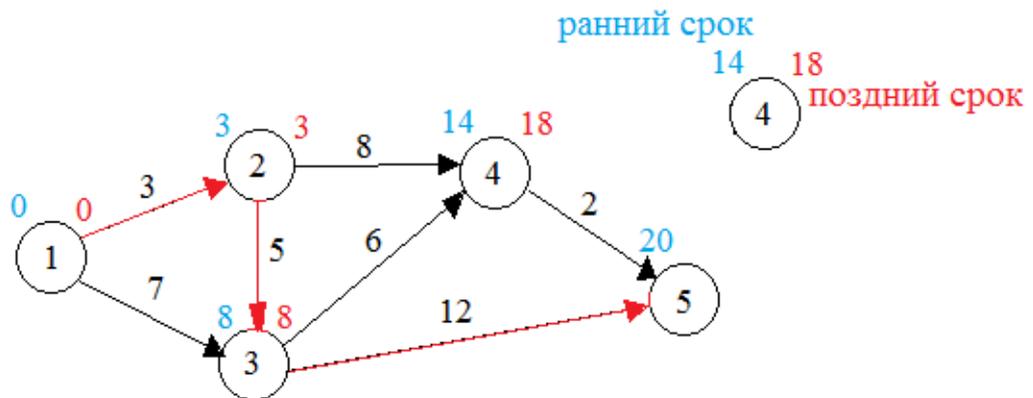


продолжительность пути 10

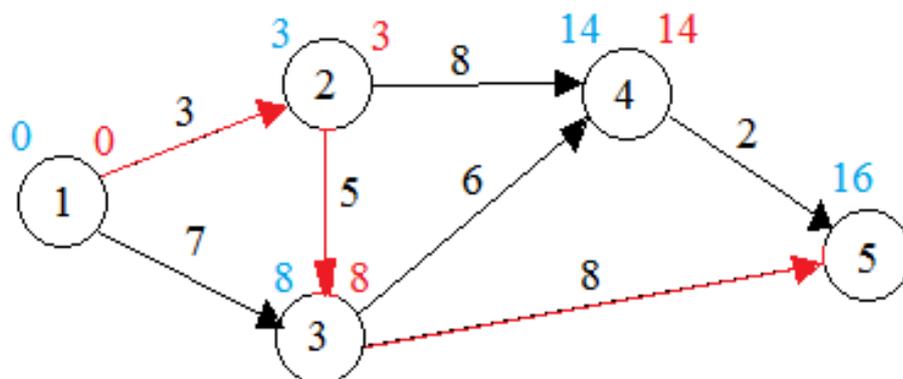


продолжительность определяется максимальной работой и равна 6

- изменения сроков начала и окончания работ ненапряженных путей в пределах их полного резерва времени.



Наименее напряженная работа на пути 1-4.  $K_n(1,4) = (16-12)/(20-12) = 0,5$ . Пусть имеется возможность использования ресурсов события 4 для ускорения работ дуги 3-5. Имеющийся резерв события 4:  $18-14=4$  отдается для снижения времени выполнения работы 3-5:  $12-4=8$ .



Общая продолжительность работ снизилась с 20 до 16.

## **12.УПРАВЛЕНИЕ СТАТЬЯМИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА**

*Управление статьями водохозяйственными балансами. Сравнение методов управления водохозяйственными балансами. Методы управления. Оптимизация ВХБ. Критерии оптимизации. Целевые функции. Методы достижения компромиссов при решении многоцелевых задач управления ВХБ.*

**Управление водными ресурсами** - это процесс планирования, организации, мотивации и контроля водохозяйственной деятельности, для достижения поставленных целей. Цель управления состоит в разработке механизмов, для достижения результатов водохозяйственной деятельности на основе рационального использования водных ресурсов. В связи с этим требуют решения следующие задачи.

1. Планирование деятельности – позволяет определить цель деятельности и наиболее эффективные методы ее достижения.

2. Организация деятельности - создание условий для достижения целей

3. Мотивация – позволяет привлечь внимание к решению вопроса и стимулировать деятельность для достижения цели.

4. Контроль – позволяет в полной мере реализовать функции управления, путем организации обратной связи между руководящими и исполнительными структурами.

В случае, если результирующая часть годового или внутригодового (за отдельные месяцы) ВХБ отрицательна, применяются методы управления статьями водохозяйственного баланса. Методы разделятся на две группы в направленные на изменение приходной (увеличение) или расходной (уменьшение) части.

### **12.1 Увеличение объемов 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  $W_{пов}$  и подземной составляющих  $W_{под}$ .

$$W_p = W_{пов} + W_{под}$$

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 объёма 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.

## 12.2 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 дулексные 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 5-10л/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 непроеводительных 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 противоточных мероприятий, лесопосадки по берегам открытых водотоков и водоемов (для снижения испарения).

### **12.3 Имитационное моделирование ВХС**

Водное хозяйство, посредством водохозяйственных систем (ВХС), решает задачи водообеспечения населения и отраслей экономики, охраны водных объектов и контроля негативных проявлений вод. Основным инструментом контроля, планирования и управления водными ресурсами служит водобалансовая модель водохозяйственной системы. Специфические требования к данным моделям связаны с необходимостью учета в них:

- пространственного размещения водотоков и водопользователей;
- природных, технологических и информационных связей между элементами ВХС.

В составе имитационной модели выделяют группы переменных:

- экзогенные - входные переменные модели;
- эндогенные - переменные модели. К ним относятся и параметры характеризующие качество управления;
- переменные управления - выбираются управляющим органом системы.

**Водобалансовая модель для участка реки на момент времени  $t$**  учитывает переменные характеризующие режим использования водных ресурсов (причина) и следствия их использования.

*Переменные характеризующие режим использования водных ресурсов:*

$W_{pj-1}$  - приток воды на рассматриваемый участок с вышележащего участка;  $\Delta W_{pj}$  - речной сток, сформированный на рассматриваемом участке;  $W_{пзj}$  - водозабор из подземных горизонтов;  $W_j$ - водопотребление на j-м участке;  $W_{ввj}$ - возвратные воды, сбрасываемые вj-ом участке.

Переменные характеризующие следствия использования водных ресурсов:  $\Delta V_j$ - объем воды аккумулируемый (-) или сбрасываемый (+) из водохранилища;  $W_{перj}$ - переброска стока на j-м участке;  $W_{фj+1}$ - поступление воды на ниже расположенный (j+1)-й участок;  $W_{ущj}$  - ущерб речному стоку за счет использования подземных вод гидравлически связанных с рекой;  $\Pi_j$ - суммарные потери воды из водохранилища.

Переменные управления:

$\Pi P_j$ - правила ограничения нормативного водопотребления;  $\Pi П_j$  - правила ограничения попусков на нижележащий участок.

Имитационная модель имеет вид:

$$W_{ф(j+1)} = W_p(j-1) + \Delta W_p(j) + W_{пз(j)} \pm W_{пер(j)} + W_{вв(j)} - W(j) - W_{ущ(j)} - \Pi(j) \pm \Delta V(j)$$

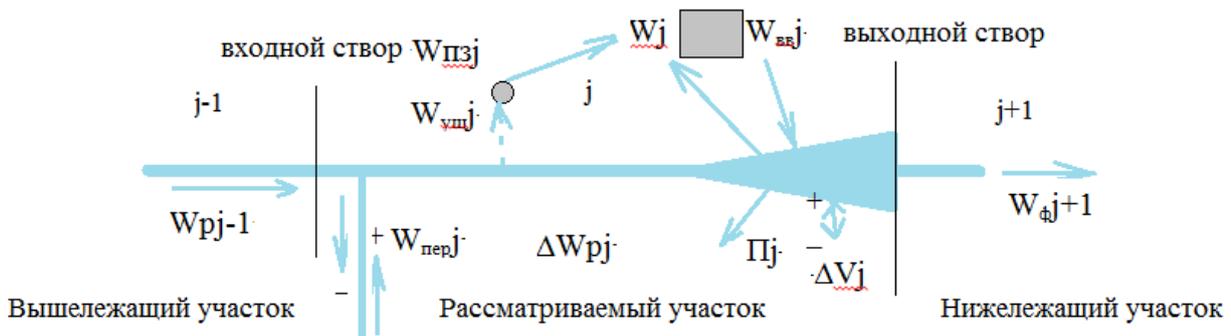
$$W_j = \Pi P_j \quad W_{ф(j)} \geq \Pi П_j \quad W_p(j-1) = f(Oc, E, A) \quad \Delta W_p(j) = f(Oc, E, A),$$

$$W_j = K_{вв} \times W_{вв(j)} \quad W_j = \sum W_{ij} \quad W_{вв(j)} = \sum W_{ввij}$$

где  $Oc, E$  - соответственно осадки и суммарное испарение на водосборной площади;  $A$  - влияние на речной сток антропогенной деятельности проводимой на водосборной площади;  $K_{вв}$  - коэффициент возвратных вод.

$$\Pi_j = f(W_j, W_{ф(j+1)}, T) \quad \Delta V_j = f(W_j, W_{ф(j+1)}, T),$$

где  $T$ - топографические характеристики ложа водохранилища.



Алгоритм имитационного расчета включает:

1. определение переменных;
2. расчет составляющих водохозяйственного баланса для каждого водохранилища;
3. расчеты по балансовой модели для каждого интервала времени  $\tau$ ;
4. анализ результатов балансовых расчетов;
5. корректировка составляющих ВХБ или правил управления водохранилищем.
6. повторение расчетов.

#### **12.4 Целевые показатели при оптимизации водохозяйственных балансов**

Управление водными ресурсами осуществляется в условиях их ограниченности и использования участниками водохозяйственного комплекса (ВХК). Требования участников разнообразны (*например, к режиму подачи воды, уровням, глубинам и т.п.*), часто противоречивы. Удовлетворение всех требований в процессе управления осуществляется на основе водохозяйственных балансов. Водохозяйственный баланс представляет собой модель водохозяйственной системы. Поэтому он используется для оптимизации ее параметров. При оптимизации решаются вопросы:

- формирование состава водопользователей ВХК;
- оптимизация параметров комплексных сооружений гидроузла (*например, объема водохранилища, расчетной обеспеченности стока реки;*
- объемов переброски стока;
- режима пропуска воды в нижний бьеф и др.

Критериями оптимизации могут выступать:

- суммарный чистый доход, при этом оптимальное значение параметра оптимизации получают при максимальном значении чистого дохода (*используется при водораспределении, выборе вариантов управления водными ресурсами*);

- минимизация суммарных затрат (*используется при сравнении вариантов управления приходной части баланса, сравнении вариантов природоохранных мероприятий*);
- минимизация времени выполнения работ (*используется при определении варианта ликвидации аварий, проведения противопаводковых работ*).

### **13.ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ КАК СРЕДСТВО ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВХС**

*Диспетчерское управление. Определение ущербов от ограничения водоподачи при оперативном управлении режимами комплексных гидроузлов.*

Оперативное управление гидроузлами осуществляется с помощью диспетчерских графиков, которые позволяют регулировать режим наполнения и сработки водохранилища. В условиях дефицита воды появляется необходимость ограничения водоподачи отдельных участников водохозяйственного комплекса, что ведет к снижению объемов выпускаемой продукции. Величина наносимого ущерба учитывается в принятии решений при оперативном водораспределении.

#### **13.1 Диспетчерское управление гидроузлом**

Наполнение и сработка водохранилищ осуществляется с помощью диспетчерских графиков. **Диспетчерский график - это графическое воплощение правил управления режимом водоема, регламентирующий порядок его наполнения и сработки.** Строится график на основе анализа работы водохранилища в гидрологических условиях года и его периодов для расчетных обеспеченностей. Построение графиков осуществляется на основе воднобалансовых расчетов. На диспетчерских графиках по оси ординат откладывается объём водохранилища (или уровни воды в верхнем бьефе), по оси абсцисс – время (например, месяц). Координатное поле графика разделено на несколько зон, каждая из которых соответствует определенному режиму работы водохранилища. Выделяют *зоны: 1- сбросов , 2 - повышенной отдачи, 3 - гарантированной отдачи, 4- ограниченной отдачи.* Эти зоны ограничиваются соответствующими линиями наполнения и сработки воды в водохранилище. Выделяют: *1 - противосбросовую линию (ПСЛ), 2 - противоперебойную (ППЛ) , 3 - Линии ограниченной подачи (ЛОП).* В случае, если водохранилище работает для срезки пиков половодья, то строится и *противоаварийная линия (ПАЛ).*

Построение диспетчерского графика начинается с отбора наиболее неблагоприятных в гидрологическом смысле лет (3...5). Расчетный гидрограф стока принимается для конкретной обеспеченности стока реки, например: для построения ЛОП - принимается обеспеченность 95%, ППЛ - 75% (основная расчетная обеспеченность используемая для проектирования сооружений), ПСЛ - 25%. Все расчетные линии диспетчерских графиков имеют ветвь наполнения водохранилища и ветвь сработки. Их построение проводится на основе увязанных месячных балансов ( $\sum MBXB_i=0$ ), начиная с многоводного периода года. *Многоводным считается период в течении которого несколько месяцев подряд месячные балансы положительны.* Весь оставшийся период года считается маловодным. По многоводному периоду рассчитывается ветвь наполнения, а по маловодному - ветвь сработки водохранилища.

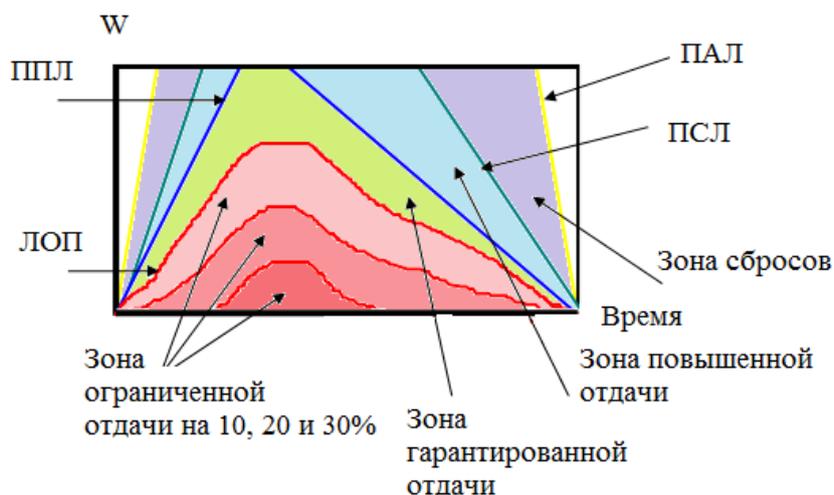


Рис.13.1 Вид диспетчерских графиков

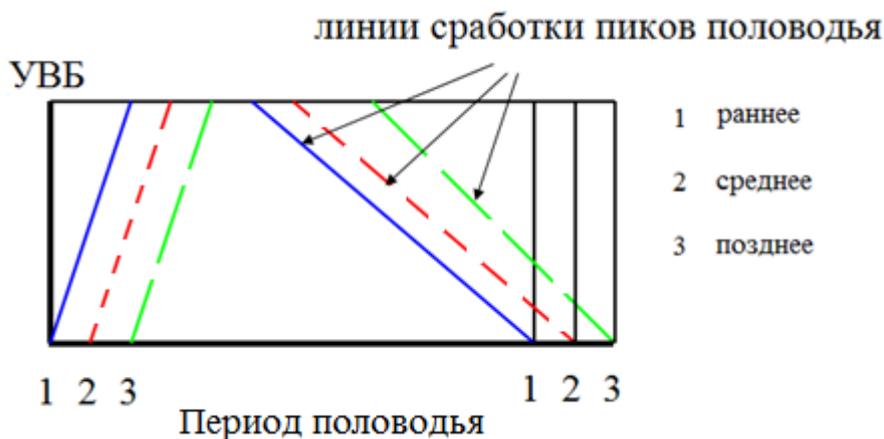


Рис.13.2 График ПШЛ для разных периодов начала и конца половодья.

Управление осуществляется с учетом зоны диспетчерского графика. Так попадание в зону ограниченной подачи приоритетные участники (например, КБХ, ТЭС, АЭС) получают воду по полной норме, а остальные участники ВХК ограничиваются водой до 20%. Попадание в зону гарантированной подачи позволяет обеспечивать всех участников ВХК по полной норме. В зоне сбросов, осуществляются холостые сбросы через водосбросные сооружения.

### 13.2 Определение ущербов от ограничения водоподачи при оперативном управлении режимами комплексных гидроузлов

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

$$УЩ_{np} = C_{np} \times \Delta B_{np} = C_{np} \times \Delta W \times \eta_{np} / q_{np}$$

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

$$УЩ_{op} = C_{op} \times S \times y_{max} \times F_{op}$$

$$S = \left[ \frac{(w_{opt} - w_o) \cdot \frac{M_{пл} - \Delta M}{M_{opt}} + w_o}{w_{opt}} \right]^{y \cdot w_{opt}} \cdot \left[ \frac{1 - \left( (w_{opt} - w_o) \cdot \frac{M_{пл} - \Delta M}{M_{opt}} + w_o \right)}{(1 - w_{opt})} \right]^{y \cdot (1 - w_{opt})}$$

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

$$M_{пл} = W_{op} \times \eta_{op} / F_{op} \quad \Delta M = \Delta W_{op} \times \eta_{op} / F_{op}$$

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 ( $\mu$ ):

$$\sum \mu_i \times УЩ_i \rightarrow \min$$

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

$$B_i \geq B_{рент i}$$

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

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

$$\mu_{пр} = \frac{УЩ_{пр}}{УЩ_{пр} + УЩ_{ор}} \quad \mu_{ор} = \frac{УЩ_{ор}}{УЩ_{пр} + УЩ_{ор}} \quad \text{при условии } \mu_{пр} + \mu_{ор} = 1$$

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).

#### 14. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОД

*Качество воды. Принятие решения о выборе вида водоохраных мероприятий. Оптимизация способа охраны вод по экономическому и экологическому критериям. Понятие качества природной среды. Прогноз ущербов окружающей среде при использовании водных ресурсов. Принятия решений о выборе способа предотвращения и уменьшения негативных последствий.*

**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 рекомендуется 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 формируется 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 водоохраной 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 ( $C_{\text{н}}$ ):

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

**Эколого-экономическое обоснование** водоохранных мероприятий (одного или набора мероприятий) сводится определению их экологической эффективности и затрат на их проведение.

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

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

- Экономические затраты на проведение водоохранных мероприятий должны быть минимальными.

$$\mathcal{Z}_{\text{ВОМ}} \rightarrow \min$$

**Учет экологических условий** проводится путем определения набора водоохранных мероприятий, необходимых для достижения требуемого класса качества воды. Определить набор требуемых водоохранных 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:

$$\Theta_{i,j}^{BOM} = 1 - (1 - \Theta_i) \times (1 - \Theta_j),$$

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:  $1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,3) = 0,44$ .

Табл.14.1

Первоначальная матрица попарной эффективности водоохранных мероприятий.

BOM	i	1	2	3	4
j	0*	<b>0,1</b>	0,2	0,3	0,7
1	<b>0,1</b>	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:

$$\Theta_{i,j+1} = 1 - (1 - \Theta_j) \times (1 - \Theta_{i,1})$$

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

$$\Theta_{(1,2),1} = 1 - (1 - \Theta_2) \times (1 - \Theta_{2,1}) = 1 - (1 - 0,2) \times (1 - 0,28) = 0,424$$

Табл.14.2

Матрица эффективности водоохранных мероприятий (второе приближение).

BOM	i	1,2	3	4
j	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.

Табл.14.3

Матрица эффективности водоохранных мероприятий (третье приближение).

BOM	i	1,2,3	4
-----	---	-------	---

j	0	0,75	0,98
1,2,3	0,75	0	0,79
4	0,98	0,79	0

Табл.14.4

Матрица эффективности водоохранных мероприятий  
(четвертое приближение).

ВОМ	i	1,2,3,4
j	0	0,99
1,2,3,4	0,99	0

Результат ранжирования можно выразить в виде дендрограммы, которая отражает пути достижения требуемой эффективности (рис.14.1).

4.Требуемая эффективность определяется по формуле:

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

где  $K_{\text{пз}}^{95\%}$ ,  $K_{\text{пз}}^{\Phi}$  – 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.

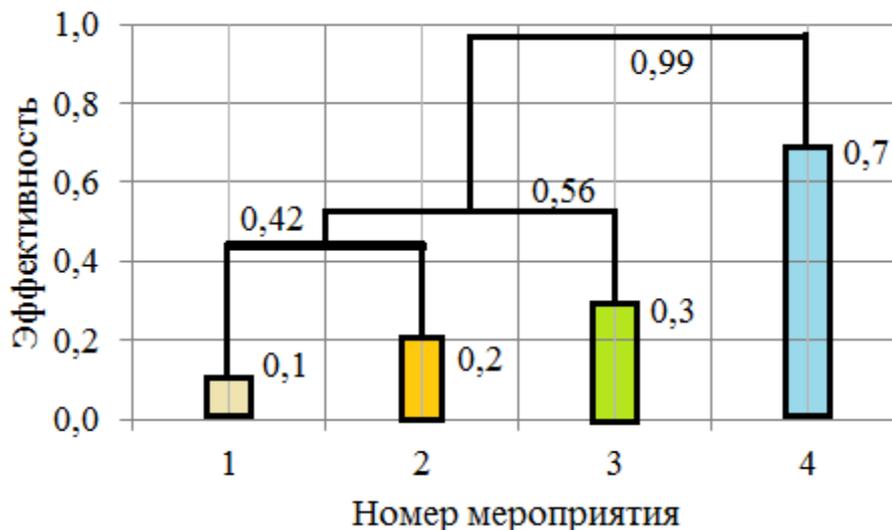


Рис. 14.1 Дендрограмма объединения водоохранных мероприятий (табл. 14.3) в группы, обеспечивающие достижение максимальной эффективности.

Полученные матрицы позволяют каждому классу качества воды поставить набор мероприятий, с помощью которого достигается заданный (в данном примере фоновый) уровень (табл.14.4). При этом соблюдается условие: эффективность набора мероприятий ( $\mathcal{E}^{BOM}$ ) должна быть не менее требуемой ( $\mathcal{E}_{тр}$ ):  $\mathcal{E}^{BOM} \geq \mathcal{E}_{тр}$ .

Табл.14.4

Ранжирование водоохраных мероприятий по классу качества воды.

Класс	$\mathcal{E}_{тр}, \%$	Водоохраные мероприятия	$\mathcal{E}^{BOM}, \%$
Загрязненный	67	Обустройство водоохранной зоны	70
Грязный	80	Озеленение, обустройство водоохранной зоны	91,9
Очень грязный	90	Регулярная уборка территории, озеленение, замена грунтовых покрытий на твердые и газоны, обустройство водоохранной зоны	99

**Учет экономических показателей.** По данным предыдущих расчетов получено несколько наборов водоохраных мероприятий, из которых путем проведения оптимизационных расчетов определяется вариант с минимальными затратами. Например, для требуемой эффективности BOM  $\mathcal{E}_{тр}=75\%$ , 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.

## 15.МЕТОДЫ 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 Умах (критерий оптимальности). Целевая функция в данном случае это зависимость урожайности от оросительной нормы  $Y=f(M)$ .*

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 функций, 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.

Методы оптимизации позволяют решать задачи определения экстремального значения критерия. Из известных методов выбирается тот, который позволяет наилучшим образом решить задачу, при этом учитываются факторы:

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

**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.м<sup>3</sup>. Зависимость чистого дохода получаемого первым и вторым предприятием определяются уравнениями:*

$$\text{ЧД}_1=c_1 \times V_1 \times \eta_1 / q_1 \quad \text{ЧД}_2=c_2 \times V_2 \times \eta_2 / q_2 \quad \Sigma \text{ЧД}=c_1 \times V_1 \times \eta_1 / q_1 + c_2 \times V_2 \times \eta_2 / q_2$$

*Если  $\eta_1=\eta_2=0,95$  – коэффициенты полезного действия системы водоснабжения;  $q_1=500\text{м}^3/\text{т}$ ,  $q_2=800\text{м}^3/\text{т}$  – нормы водопотребления для выпуска единицы продукции;  $c_1=100\text{уе}$ ,  $c_2=300\text{уе}$  – условные единицы стоимости продукции.*

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

*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  $B_1 \leq B_{1\max} = 0,12$   $B_2 \leq B_{2\max} = 0,07$   
 данным объемам производства продукции соответствуют объемы воды  
 $V_{1\max} = 64$   $V_{2\max} = 60$

Данная задача может быть решена графически.

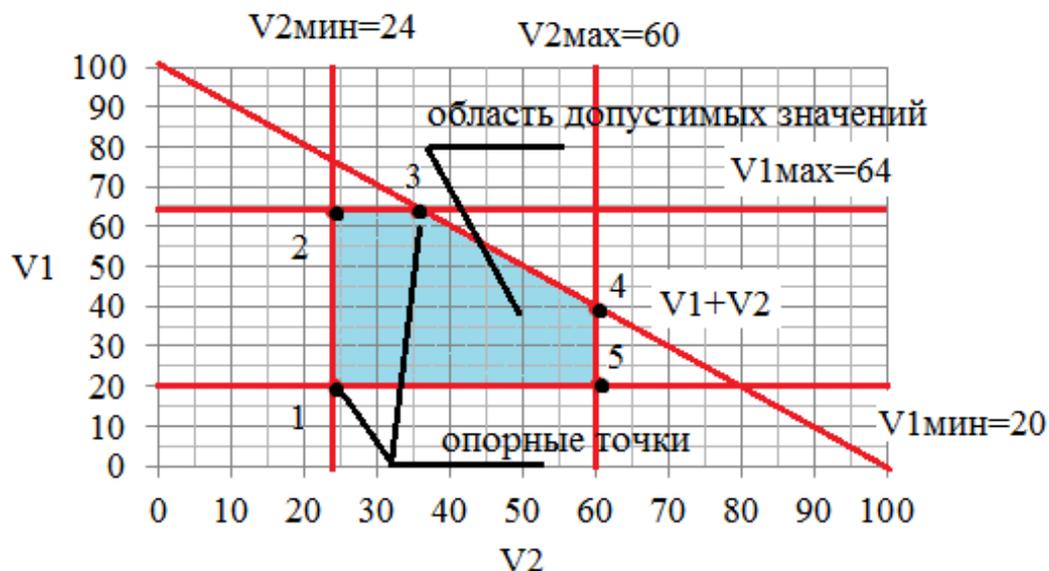


Рис.13.1 Определение области решений и опорных точек.

Табл.13.1

Определение оптимального плана водораспределения по критерию  
 максимального суммарного чистого дохода

Опорная точка	$V_1$	$V_2$	$\Sigma ЧД$
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  $V_1 = 40 \text{ млн. м}^3$  и  $V_2 = 60 \text{ млн. м}^3$  при максимальном суммарном чистом доходе  $\Sigma ЧД_{\max} = 29,2 \text{ уе.}$

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

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

$$V_i = q_i \times V / \sum q_i$$

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

$$q_i = B_i / W_i$$

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.м<sup>3</sup> между двумя предприятиями:*

Параметры	Предприятие 1	Предприятие 2	Сумма
Норма водопотребления, м <sup>3</sup> /т	300	500	-
$q_i$ , т/м <sup>3</sup>	0,0033	0,002	0,0053
Приведенное значение $q_i / \sum q_i$	0,62	0,38	1
$V_i$	62	38	100

Данный метод позволяет учитывать экономическую эффективность использования воды и проводимые мероприятий 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:

$$V_i = \frac{V \times \sqrt{B_i}}{\sum \sqrt{B_i}}$$

Например, требуется распределить объем вод  $V=100\text{млн.м}^3$  между двумя предприятиями:

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

## 16.УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

*Понятие качества природной среды. Прогноз ущербов окружающей среде при использовании водных ресурсов. Методы принятия решений о выборе способа предотвращения и уменьшения негативных последствий.*

**Качество природной среды** - способность обеспечивать функционирование экологических систем, комфортность жизнедеятельности человека и сохранность физико-географической основы территориальных природно-ресурсных комплексов. Характеристикой качества природной среды является ассимиляционный потенциал. **Ассимиляционный потенциал** — способность природных объектов переработать вредное антропогенное воздействие без изменения свойств. Ассимиляционный потенциал водных объектов оценивают нормативами допустимого воздействия (НДВ). **Норматив допустимого воздействия (НДВ) на водные объекты** – это допустимое совокупное воздействие всех источников на водный объект. Разработка нормативов НДВ на водные объекты осуществляется в соответствии с **Методическими указаниями по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты: утверждена приказом МПР РФ от 12 декабря 2007 г. N 328**. Норматив НДВ учитывает сброс в водные объекты загрязняющих веществ и изъятие воды. Фактическое воздействие (G) не должно превышать нормативное:

$$G \leq \text{НДВ}$$

Экономической оценкой ассимиляционного потенциала служит величина предотвращенного ущерба от осуществления водоохранной деятельности [**Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба: утверждена Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды 09 марта 1999г**]. **Ущерб от загрязнения водных объектов (У)** - это материальные и финансовые потери и убытки (прямые и косвенные), в результате снижения биопродуктивности водных экосистем, ухудшения потребительских свойств воды, дополнительных затрат на ликвидацию последствий загрязнения вод и восстановление их качества, а также выраженный в стоимостной форме вред здоровью населения. Результатом управления качеством природной среды должен быть минимальный ущерб, наносимый ей антропогенной деятельностью:

$$\sum U \rightarrow \text{мин.}$$

Количественной мерой экологической опасности антропогенной деятельности служит величина риска. **Экологический риск** – вероятность проявления экологической опасности, которая оценивается наносимым максимальным ущербом. Экологический риск измеряется:

- фактическими показателями ущерба (число жертв, число разрушенных объектов, величины недополученного урожая и недополученной промышленной продукции и др.);
- возможным уровнем загрязнения природной среды;
- возможными размерами ухудшения качества природных ресурсов, деградации природных систем.

Обычно объект считается безопасным если риск его использования не превышает  $10^{-6}$ . Если же оценки риска составляют  $10^{-5}$  и более, принимается решение об осуществлении комплекса мер по снижению экологической опасности. Поэтому при управлении качеством природной среды величина риска ( $p$ ) используется в качестве ограничения хозяйственной деятельности.

$$p \leq p_{\text{доп.}}$$

Оценка изменения качества среды, в результате антропогенной деятельности, и разработка вариантов управления основана на прогностических расчетах. Цель прогноза - обоснование деятельности по управлению качеством среды. Задачи прогноза заключаются в оценке величины ущербов, обоснования варианта компенсационных мероприятий, и включают:

- выявление источников негативного воздействия на среду (*например, создание водохранилища (источник) приводит к затоплению и подтоплению прилегающих земель*);
- определение зависимости, позволяющей оценить реакцию среды на воздействие (*например, подтопление земель приводит к снижению продуктивности растений ( $U_p$ ) произрастающих на подтопленных площадях ( $F_n$ ), в результате подъема уровня грунтовых вод (УГВ):  $U_p = f(\text{УГВ})$* );

- оценка величины ущерба на основе проведения прогностических расчетов (пример, для оценки экономического ущерба, используется величина стоимости урожая ( $c$ , руб/га). Ущерб ( $\Delta C$ , руб) определяется на основе сравнения урожая культуры, получаемого с площадей попавших в зону подтопления, задаваясь значениями глубины залегания уровня грунтовых вод, соответственно до ( $U^{\text{до}p}$ ) и после ( $U^{\text{вод}p}$ ) создания водохранилища:

$$\Delta C = c \times (U^{\text{до}p} - U^{\text{вод}p}) \times F_n, \text{ руб/год}$$

$$U^{\text{до}p} = f(UГВ^{\text{до}}); \quad U^{\text{вод}p} = f(UГВ^{\text{вод}})$$

- рассмотрение вариантов компенсации ущербов, для выбора управляющего решения (для контроля подтопления земель применяются береговой дренаж, поэтому определяются суммарные ежегодные затраты на его строительство и эксплуатацию ( $Z$ , руб/год). Если данные затраты меньше ущерба  $Z < \Delta C$ , то данное мероприятие принимается к осуществлению. В противном случае, инженерно-технические мероприятия не проводятся).

Выбор способа предотвращения и уменьшения негативных последствий осуществляется разными методами, включая:

- методы однокритериальной оптимизации (в случае, 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).

Все методы основаны на сравнении предлагаемых мероприятий по одному или нескольким  $i$ -м критериям  $KP_i$ . Оптимизация по одному критерию позволяет получить наилучшее решение по данному критерию.

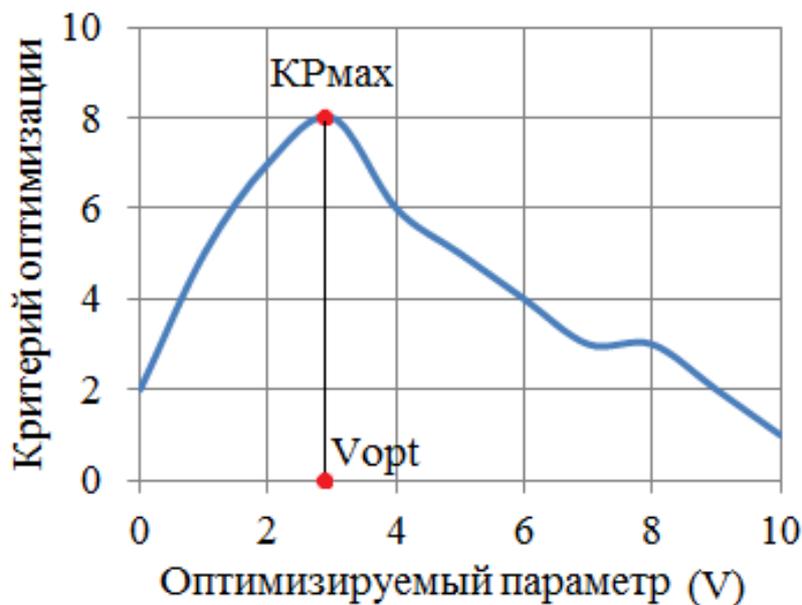


Рис.16.1 Однокритериальная оптимизация

Критерии могут максимизироваться и минимизироваться, в зависимости от их природы. Например, критерий чистого дохода устремляется в максимум  $KP_{чд} \rightarrow \max$ , а критерий учитывающий экологический ущерб-минимизируется  $KP_{ущ} \rightarrow \min$ . В целом, задача заключается в поиске некоторого компромиссного варианта, наилучшим образом отвечающим требованиям. На рисунке 16.2 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.

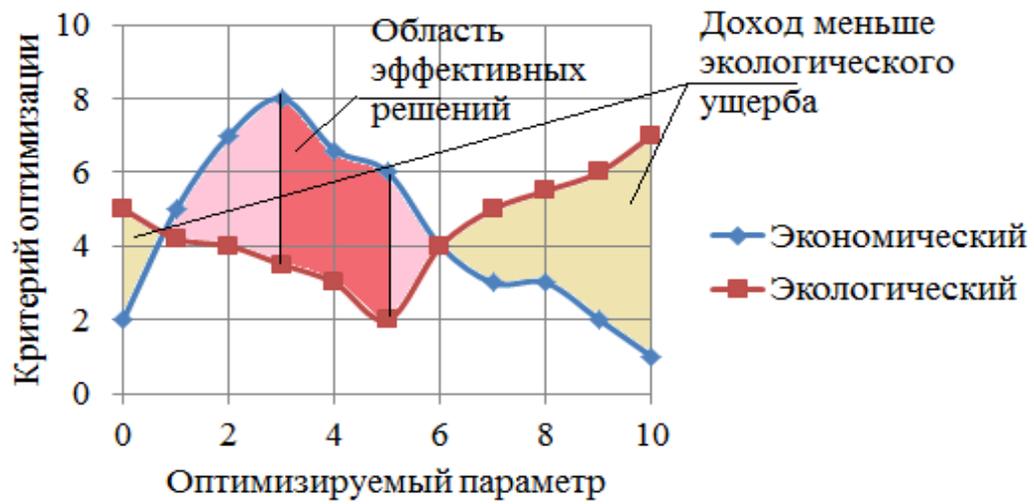


Рис.16.2 Определение области эффективных решений по двум критериям, выраженным в денежных эквивалентах

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

**УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ  
ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ**

ВВЕДЕНИЕ

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

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

**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.ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

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



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

Гидрологическими характеристиками водосбора являются: площадь бассейна  $F_{\text{бас}}$ , км<sup>2</sup>, модуль стока воды  $g$ , л/с×км<sup>2</sup>, залесенность  $f_{\text{л}}$  и распаханность территории  $f_{\text{паш}}$ .

К гидрологическим характеристикам реки относятся: норма стока воды  $W_p$ , млн.м<sup>3</sup>, среднегогодечный расход воды  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/с, коэффициент вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  стока, уклон реки  $I_p$ , ‰, длина реки  $L$ , км. Все эти данные представляются в табличном виде (табл.1.2).

Исходные данные:  $L$ ,  $F$ ,  $f_{\text{л}}$ ,  $f_{\text{паш}}$  – 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].

Табл. 1.2

## Гидрологические характеристики бассейна реки.

L км	F <sub>бас</sub> , км <sup>2</sup>	g, л/с×км <sup>2</sup>	Q <sub>p</sub> , м <sup>3</sup> /с	W <sub>p</sub> , млн.м <sup>3</sup>	I <sub>p</sub> , ‰	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	Площадь угодий, %	
								f <sub>л</sub>	f <sub>паш</sub>

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

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

где  $\tau = 31,54$  млн. секунд в году.

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

Табл. 1.3

Внутригодовое распределение объемов стока воды  
в створе 1-1, млн.м<sup>3</sup>

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.

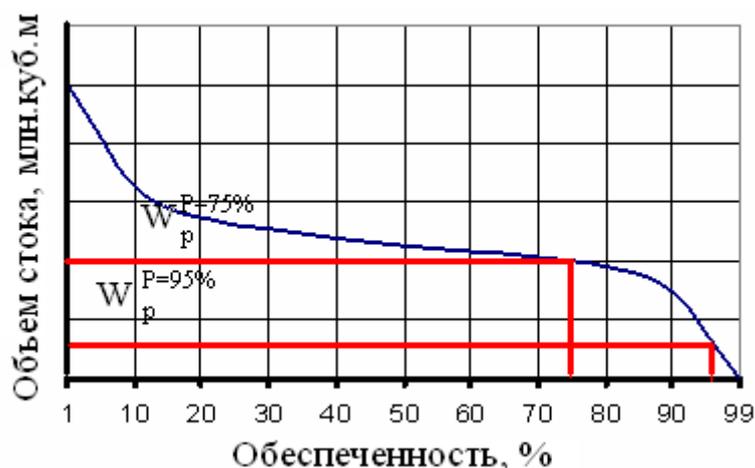


Рис.1.2 Кривая обеспеченности годового стока реки в устьевом створе.

## 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 ( $Q^p_p$ ):

$$Q^p_{\text{эк}} = K_{\text{эк}} \times Q^p_p, \quad (2.1)$$

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

Обеспеченность, P%	$K_{\text{ЭК}}$
$\leq 75$	0.7
$80 < P < 90$	0.8
$\geq 95$	0.9

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

Табл. 2.1

Внутригодовое распределение объемов экологически допустимого стока воды в створе 1-1, млн.м<sup>3</sup>

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. табл.3.1), расчетного периода времени ( $\tau=365$ сут) и коэффициента полезного действия ( $\eta_{\text{КБХ}}=0,95$ ) системы водоснабжения:

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

Табл. 3.1

Нормы водопотребления в коммунально-бытовом хозяйстве  
в зависимости от степени благоустройства

Характеристика степени благоустройства	Нормы водопотребления, л/сут×чел.
<b>Сельская местность</b>	
Водозабор из колодцев	30
Водозабор из водоразборных колонок общего пользования	50
<b>Поселки городского типа</b>	
Централизованное водоснабжение холодной водой, канализация	125...160
<b>Города</b>	
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.м<sup>3</sup>, то объем потребления воды промышленностью составит:  $W_{\text{пром}}=8,95\times 0,45/0,35=11,51$  млн м<sup>3</sup>.

**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 ( $F_{op}$ , га), оросительной нормы ( $M$ , м<sup>3</sup>/га – берется по данным табл.3.3) и коэффициента полезного действия оросительной системы ( $\eta_{op}=0,85$ ).

$$W_{op}=F_{op} \times M / \eta_{op}, \text{ млн м}^3 \quad (3,5)$$

Табл. 3.2

Объемы водопотребления из поверхностных и подземных источников в областях России. /[http://www.orelgiet.ru/1\\_11\\_10zimi.pdf](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
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

Табл. 3.3

Средневзвешенные оросительные нормы (М)  
для севооборотов по областям России.

Область, край, республика	М, м <sup>3</sup> /га	Область, край, республика	М, м <sup>3</sup> /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

Табл. 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	-	-	
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	-	-	

Область край, республика	Месяц								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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:

$$W_{\text{вв}i} = K_{\text{вв}i} \times W_i, \text{ млн.м}^3 \quad (3.8)$$

Табл. 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 загрязнённости ( $K_{\text{пз}}$ );
- объема предельной загрязненности ( $W_{\text{пз}}$ ), который выражается в размерности объемов воды (млн.м<sup>3</sup>).

Физический смысл коэффициента  $K_{\text{пз}}$  – осредненная кратность превышения нормативов качества воды. Коэффициент предельной загрязненности рассчитывается по формуле:

$$K_{пзi} = \sum(C_{ji}/ПДК_i)/n - 1 \quad (4.1)$$

где  $C_{ввji}$  – 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  $K_{пз}$ .

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

$$W_{пзи} = K_{пзи} \times W_{вви}, \text{ млн. м}^3 \quad (4.2)$$

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

Табл.4.1

Показатели загрязненности сточных вод, млн. м<sup>3</sup>.

Источник загрязнения	Показатели загрязненности и сточных вод	
	$K_{пз}$	$W_{пз}$
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:

$$MBXB_i = w_{pi} + w_{nodi} + \sum w_{vvi} - \sum w_i - \alpha \times w_{nodi} - w_{noni} \quad (5.1)$$

где  $w_{pi}$ —объем речного стока в  $i$ -ый месяц;  $\alpha$ —коэффициент гидравлической связи подземных и поверхностных вод;  $w_{подi}$ —объем водозабора из подземных вод в  $i$ -ый месяц;  $\sum w_{ввi}$ —сумма объемов возвратных вод в  $i$ -ый месяц;  $\sum w_i$ —сумма объемов водопотребления в  $i$ -ый месяц;  $w_{пони}$ —объем попусков в  $i$ -ый месяц;  $\alpha \times w_{подi}$ —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:

$$w_{подi} = (W_{с/х} + W_{КБХ}) / 12, \text{ млн. м}^3 \quad (5.2)$$

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:

$$\alpha \times w_{подi} = \alpha \times W_{с/х} / 12, \text{ млн. м}^3 \quad (5.3)$$

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

$$w_{пони} = W_{экол.i} \quad (5.4)$$

Составление водохозяйственного баланса проводится в табличном виде (табл.5.1). Анализ результатов баланса ( $МВХБ_i$ ) 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  $VXB$  равномерно распределяется по месяцам ( $VXB/12$ ), которая отнимается от рассчитанного ранее баланса  $VXB_{испi} = M VXB_i - VXB/12$ . Величина исправленного баланса в конкретный месяц ( $VXB_{испi}$ ) определяется в табличном виде (табл.5.2). Сумма дефицитов воды в исправленном балансе ( $\sum D_{исп}$ ) равна максимальному полезному объему водохранилища ( $V_{max}$ ):  $V_{max} = \sum D_{исп}$ .

Табл.5.1

Водохозяйственный баланс для года обеспеченностью  $P=75\%$ , в месячных интервалах времени, млн. м<sup>3</sup>.

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

Определение максимальной полезной емкости водохранилища для полного  
годового регулирования стока, млн.м<sup>3</sup>.

Параметр	Интервал времени												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
ВХБ													
R/12													
ВХБ <sub>исп</sub>													

**6.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА  
ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
МЕЖДУ ГЭС И ОРОШЕНИЕМ**

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 ( $W_{\text{ГЭС}}$ ) и орошением ( $W_{\text{ор}}$ ) множеством разных вариантов  $W_{\text{ГЭС}} \subset [V_{\text{плз}} \dots 0]$  и  $W_{\text{ор}} \subset [0 \dots V_{\text{плз}}]$  учитывая, что  $V_{\text{плз}} = W_{\text{ГЭС}} + W_{\text{ор}}$ . При этом, ни один из вариантов не гарантирует высокой эффективности, т.е. обоснованности решения. Обоснованность 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. Часто предпочитаемая выгода выражается в виде 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  $V_{\text{плз}} \subset [0 \dots V_{\max}]$ . Целевая функция (критерий оптимизации) представляет собой зависимость суммарного чистого дохода  $\text{ЧД}_{\Sigma}$ , от реализации продукции, получаемой при создании водохранилища, от объемов ( $V$ ) водохранилища:

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

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

$$Д_{\Sigma} = Д_{ор} + Д_{гэс} \quad З_{\Sigma} = З_{стр} + З_{ущ} \quad (6.1)$$

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.

$$Д_{ор} = y_{ор} \times A_1 \times W_{ор} \times \eta_{ор} / M \quad (6.2)$$

где  $y_{ор}$ —удельный доход от реализации продукции полученной на орошаемых землях (в учебной работе принимается  $y_{ор} = 280000 \dots 420000$  руб/га);  $W_{ор}$ —объем воды подаваемый для орошения;  $\eta_{ор}$ — к.п.д. оросительной системы ( $\eta_{ор} = 0,85$ );  $A_1$ —коэффициент, учитывающий снижение дохода при увеличении орошаемой площади (в учебной работе задается зависимостью  $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\max})$ ).

$$Д_{гэс} = c_{гэс} \times W_{гэс} \times H \times 600 / 432 \quad (6.3)$$

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

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

$$V_{пол} = V_{мо} + VQ = (W_{гэс} + W_{эж}) / 31,54 \quad (6.4)$$

где ВБ–отметка уровня воды в верхнем бьефе (определяется по графику (рис.6.1); НБ–отметка уровня воды в нижнем бьефе (определяется по графику зависимости отметок нижнего бьефа от расходов воды рис.6.2);  $V_{\text{пол}}$ –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.

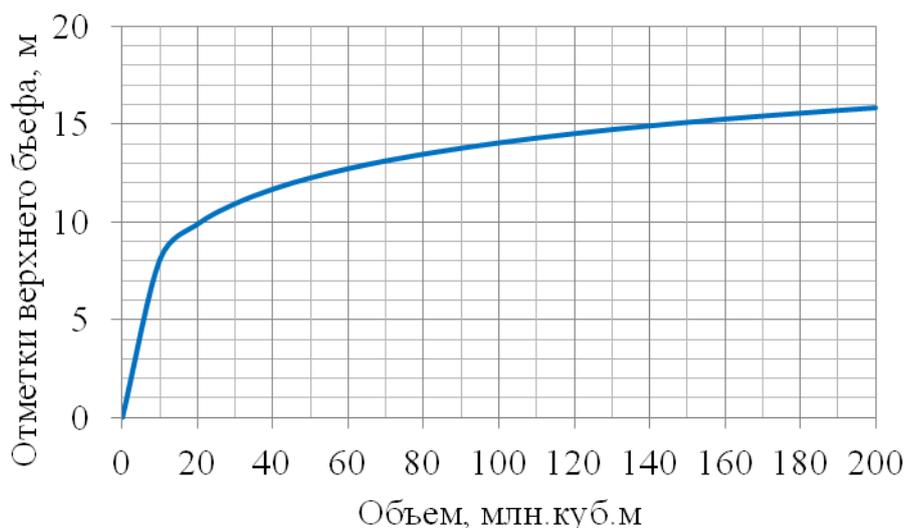


Рис.6.1 Зависимость отметок верхнего бьефа от объемов воды в водохранилище (в учебной работе данная зависимость задается уравнением  $H=2,58 \times \ln(V)+2,15$ , м для  $V>10\text{млн.м}^3$ . Если  $H=0,0$  м то  $V=0,0$  млн.м<sup>3</sup>).

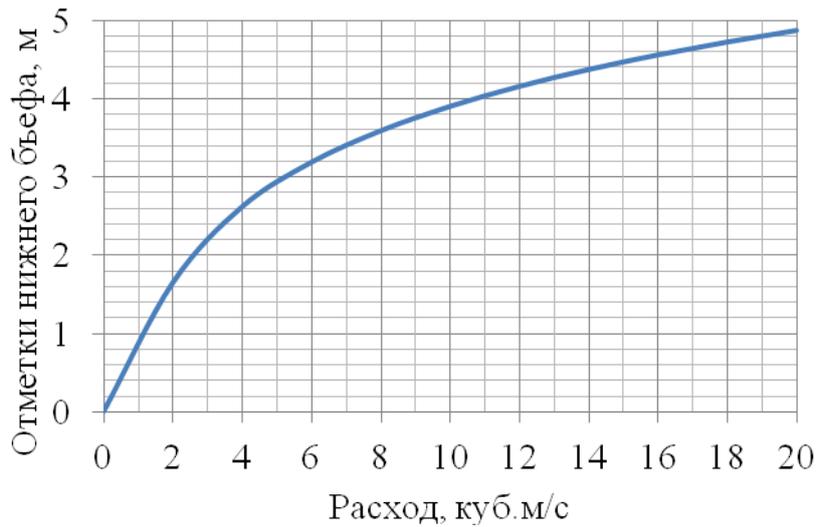


Рис. 6.2 Зависимости отметок нижнего бьефа (НБ) от расходов воды (Q).  
 В учебной работе задается уравнением  $НБ=1,4 \times LN(Q)+0,68$  при  $Q > 2 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  
 $НБ=0,0$  м при  $Q=0,0 \text{ м}^3/\text{с}$

$$Z_{\text{стр}}=A_2 \times V \times u_{\text{стр}} \quad (6.5)$$

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

$$Z_{\text{ущ}}=A_2 \times F \times u_{\text{щ}}, \quad (6.6)$$

где  $u_{\text{щ}}$ —удельный ущерб от создания водохранилища,  $\text{руб}/\text{м}^2$ , в учебной работе принимается равной  $120 \text{ руб}/\text{м}^2$ .

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

$$F=V_{\text{пол}}/h_{\text{ср}} \approx N_{\text{max}}/2 \quad (6.7)$$

Максимальная глубина воды в водохранилище  $N_{\text{max}}$  определяется по графику зависимости отметок верхнего бьефа от объемов водохранилища (рис.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.

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ЧД} &= f(W) \rightarrow \max \\ \Sigma \text{ЧД} &= \text{ЧД}_{\text{ор}} + \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} \\ \text{ЧД}_{\text{ор}} &= \text{Д}_{\text{ор}} - \text{З}_{\text{ор}} \quad \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} = \text{Д}_{\text{ГЭС}} - \text{З}_{\text{ГЭС}} \\ V_{\text{плз}} &= W_{\text{ор}} + W_{\text{ГЭС}} \end{aligned} \quad (6.8)$$

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;  $\text{Д}_{\text{ор}}$ ,  $\text{З}_{\text{ор}}$  – соответственно доход получаемый от орошения и затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы;  $\text{Д}_{\text{ГЭС}}$ ,  $\text{З}_{\text{ГЭС}}$  – 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 ( $\text{з}_{\text{уд ор}} = 30 \text{руб/м}^3$ ) и ее объемов ( $V$ , га).

$$\text{З}_{\text{ор}} = \text{з}_{\text{уд ор}} \times V_{\text{ор}} \times A_2, \text{ млн.руб.} \quad (6.9)$$

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  $\text{з}_{\text{уд.ГЭС}} = 25 \text{руб/м}^3$ .

$$\text{З}_{\text{ГЭС}} = A_3 \times \text{з}_{\text{уд ГЭС}} \times V_{\text{ГЭС}}, \text{ млн.руб,} \quad (6.10)$$

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.6.1, 6.2), в которой имеющийся ресурс воды делится на  $i$  вариантов минимум на 5 вариантов ( $V_i=0...V_{max}$ ,  $i=1...5$ ). 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 ( $V_{ij}=0...V_i$ ,  $j=1...10$ ).

### 6.3 Система ограничений

Выработка управляющего решения учитывает ряд ограничений, например:

- ограничение на объем располагаемого ресурса  $V_{плз} \leq V_{max}$ ;
- 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 не менее 1...10МВт, что соответствует VI классу гидротехнического сооружения (СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения). Данной мощности соответствует выработка энергии в объеме  $\mathcal{E}_{мин.}=2...20$  т. МВт·час).

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 ( $w^{95\%}_{min}$ ) умноженный на продолжительность поливного периода ( $T_{п}=3...9$ мес. - определяется по таблице 3.4) Величина товарной части устойчивого стока  $W^T_{ус}$  рассчитывается как разница величины устойчивого стока минус объем экологического стока.

$$W^T_{ус} = w^{95\%}_{min} \times T_{п} \times 0,1$$

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

$$F_{мин} = W^T_{ус} \times \eta_{ор} / M, \text{ га}$$

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

Полученные в результате оптимизационных расчётов 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.

Табл. 6.1

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

Вар.	Объем, млн.м <sup>3</sup>	A <sub>1</sub>	Д <sub>ор</sub> , млн.руб	A <sub>2</sub>	З <sub>ор</sub> , млн.руб	ЧД <sub>ор</sub> , млн.руб	V <sub>maxi</sub> -V <sub>ij</sub> млн.м <sup>3</sup>	V <sub>пол.i</sub> , млн.м <sup>3</sup>	ВБ, м	W <sub>ГЭС</sub> , млн.м <sup>3</sup>	Q, м <sup>3</sup> /с	НБ, м	Н, м	Д <sub>гэс</sub> , млн.руб.	З <sub>гэс</sub> , млн.руб.	ЧД <sub>гэс</sub> , млн.руб	ΣЧД, млн.руб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
i	0																
	V <sub>ij</sub>																
	V <sub>i</sub>																

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

$W_{ГЭС} = (V_{maxi} - V_{ij}) + W^{75\%}_{поп}$  – объем воды отдаваемый на ГЭС.  $W^{75\%}_{поп}$  – объем экологического стока в год 75% обеспеченности (табл. 2.1).

Табл.6.2

## Оптимизация полезного объема водохранилища.

Вар.	$V_{opt}$ , млн.м <sup>3</sup>	$D_{op}$ , млн.руб	$D_{гэс}$ , млн.руб	$\Sigma D$ , млн.руб	$A_2$	$Z_{стр}$ , млн.руб.	$V_{пол.i}$ , млн.м <sup>3</sup>	ВБ, м	$h_{ср}$ , м	$F_{вод}$ , км <sup>2</sup>	$Y_{ущ}$ , руб/м <sup>2</sup>	$\Sigma Z$ , млн.руб.	$\Sigma ЧД$ , млн.руб		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1	$V_{opt_1}$	Из табл.7.1 колонка 4	Из табл.7.1 колонка 15				Выбирается из табл.7.1 для ОПТИМАЛЬНЫХ вариантов								
2															
3	$V_{opt_i}$														
4															
5	$V_{opt_5}$														

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Полезный объем водохранилища определен на основе оптимизации одного критерия, который учитывал 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 -  $KP_{чд} \rightarrow \max$ ;
2. **экологический критерий**: минимизация ущербов от ухудшения качества воды, затопления и подтопления -  $KP_{эк} \rightarrow \min$ ;
3. **производственный критерий**: максимизация объемов вырабатываемой энергии  $KP_{ГЭС} \rightarrow \max$  и площади орошения  $KP_{ор} \rightarrow \max$ .

При этом должны учитываться ограничений:

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

## 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:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = \text{Д}_{\Sigma} - \text{З}_{\Sigma}$$

$$\text{Д}_{\Sigma} = \text{Д}_{\text{ор}} + \text{Д}_{\text{ГЭС}} \quad \text{З}_{\Sigma} = \text{З}_{\text{стр}} + \text{З}_{\text{ущ}}$$

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

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

$$\text{З}_{\text{стр}} = A_2 \times V \times y_{\text{стр}}$$

$$\text{З}_{\text{ущ}} = A_2 \times F \times y_{\text{ущ}}$$

где  $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\text{max}})$ ;  $A_2 = 0,5 \cdot (V/V_{\text{max}})^2 + 0,5 \cdot (V/V_{\text{max}})$ ;  $y_{\text{стр}} = 100 \text{руб/м}^3$ ;  $y_{\text{ущ}} = 120 \text{руб/м}^2$ ;  $c_{\text{ГЭС}} = 3 \text{руб/кВт}\cdot\text{ч}$ ;  $y_{\text{ор}} = 280000 \dots 420000 \text{руб/га}$ ;  $\eta_{\text{ор}} = 0,85$ .

### 7.1.2 Производственный критерий

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

$$\text{КР}_{\text{ор}} = V \times \eta_{\text{ор}} \times 10^6 / M, \text{ га} \dots \dots \dots (7.3)$$

Критерий энергетики выражается через объем вырабатываемой на ГЭС электроэнергии.

$$\text{КР}_{\text{ГЭС}} = (V_{\text{max}} - V) \times H / 432 \dots \dots \dots (7.4)$$

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

$$\text{КР}_{\text{п}} = [(\text{КР}_{\text{ор}} / \text{КР}_{\text{ор max}}) + (\text{КР}_{\text{ГЭС}} / \text{КР}_{\text{ГЭС max}})] / 2 \quad (7.5)$$

### 7.1.3 Экологический критерий

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

- увеличение объема водохранилища позволяет увеличить площадь орошаемых земель, но 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 ( $\sigma$ ), полного объема ( $V+V_{мо}$ ) и объема попуска ( $W_{поп}$ ).

$$K_{пз} = \frac{W_{пз\ op}}{\left(\sigma + \frac{V}{W_{поп}}\right) \cdot (V + V_{мо})} \quad (7.6)$$

$$W_{пз\ op} = W_p^{95\%} \times F_{op} \times K_{пз\ op} / F_{бас}$$

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

Табл.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 чист	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  $F_{зат}$ .

$$F_{зат} = V_{пол} / h_{ср} \quad (7.7)$$

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

$$KР_{\text{эк}} = [(KР_{\text{пз}}/KР_{\text{пз макс}}) + (KР_{\text{зат}}/KР_{\text{зат макс}})]/2 \quad (7.8)$$

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 ( $KР_i$ ). 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:  $KР_{\text{чд}} = D_{\Sigma} / D_{\Sigma \text{ макс}}$

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

Экологический:  $KР_{\text{эк}} = 1 - (KР_{\text{эк}} / KР_{\text{эк макс}}) \quad (7.9)$

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

$$f \rightarrow \max f = KР_{\text{чд}} + KР_{\text{п}} + KР_{\text{эк}} \quad (7.10)$$

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

$$f \rightarrow \max f = \mu_3 \times \text{КР}_{\text{чд}} + \mu_{\text{п}} \times \text{КР}_{\text{п}} + \mu_{\text{эк}} \times \text{КР}_{\text{эк}} \quad (7.11)$$

$$\sum \mu_i = 1$$

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

Табл. 7.2

Выбор объема водохранилища ( $V$ ) методом Домбровского для равнозначных критериев.

Вариант	$V$ , млн.м <sup>3</sup>	Нормированные значения целевых функций			$f$
		$\text{КР}_{\text{чд}}$	$\text{КР}_{\text{п}}$	$\text{КР}_{\text{эк}}$	
$i$					

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

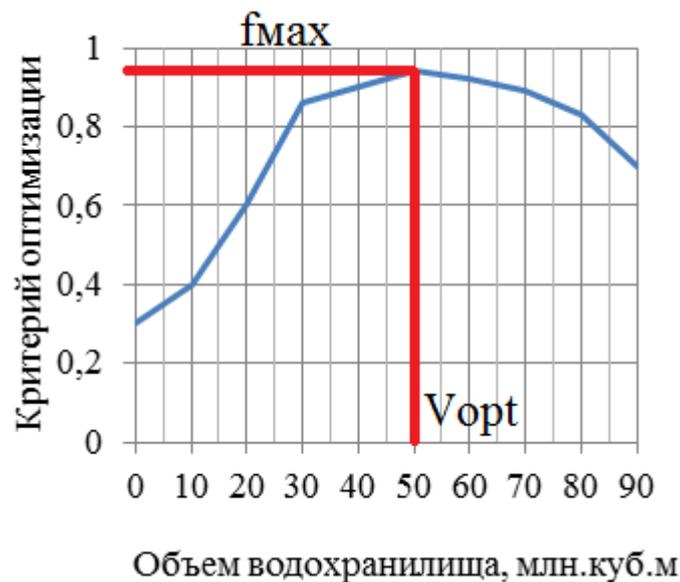


Рис.7.1 Пример зависимости суммарного критерия оптимизации ( $f$ ) от объемов воды в водохранилище ( $V$ )

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

Табл.7.3

Выбор объема водохранилища методом Домбровского  
для неравнозначных критериев

Вариант	V, млн.м <sup>3</sup>	Нормированные значения целевых функций						f
		KP <sub>чд</sub>	μ <sub>э</sub>	KP <sub>п</sub>	μ <sub>п</sub>	KP <sub>эк</sub>	μ <sub>эк</sub>	
i			<b>0,3</b>		<b>0,2</b>		<b>0,5</b>	

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<sub>чд</sub>, KP<sub>п</sub>, KP<sub>эк</sub>) располагаются в порядке приоритетности. Первым является наименее важный критерий (например KP<sub>п</sub>). Делается его максимизация по искомому параметру (V<sub>1</sub>): KP<sub>п</sub>→max. Затем назначается величина допустимого снижения максимального значения первого критерия KP<sub>п</sub><sup>max</sup> (уступка ΔKP<sub>п</sub>), которая допускает его снижение при оптимизации других критериев до величины KP'<sub>п</sub>≥KP<sub>п</sub><sup>max</sup>−ΔKP<sub>п</sub> (рис.7.2).

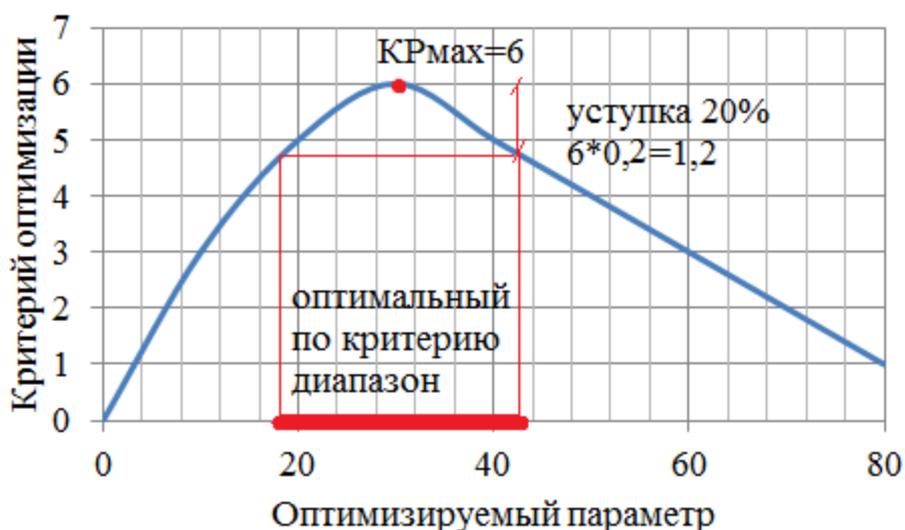


Рис.7.2 Определение приемлемого оптимального диапазона  
для 1-го критерия при уступке 20%

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  $KP'п$ . Если данное условие выполняется (рис.7.3), то назначается величина уступки для второго критерия  $\Delta KP_{чд}$ , которая допускает его снижение при оптимизации оставшегося критерия до величины  $KP'_{чд} \geq KP_{чд}^{max} - \Delta KP_{чд}$ .

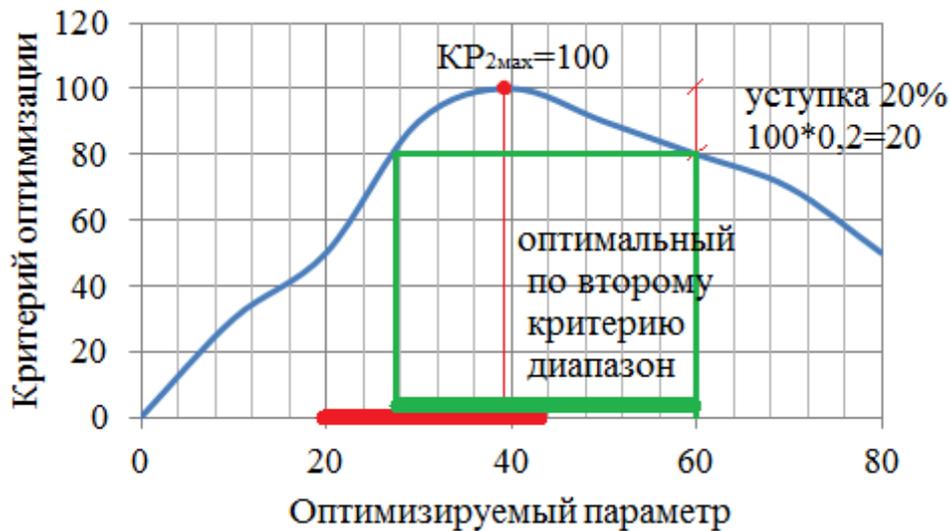


Рис.7.3 Определение приемлемого оптимального диапазона для 2-го критерия при уступке 20% (оптимальное значение второго критерия попадает в оптимальный диапазон полученный для первого критерия)

Определяется максимум самого важного критерия  $KP_{эк}$ . 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 ( $f_{уст}$ ).

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

Табл. 7.4

Выбор объема водохранилища ( $V$ ) методом Уступок

Вариант	V, млн.м <sup>3</sup>	Значения целевых функций		
		$KP_{п} \rightarrow \max$	$KP_{чд} \rightarrow \max$	$KP_{эк} \rightarrow \max$

i				
---	--	--	--	--

#### 7.4 Применение метода «Равной эффективности»

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

$$\text{ЭФ}_3 \approx \text{ЭФ}_\Pi \approx \text{ЭФ}_{\text{ЭК}},$$

где  $\text{Э}_i$ –эффективность  $i$ -го критерия, рассчитываемая по выражению:

$$\text{ЭФ} = (\text{КР} - \text{КР}_{\min}) / (\text{КР}_{\max} - \text{КР}_{\min}),$$

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

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

$$\Delta \text{ЭФ} = |\text{ЭФ}_3 - \text{ЭФ}_\Pi| + |\text{ЭФ}_3 - \text{ЭФ}_{\text{ЭК}}| + |\text{ЭФ}_\Pi - \text{ЭФ}_{\text{ЭК}}| \rightarrow \min$$

Табл. 7.5

Выбор варианта решения методом «Равной эффективности»

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	Расчет эффективности						$\Delta \text{ЭФ}$
		КР <sub>чд</sub>	$\text{ЭФ}_3$	КР <sub>п</sub>	$\text{ЭФ}_\Pi$	КР <sub>ЭК</sub>	$\text{ЭФ}_{\text{ЭК}}$	
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 ( $\mu$ ), учитывающие значимость критериев для принятия решений. Выбирается компромиссный вариант решения, в котором сумма относительных эффективностей максимальна:

$$\text{для равноценных критериев: } \text{ЭФ}_3 + \text{ЭФ}_\Pi + \text{ЭФ}_{\text{ЭК}} \rightarrow \max$$

$$\text{для неравноценных критериев } \mu_3 \times \text{ЭФ}_3 + \mu_\Pi \times \text{ЭФ}_\Pi + \mu_{\text{ЭК}} \times \text{ЭФ}_{\text{ЭК}} \rightarrow \max$$

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

Расчет проводится в табличной форме (табл.7.6).

Табл.7.6

Выбор варианта решения методом «Линейной свертки критериев».

Var.	V, млн.м <sup>3</sup>	Расчет эффективности			
		ЭФ <sub>3</sub>	ЭФ <sub>Π</sub>	ЭФ <sub>ЭК</sub>	ΣЭФ <sub>J</sub>
1					
...					
i					
...					
10					

По данным таблицы 7.6 строится зависимость  $\sum \text{ЭФ}_J = f(V)$ , 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 вариантом 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 табл.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 табл.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.

Табл. 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

5	77	240	125	4	7	4	15
6	111	272	140	5	9	5	19
7	<b>151</b>	<b>261</b>	<b>155</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>20</b>
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 ( $\Delta\text{ЭФ}$ ), свертки критериев ( $\Sigma\text{ЭФ}$ ) и метод Фуллера ( $\Sigma N$ ).

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

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

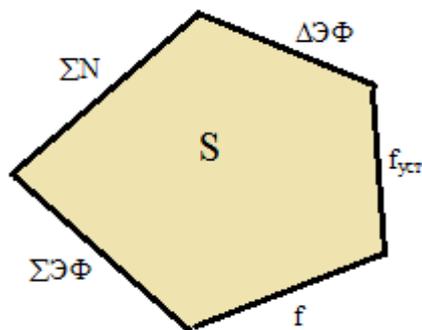


Рис.7.4 Иллюстрация определения функционала ( $S$ ) в методе циклограмм.

Реализация метода циклограмм делается в табличном виде (табл.7.8)

Табл.7.8

Выбор окончательного варианта величины полезного объема водохранилища ( $V_{плз}^{опт}$ ) методом циклограмм

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	Методы					S
		Домбровского	Уступок	Равной	Свертки	Фуллера	

				эффективности			

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.

## 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 реки Тим представлена на рис. I.1.

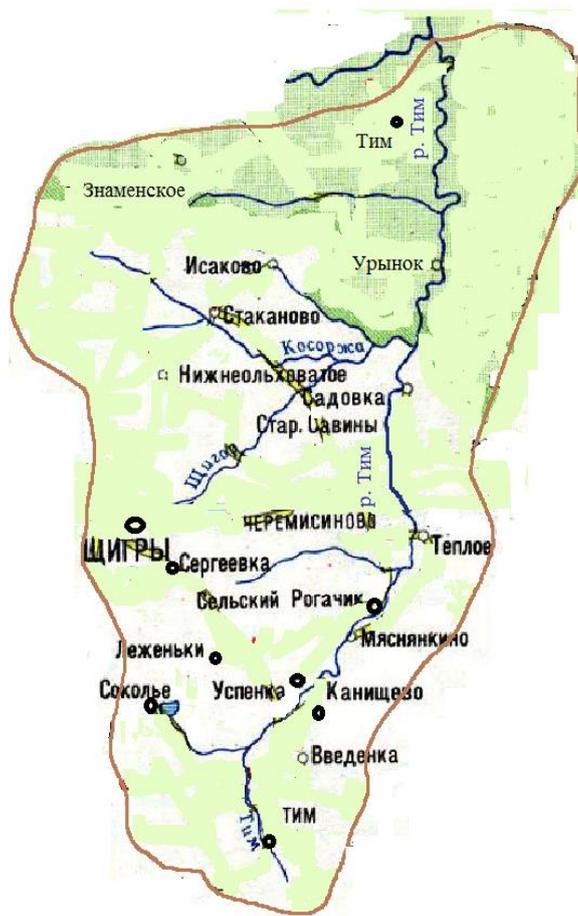


Рис. I.1 Схема бассейна реки Тим Курской области

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

Табл. I.1

Гидрологические характеристики бассейна и стока реки Тим

L км	F, км <sup>2</sup>	g, л/с×км <sup>2</sup>	Q <sub>p</sub> , м <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	Площадь угодий, %	
						f <sub>л</sub>	f <sub>паш</sub>
120	2460	4	9,83	0,4	0,8	7	76

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

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

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

где  $\tau = 31,54$  млн. секунд 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).

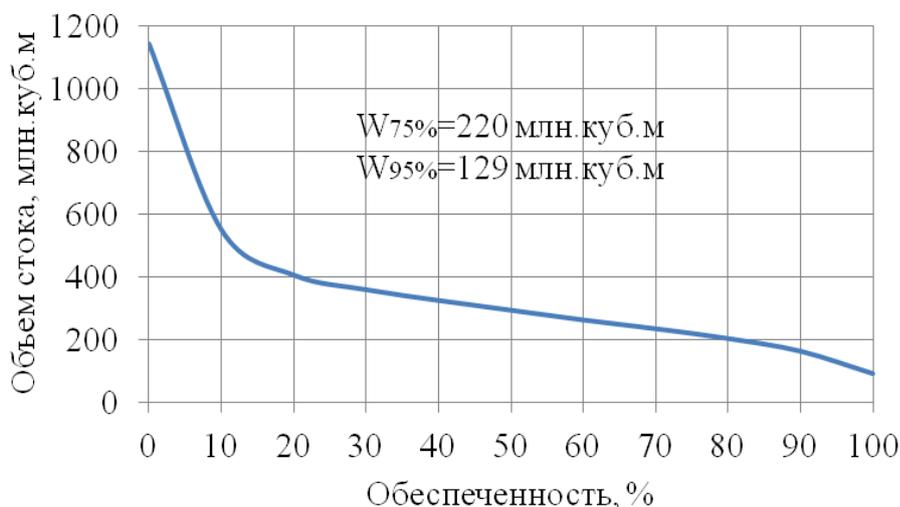


Рис. I.2 Кривая обеспеченности годового стока реки Тим  
в устьевом створе

Табл. I.2

Внутригодовое распределение объемов стока воды в годы 75 и 95%  
обеспеченности, млн.м<sup>3</sup>

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 следующим 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 (Р) величина экологически допустимого стока (за год и по месяцам) определяется как доля от природного речного стока в год данной обеспеченности ( $W^{P\%}_p$ ):

$$W^{\text{ж}}_p = K_{\text{эк}} \times W^{P\%}_p,$$

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

Обеспеченность, P%	$K_{\text{эк}}$
$\leq 75$	0.7
$\geq 95$	0.9

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

**Внутригодовое распределение объемов  
экологически допустимого стока воды в устьевом створе, млн.м<sup>3</sup>**

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 расчёты 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 ( $N_{\text{КБХ}}=200$ 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:

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

Табл. III.1

Объемы водопотребления из поверхностных и подземных источников в областях России. /[http://www.orelgiet.ru/1\\_11\\_10zimi.pdf](http://www.orelgiet.ru/1_11_10zimi.pdf)/

Область	Забрано из подземных источников, %	Водопотребление участниками ВХК, %		
		КБХ	Промыш.	С/х воснабж.
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 ( $K_{ВВ}$ ) и объемов водопотребления:

$$W_{ВВi} = K_{ВВi} \times W_i, \text{ МЛН.М}^3$$

Табл. III.2

Значения коэффициентов возвратных вод

Водопотребители	W, МЛН.М <sup>3</sup>	$K_{ВВi}$	$W_{ВВ},$ МЛН.М <sup>3</sup>
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 показатель «предельной загрязненности» воды. Данная величина может быть выражена в виде:

- безразмерного коэффициента предельной загрязнённости ( $K_{ПЗ}$ );
- 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:

$$W_{пzi} = K_{пzi} \times W_{вvi}, \text{ млн. м}^3$$

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

Табл. IV.1

Показатели загрязненности сточных вод, млн. м<sup>3</sup>

Источник загрязнения	Показатели загрязненности и 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:

$$MBXB_i = w_{pi} + w_{nodi} + \sum w_{vvi} - \sum w_i - \alpha \times w_{nodi} - w_{noni}$$

где  $w_{pi}$ —объем речного стока в  $i$ -ый месяц;  $\alpha$ —коэффициент гидравлической связи подземных и поверхностных вод;  $w_{подi}$ —объем водозабора из подземных вод в  $i$ -ый месяц;  $\sum w_{ввi}$ —суммы объемов возвратных вод в  $i$ -ый месяц;  $\sum w_i$ —сумма объемов водопотребления в  $i$ -ый месяц;  $w_{пони}$ —объем попусков в  $i$ -ый месяц;  $\alpha \times w_{подi}$ —ущерб речному стоку от водозабора из подземных водоносных горизонтов гидравлически связанных с рекой в  $i$ -ый 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 ( $\alpha$ ). В этом случае величина ущерба для стока реки за счет изъятия подземных вод, в  $i$ -ый месяц, составит:

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

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

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

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

$$W_{пони} = W_{экол.i}$$

Воднобалансовые расчеты представлены в таблице V.1. Дефицитов воды нет, резерв воды составляет  $R=68$  млн.м<sup>3</sup>. Его планируется использовать для орошения и получать дополнительное количество энергии на ГЭС.

Табл.V.1

Водохозяйственный баланс для года обеспеченностью  $P=75\%$ , в месячных интервалах времени, млн. м<sup>3</sup>

Составляющие баланса	Интервал времени												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
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, $w_{п.в.j}$	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
<b>Всего приход</b>	<b>11,30</b>	<b>9,54</b>	<b>10,20</b>	<b>18,13</b>	<b>131,46</b>	<b>45,46</b>	<b>14,82</b>	<b>11,96</b>	<b>10,42</b>	<b>9,76</b>	<b>11,74</b>	<b>12,62</b>	<b>297,5</b>
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, $\Sigma w_j$ , всего:	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
• в том числе: 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
<b>Итого расход</b>	<b>9,67</b>	<b>8,44</b>	<b>8,90</b>	<b>14,45</b>	<b>93,78</b>	<b>33,58</b>	<b>12,14</b>	<b>10,13</b>	<b>9,06</b>	<b>8,59</b>	<b>9,98</b>	<b>10,60</b>	<b>229,4</b>
<b>Баланс ВХБ</b>	<b>1,63</b>	<b>1,10</b>	<b>1,30</b>	<b>3,68</b>	<b>37,68</b>	<b>11,88</b>	<b>2,68</b>	<b>1,83</b>	<b>1,36</b>	<b>1,17</b>	<b>1,76</b>	<b>2,01</b>	<b>68</b>
<b>Фактический сток <math>W_{фак}</math></b>	<b>5,02</b>	<b>3,26</b>	<b>3,92</b>	<b>11,85</b>	<b>125,18</b>	<b>39,18</b>	<b>8,54</b>	<b>5,68</b>	<b>4,14</b>	<b>3,48</b>	<b>5,46</b>	<b>6,34</b>	<b>222,1</b>

## 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  $V_{плз} \in [0 \dots 68]$  млн.м<sup>3</sup>. Целевая функция представляет собой зависимость суммарного чистого дохода  $ЧД_{\Sigma}$ , получаемого от реализации продукции, получаемой при создании водохранилища, от его объемов ( $V$ ):

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

$$ЧД_{\Sigma} = D_{\Sigma} - Z_{\Sigma}$$

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

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

$$D_{ор} = u_{ор} \times A_1 \times W_{ор} \times \eta_{ор} / M$$

где  $u_{ор}$  – удельный доход от реализации продукции полученной на орошаемых землях, принимается равным  $u_{ор} = 250000$  руб/га;  $W_{ор}$  – объем воды подаваемый для орошения;  $\eta_{ор}$  – к.п.д. оросительной системы ( $\eta_{ор} = 0,85$ );  $A_1$  – коэффициент, учитывающий снижение дохода при увеличении орошаемой площади (в учебной работе задается зависимостью  $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\max})$ );  $M = 2350$  м<sup>3</sup>/га – оросительная норма средневзвешенная для Курской области.

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

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

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

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

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<sup>3</sup>, если  $H=0,0$  м то  $V=0,0$  млн.м<sup>3</sup>); НБ—  
 отметка уровня воды в нижнем бьефе определяется по зависимости  
 $НБ=1,4 \times \ln(Q)+0,68$  (при  $Q>2$ м<sup>3</sup>/с,  $НБ=0,0$  м при  $Q=0,0$  м<sup>3</sup>/с);  $V_{пол}$ —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 10м);  $Q$ —расход воды пропускаемый через турбины  
 ГЭС.

$$Z_{стр}=A_2 \times V \times u_{стр}$$

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

$$Z_{ущ}=A_2 \times F \times u_{щ},$$

где  $u_{щ}$ —удельный ущерб от создания водохранилища, руб/м<sup>2</sup>, принимается  
 равной 120руб/м<sup>2</sup>.

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

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

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

$$\Sigma \text{ЧД} = f(W) \rightarrow \max \Sigma \text{ЧД} = \text{ЧД}_{\text{ор}} + \text{ЧД}_{\text{ГЭС}}$$

$$\text{ЧД}_{\text{ор}} = \text{Д}_{\text{ор}} - \text{З}_{\text{ор}} \quad \text{ЧД}_{\text{ГЭС}} = \text{Д}_{\text{ГЭС}} - \text{З}_{\text{ГЭС}} \quad V_{\text{плз}} = W_{\text{ор}} + W_{\text{ГЭС}}$$

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;  $\text{Д}_{\text{ор}}$ ,  $\text{З}_{\text{ор}}$  – соответственно доход получаемый от орошения и затраты на строительство и эксплуатацию оросительной системы;  $\text{Д}_{\text{ГЭС}}$ ,  $\text{З}_{\text{ГЭС}}$  – 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 ( $z_{\text{уд ор}} = 30 \text{руб/м}^3$ ) и ее объемов ( $V$ , га).

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

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

$$\text{З}_{\text{ГЭС}} = A_3 \times z_{\text{уд ГЭС}} \times V_{\text{ГЭС}}, \text{ млн. руб.}$$

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 (табл. VI.1, VI.2), в которой имеющийся ресурс воды делится на  $i$  вариантов минимум на 5 вариантов ( $V_i=0\dots 68$  млн.м<sup>3</sup>,  $i=1\dots 5$ ). 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.м<sup>3</sup>;
- 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 1МВт, 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·час.

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 ( $w^{75\%}_{мин}$ ) умноженный на продолжительность поливного периода  $T_{п}=5$  месяцев (с 5...9мес.). Величина товарной части устойчивого стока  $W^T_{yc}$  рассчитывается как разница величины устойчивого стока (за теплый период года табл. VI.2.) минус объем экологического стока.

$$W^T_{yc} = w^{95\%}_{мин} \times T_{п} \times 0,1 = 2,06 \times 5 \times 0,1 = 1,03 \text{ млн. м}^3$$

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

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

Максимальная площадь ограничивается долей орошаемых культур в составе севооборота принимается  $F_{\max}=5\%$  от  $F_{\text{бас}}=0,05 \times 2460 \times 100=12300$ га

Табл. 6.1

Оптимизация водораспределения между ГЭС и орошением, по вариантам полезного объема водохранилища.

Вар.	$V_i$ , млн.м <sup>3</sup>	$A_1$	$D_{ор}$ , млн.руб	$A_2$	$Z_{ор}$ , млн.руб	$ЧD_{ор}$ , млн.руб	$W_{ГЭС}$ , млн.м <sup>3</sup>	$V_{пол.i}$ , млн.м <sup>3</sup>	$ВБ$ , м	$W_{ГЭС+W_{ЭК}}$ , млн.м <sup>3</sup>	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$НБ$ , м	$Н$ , м	$D_{ГЭС}$ , млн.руб.	$Z_{ГЭС}$ , млн.руб.	$ЧD_{ГЭС}$ , млн.руб	$\Sigma ЧD$ , млн.руб
Вариант оптимизации водораспределения между ГЭС и орошением $V_{плз}=14$ млн.м <sup>3</sup>																	
0	0	1,00	0	0	0	0	14	34	11,22	168	5,31	3,02	8,20	465	340	125	125
1	1	0,98	121	0,055	4	116	12	32	11,11	166	5,27	3,01	8,10	413	289	124	240
2	3	0,96	236	0,12	20	217	11	31	11,00	165	5,23	3,00	8,00	363	239	123	340
3	4	0,94	347	0,195	48	300	10	30	10,88	164	5,18	2,98	7,90	313	192	122	421
4	5	0,92	454	0,28	91	363	8	28	10,76	162	5,14	2,97	7,79	265	147	118	481
5	7	0,90	556	0,375	153	403	7	27	10,63	161	5,10	2,96	7,67	217	106	111	515
6	8	0,89	654	0,48	235	419	5	25	10,50	159	5,06	2,95	7,55	171	71	100	520
7	10	0,87	748	0,595	340	409	4	24	10,36	158	5,01	2,94	7,42	126	41	85	493
8	11	0,85	838	0,72	470	368	3	23	10,21	157	4,97	2,92	7,28	83	19	64	432
9	14	0,82	1007	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 $V_{плз}=27$ млн.м <sup>3</sup>																	
0	0	1,00	0	0	0	0	27	47	12,08	181	5,74	3,13	8,96	1008	675	333	333
1	3	0,98	239	0,055	9	230	24	44	11,93	178	5,65	3,11	8,83	894	574	320	550
2	5	0,96	469	0,12	39	430	22	42	11,77	176	5,57	3,08	8,68	782	475	306	737
3	8	0,94	690	0,195	95	595	19	39	11,60	173	5,48	3,06	8,53	672	380	292	887
4	11	0,92	902	0,28	181	720	16	36	11,41	170	5,40	3,04	8,37	565	292	273	993
5	14	0,90	1105	0,375	304	801	14	34	11,21	168	5,31	3,02	8,19	461	211	250	1051

6	16	0,89	1299	0,48	467	833	11	31	10,99	165	5,23	2,99	8,00	360	140	220	1052
7	19	0,87	1486	0,595	675	811	8	28	10,76	162	5,14	2,97	7,78	263	82	181	992
8	22	0,85	1664	0,72	933	731	5	25	10,50	159	5,05	2,95	7,55	170	38	132	863
9	27	0,82	1999	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 $V_{плз}=41$ млн.м <sup>3</sup>																	
0	0	1,00	0	0	0	0	41	61	12,76	195	6,18	3,23	9,53	1627	1025	602	602
1	4	0,98	363	0,055	14	350	37	57	12,58	191	6,05	3,20	9,38	1442	872	570	920
2	8	0,96	712	0,12	59	653	33	53	12,38	187	5,92	3,17	9,21	1259	722	538	1191
3	12	0,94	1047	0,195	144	904	29	49	12,18	183	5,79	3,14	9,04	1081	578	503	1406
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 $V_{плз}=54$ млн.м <sup>3</sup>																	
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 $V_{плз}=68\text{млн.м}^3$																	
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.  $V_{пол.i}=V_i+V_{мо}$ , где  $V_{мо}$  мертвый объем водохранилища (принимается равным  $20\text{млн.м}^3$ ).

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

Табл.6.2

## Оптимизация полезного объема водохранилища

Вар.	$V_{opt}$ , млн.м <sup>3</sup>	$D_{ор}$ , млн.руб	$D_{гэс}$ , млн.руб	$\Sigma D$ , млн.руб	$A_2$	$Z_{стр}$ , млн.руб.	$V_{пол.i}$ , млн.м <sup>3</sup>	ВБ, м	$h_{ср}$ , м	$F_{вод}$ , км <sup>2</sup>	$Y_{ущ}$ , руб/м <sup>2</sup>	$\Sigma Z$ , 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.

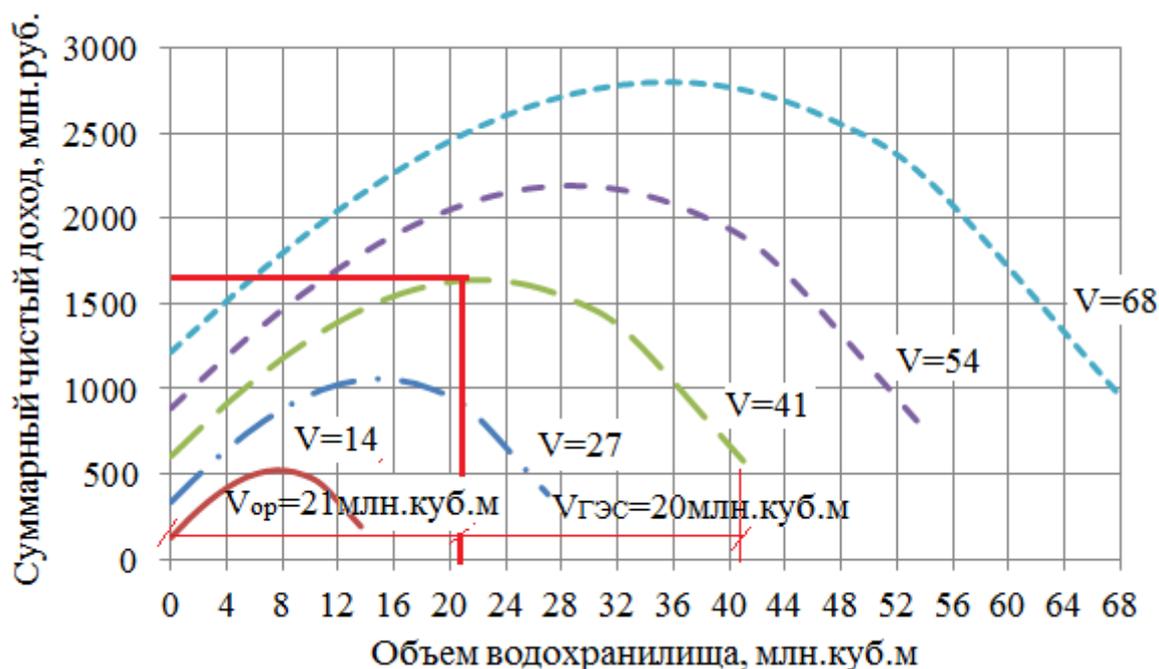


Рис. VI.1 Зависимость суммарного чистого дохода от объемов полезной емкости водохранилища ( $V$ )

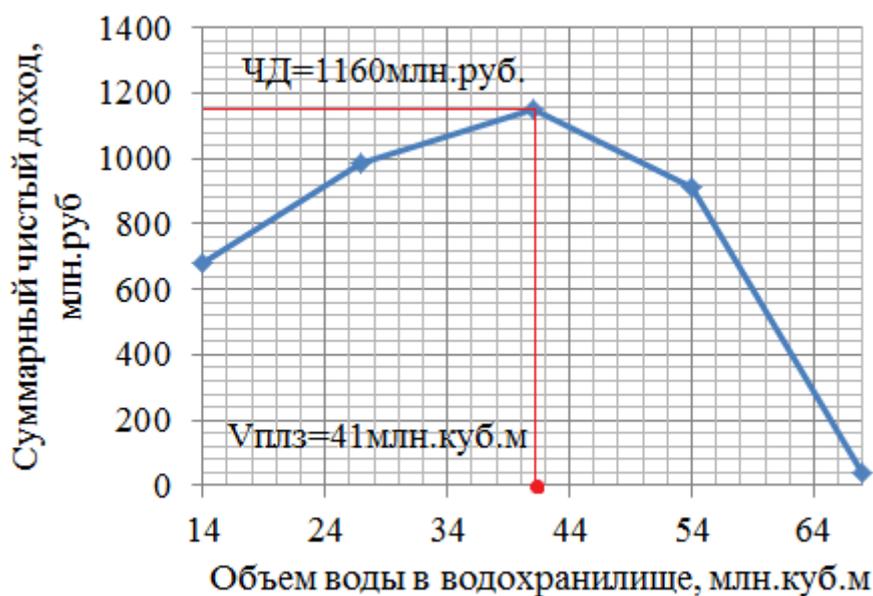


Рис. VI.2 Зависимость суммарного чистого дохода от объемов полезной емкости водохранилища (по оси абсцисс откладываются оптимизируемые объемы полезной емкости водохранилища)

Оптимальный объем водохранилища  $V_{плз}=41$ млн.м<sup>3</sup>. Данному объему соответствует оптимальное водораспределение между орошением и ГЭС, соответственно: 21 и 20млн.м<sup>3</sup>.

Полученный объем воды для орошения позволяет оросить площадь:

$F_{ор} = 21 \times 0,85 \times 10^6 / 2350 = 7590$  га, что больше  $F_{мин} = 373$  га и меньше  $F_{маx} = 12300$  га. Требования ограничений на площадь орошения удовлетворяются.

Оптимальный объем воды для ГЭС  $V_{ГЭС}^{opt} = 20$  млн.м<sup>3</sup>, что совместно с объемом попусков (154 млн.м<sup>3</sup>) позволяет вырабатывать объем электроэнергии:

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

Окончательно принимается полезный объем водохранилища  $V_{плз} = 41$  млн.м<sup>3</sup>, объем воды для орошения  $W_{ор} = 21$  млн.м<sup>3</sup> и  $W_{ГЭС} = 20$  млн.м<sup>3</sup>.

## **VII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Многокритериальная оптимизация полезного объема водохранилища 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):  $W_{ор} = 21$  млн.м<sup>3</sup> и  $W_{ГЭС} = 20$  млн.м<sup>3</sup>. Таким образом принимается, что на долю орошения приходится  $(W_{ор} \times 100\%) / 41 = 51\%$  полезного объема  $V_{плз} = 41$  млн.м<sup>3</sup>, при этом доля ГЭС составит:  $(W_{ГЭС} \times 100\%) / 41 = 49\%$ . 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:  $K_{плз} \rightarrow \min$  или максимизация величины  $1 - K_{плз} \rightarrow \max$ ;

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

Накладываемые ограничения:

- ограничение на минимальный объем вырабатываемой энергии на ГЭС:  $\mathcal{E}_{ГЭС} \geq \mathcal{E}_{\min}$ ;
- ограничение на минимальную площадь орошения:  $F_{ор} \geq 373$  га;
- ограничение на качество воды в водохранилище, которое должно соответствовать классу не хуже «умеренно загрязненного»:  $K_{пз} \leq 1$ .

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

$\mathcal{CД}_{\Sigma} \rightarrow \max$  при ограничении  $V \leq 68 \text{ млн. м}^3$

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

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

где  $c_{ГЭС} = 3 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$ ;  $A_2 = 0,5 \cdot (V/V_{\max})^2 + 0,5 \cdot (V/V_{\max})$ ;  $y_{стр} = 100 \text{ руб/м}^3$ ;  
 $y_{ущ} = 120 \text{ руб/м}^2$ ,  $y_{ор} = 250000 \text{ руб/га}$ ;  $\eta_{ор} = 0,85$ ;  $A_1 = \text{EXP}(-0,2 \times V/V_{\max})$ ;  
 $M = 2350 \text{ м}^3/\text{га}$ ; (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 ( $K_{пз}$ ) от: нагрузки на водохранилище ( $\Sigma W_{пз}$ ), его объема ( $V$ ) и коэффициента седиментации ( $\sigma = 0,5$ ), полного объема ( $V + V_{мо}$ ) и объема попуска ( $W_{поп} = W_{95\% \text{ эк}} = 116 \text{ млн. м}^3$  табл. П.1).

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

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

где  $K_{пз \text{ ор}} = 10$ .

Площадь затопления определяется по формуле:

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

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

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

## Формирование экономического критерия

Вар.	$V_{opt}$ , млн.м <sup>3</sup>	$A_1$	Дор, млн.руб	$V_{пол}$ , млн.м <sup>3</sup>	ВБ, м	Q, м <sup>3</sup> /с	НБ, м	Н, м	Д <sub>гэс</sub> , млн.руб.	$A_2$	$Z_{стр}$ , млн.руб.	$F_{зат.}$ , км <sup>2</sup>	$Z_{ущ}$ , 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

Табл. VII.2

Годовой водохозяйственный баланс  
для обеспеченности P=95%, млн. м<sup>3</sup>

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

Табл. VII.3

Формирование экологического критерия

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	F <sub>ор</sub> , км <sup>2</sup>	W <sub>пз ор</sub> , млн.м <sup>3</sup>	K <sub>пз</sub>	ВБ, м	F <sub>зат</sub> , км <sup>2</sup>	KP <sub>ЭК</sub>
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:

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

$$\text{энергетика } \mathcal{E}_{\text{ГЭС}} = (V \times 20/41) \times H / 432, \text{ т.МВт}\cdot\text{ч}$$

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

## Формирование производственного критерия

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	F <sub>ор</sub> , га	V <sub>пол</sub> , млн.м <sup>3</sup>	ВБ, м	НБ, м	Н, 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.

$$\text{Экономический критерий: } K_{\Sigma} = D_{\Sigma} / D_{\Sigma \max}$$

$$\text{Производственный: } K_{\Pi} = (K_{\text{ГЭС}} + K_{\text{ор}}) / 2$$

$$K_{\text{ГЭС}} = \frac{\text{Э}_{\text{ГЭС}}}{\text{Э}_{\text{ГЭС} \max}} \quad \text{и} \quad K_{\text{F}} = F_{\text{ор}} / F_{\text{ор} \max}$$

$$\text{Экологический: } K_{\text{ЭК}} = 1 - K_{\text{ПЗ}} / K_{\text{ПЗ} \max}$$

Равноценные критерии - ни одному из критериев не отдается предпочтений.

$$f \rightarrow \max f = K_3 + K_{II} + K_{ЭК}$$

Табл. VII.2

Выбор объема водохранилища (V) методом Домбровского  
для равнозначных критериев

Вариант	V, млн.м <sup>3</sup>	Нормированные значения целевых функций			f
		K <sub>3</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>ЭК</sub>	
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
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  $f = \Psi(V)$  (рис. VII.1).

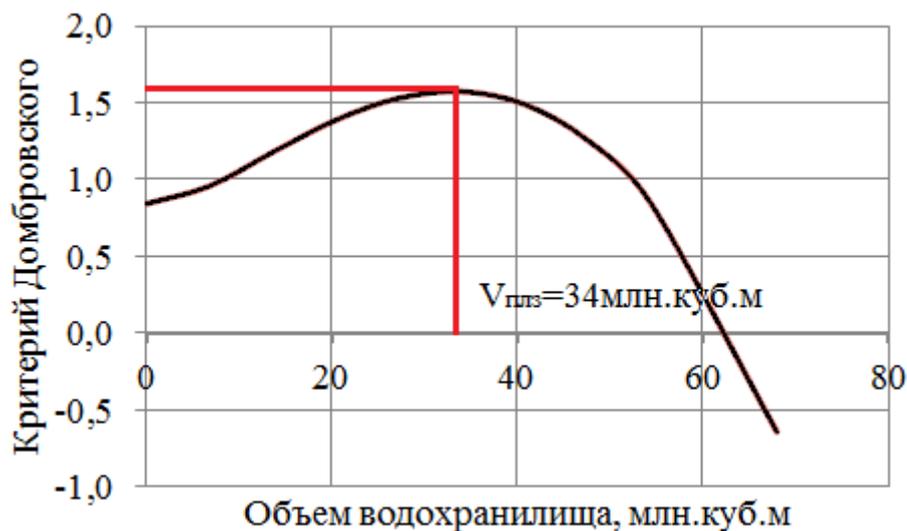


Рис.VII.1 Пример зависимости суммарного критерия оптимизации (f) от объема воды в водохранилище (V) для равнозначных критериев

За компромиссный принимается вариант, в котором функция f имеет максимальное значение:  $V_{птз} = 34$  млн.м<sup>3</sup>.

Неравнозначные критерии – учет предпочтений критериев с помощью весовых коэффициентов ( $\mu$ ).

$$f \rightarrow \max f = \mu_э \times K_э + \mu_п \times K_п + \mu_{эк} \times K_{эк}$$

$$\sum \mu_i = 1$$

Табл.VII.3

Выбор объема водохранилища методом Домбровского для неравнозначных критериев

Вариант	V, млн.м <sup>3</sup>	Нормированные значения целевых функций						f
		K <sub>э</sub>	$\mu_э$	K <sub>п</sub>	$\mu_п$	K <sub>эк</sub>	$\mu_{эк}$	
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		0,12
7	47,6	-1,12		0,69		0,05		-0,17
8	54,4	-2,51		0,79		0,03		-0,58
9	68	-6,55		1,00		0,00		-1,77

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



Рис. 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:  $V_{плз}=22\text{млн.м}^3$ . 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  $K_{чдп}=K_э/K_{э_{\max}}+K_п/K_{п_{\max}}$ . Метод «Уступок» заключается в том, что все критерии оптимизации ( $K_{чдп}$ ,  $K_{эк}$ ) располагаются в порядке приоритетности.

Табл.VII.4

### Выбор объема водохранилища (V) методом Уступок

Вариант	V, млн.м <sup>3</sup>	Значения целевых функций	
		K <sub>чдп</sub> →max	K <sub>эк</sub> →max
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<sub>эк</sub>). Делается его максимизация по искомому параметру: K<sub>эк</sub>→max, которому соответствует объем водохранилища V<sub>1opt</sub>=0 млн.м<sup>3</sup>. Затем назначается величина допустимого снижения максимального значения первого критерия K<sub>эк</sub><sup>max</sup> (уступка ΔK<sub>эк</sub>=50%), которая допускает его снижение при оптимизации других критериев до величины K'<sub>эк</sub>≥K<sub>эк</sub><sup>max</sup>-ΔK<sub>эк</sub>=0,84-0,42.



Рис. 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  $V_{2\text{max}}=21\text{млн.м}^3$ , что не входит в область допустимых значений первого критерия, поэтому следует переопределить уступку первого критерия.

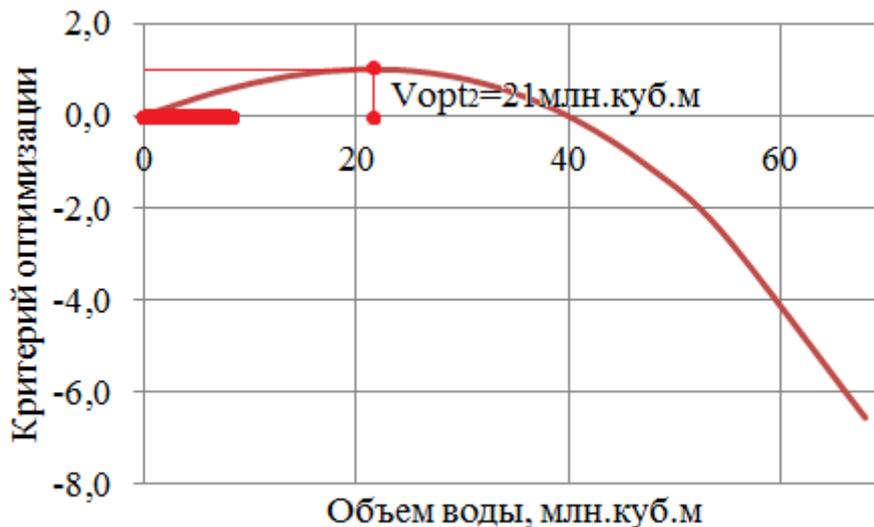


Рис. VII.4 Определение оптимального значения полезного объема путем максимизации производственно-экономического критерия

Условие выполняется при уступке по экологическому критерию 76%. Если это приемлемо, то принимается полезный объем равный  $V_{\text{max}}=21\text{млн.м}^3$ . 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:

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{чд}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{п}} \approx \mathcal{E}\Phi_{\text{эк}},$$

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.

Расчет проводится в табличной форме (табл.VII.5). Принимается вариант решения, в котором кривые  $\Delta\Phi_i=f(V)$  наиболее близко сходятся друг к другу, что соответствует минимальному значению величины:

$$\Delta\Delta\Phi=|\Delta\Phi_{\text{чд}}-\Delta\Phi_{\text{п}}|+|\Delta\Phi_{\text{чд}}-\Delta\Phi_{\text{эк}}|+|\Delta\Phi_{\text{п}}-\Delta\Phi_{\text{эк}}|\rightarrow\min$$

Табл. VII.5

Выбор варианта решения методом «Равной эффективности»

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	Расчет эффективности						ΔЭФ
		K <sub>с</sub>	ЭФ <sub>с</sub>	K <sub>п</sub>	ЭФ <sub>п</sub>	K <sub>эк</sub>	ЭФ <sub>эк</sub>	
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  $\Delta\Delta\Phi=1,31$ , которому соответствует значение полезного объема водохранилища  $V_{\text{плз}}=48\text{млн.м}^3$ .

#### 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:

$$\text{ЭФ}_{\text{зд}} + \text{ЭФ}_{\text{п}} + \text{ЭФ}_{\text{эк}} \rightarrow \max$$

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

Табл. VII.6

Выбор варианта решения методом «Линейной свертки критериев»

Вар.	V, млн.м <sup>3</sup>	Расчет эффективности			
		ЭФ <sub>з</sub>	ЭФ <sub>п</sub>	ЭФ <sub>эк</sub>	ΣЭФ <sub>г</sub>
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
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

*Примечание. Нулевой вариант не учитывается, т.к. нет оптимизируемого параметра.*

По данным таблицы VII.6 выделяются два максимальных значения суммарного критерия ΣЭФ 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  $V_{\text{плз}}=34$ млн.куб.м.

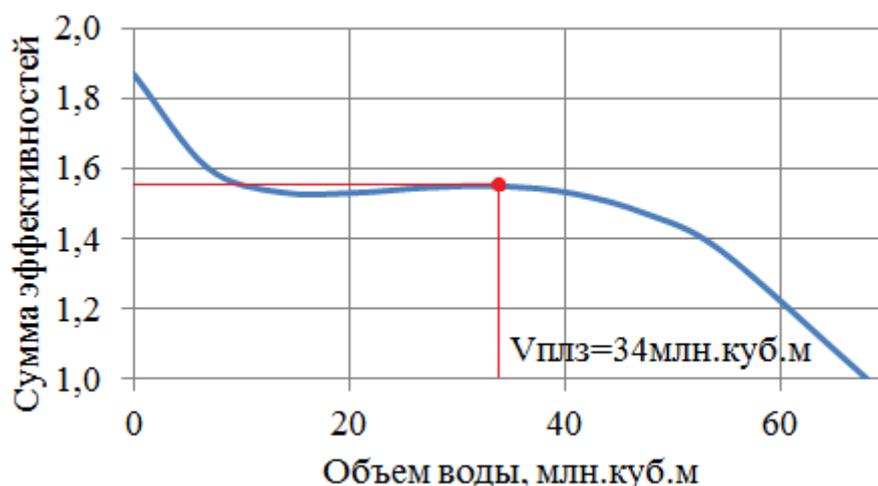


Рис. VII.5 Зависимость суммарного критерия от объемов воды в водохранилище

### 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 ( $K_{чд}$ ,  $K_{п}$ ,  $K_{эк}$ ). Последовательность расчетов.

По всем вариантам определяется сумма предпочтений ( $\Sigma N$ ) 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.

Табл. 7.6

Пример определения предпочтительного варианта методом Фуллера (простой перебор)

Вариант	Критерии			Предпочтения по критериям			Сумма предпочтений
	$K_{чд}$	$K_{п}$	$K_{эк}$	$\Phi_{чд}$	$\Phi_{п}$	$\Phi_{эк}$	
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  $V_{плз}=20\text{млн.м}^3$ .

## 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 ( $\Delta ЭФ$ ), свертки критериев ( $\Sigma ЭФ$ ) и методом Фуллера ( $\Sigma N$ ).

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:

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

Табл. VII.7

Выбор полезного объема водохранилища ( $V_{плз}^{opt}$ ) методом циклограмм

V,	Методы	Критерии	S
----	--------	----------	---

млн.м		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  $V_{плз}=20\text{млн.м}^3$ , которому соответствуют наибольшее значение  $S=0,14$ .

### ВЫВОДЫ

1. Свободный ресурс воды в бассейне реки составляет  $68 \text{ млн.м}^3$ .
2. Оптимальная величина полезного объема водохранилища полученная методом однокритериальной оптимизации составляет  $V_{плз}^{одн}=41 \text{ млн. м}^3$  при распределении воды между Орошением и ГЭС, соответственно: 21 и  $20 \text{ млн.м}^3$ .
3. Величина полезного объема водохранилища полученная методами многокритериальной оптимизации, учитывающей производственный, экономический и экологические критерии, составляет:  $V_{плз}=20\text{млн.м}^3$ , при распределении воды между орошением и ГЭС, соответственно: 10,2 и  $9,8 \text{ млн.м}^3$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Типовое внутригодичное распределение речного стока  
для лет разной обеспеченности, %

Район	Р%	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

Значения модульных коэффициентов речного стока  $K_p\%$  ( $C_s=2 \times C_v$ ).

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 1999г

### Учебные

6. Галямина, И.Г. Управление водохозяйственными системами: Учебное пособие / И.Г. Галямина, Т.И. Матвеева, В.Н. Маркин, Л.Д. Раткович, И.В. Глазунова. - М.: РГАУ-МСХА, 2018. -145с.
7. Галямина, И.Г. Управление процессами/И.Г. Галямина. - М.: МГУП, 2011 – 446с.
8. Галямина, И.Г. Задачи по комплексному использованию водных ресурсов: учебное пособие./И.Г. Галямина. - М.: МГУП, 2002.
9. Иванов, А.Н. Гидрология и регулирование стока: учебник/А.Н. Иванов, Т.А. Неговская. – М.:Колос,1979.-С.384
10. Курс лекций по управлению техногенными комплексами, И.Г. Галямина. –М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011 – 298с.

11. Мумладзе, Р.Г. Управление водохозяйственными системами: учебник./Р.Г. Мумладзе [и др.] - М.: КНОРУС, 2010. - 208 с.

### **Дополнительные**

12. Маркин, В.Н. Обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне реки: учебное пособие./В.Н. Маркин, Л.Д. Раткович, С.А. Соколова.- М: МГУП. 2006.-С.91.
13. Маркин, В.Н. Разработка мероприятий по комплексному использованию и охране водных объектов в бассейне реки: Учебное пособие./В.Н. Маркин, Л.Д. Раткович, С.А. Федоров.-М.:МГУП, 2011.-102 с.
14. Раткович, Л.Д. Вопросы рационального использования водных ресурсов и проектного обоснования водохозяйственных систем: монография./ Л.Д. Раткович, Л.Д., В.Н. Маркин, И.В. Глазунова.-М.: МГУП, 2013.- 258 с.
15. Шабанов, В.В. Комплексное использование водных ресурсов и охрана природы: учебник./ В.В. Шабанов, И.Г. Галямина, Н.Ф.Юрченко. - М.: Агропромиздат, 1994.
16. Шабанов, В.В. Эколого водохозяйственная оценка водных объектов: монография./В.В. Шабанов, В.Н. Маркин.-М.:МГУП, 2009.
17. Бин, И. ван. Планирование и управление водохозяйственными системами. Введение в методы, модели и приложения: монография./И. ван. Бин, П. Лаукс. - М.: Юстицинформ, 2009. -660с.
18. Институт менеджмента, маркетинга и финансов. математика интерактивный обучающий курс. [Электронный ресурс] - Тема 5. Сетевое планирование и управление.[режим доступа] <http://math.immf.ru/lections/305.html> - (дата обращения 5.02.2015).
19. Костевич, Л.С. Теория игр. Исследование операций: монография./Л.С. Костевич, А.А. Лапко. – Минск: Вышэйшая школа.- 1982. – 230с.

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./Н.Н. Моисеев. - М.: Наука, 1981.-С.488