

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»  
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)**

На правах рукописи

**МУАЛЛА МАНХАЛЬ**

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И  
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОДОХРАНИЛИЩ С  
УЧЕТОМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность: 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор  
Раткович Лев Данилович,

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ПРОБЛЕМЫ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ.....	10
1.1 Водные ресурсы речного бассейна, методы анализа и оценки.....	12
1.2 Методы водоподготовки и влияние хозяйственной деятельности на экологию речного бассейна.....	19
1.3 Принципы и мероприятия рационального водопользования.....	32
Выводы по главе 1 .....	41
ГЛАВА 2. ВОДОХРАНИЛИЩА В РЕШЕНИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОБЛЕМ.....	43
2.1 Роль водохранилищ в решении водохозяйственных проблем.....	48
2.2 Классификационные схемы водохранилищ.....	53
2.3 Факторы, влияющие на выбор створа гидроузла.....	60
2.4 Примеры комплексного функционирования водохранилищ в решении водных проблем.....	61
2.5 Моделирование батиграфических зависимостей.....	71
Выводы по главе 2 .....	75
ГЛАВА 3. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	77
3.1 Использование местных ресурсов водосборов.....	77
3.2 Повторное использование сточных вод.....	79
3.3 Использование дренажных вод.....	86
3.4 Метод опреснение морских вод.....	87
3.5 Перспективы использования альтернативных водоисточников.....	91
Выводы по главе 3 .....	96
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ГАРАНТИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ВОДОХРАНИЛИЩ.....	97
4.1 Водохозяйственные и водно-энергетические расчеты и балансы как основа анализа гарантированных водных ресурсов.....	97
4.2 Особенности расчета отдачи водохранилищ на основе обобщенных параметров стока и водопотребления.....	104

4.3 Метод «трех групп» в качестве универсальной системы критериев покрытия водопотребления.....	111
Выводы по главе 4 .....	119
ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА С ОЦЕНКОЙ ГИДРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА.....	120
5.1 Имитационное моделирование водохозяйственного баланса с оптимизацией гарантированной водоотдачи.....	120
5.2. Пример применения оптимизационной модели.....	124
Выводы по главе 5 .....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	156

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Стратегия государственной водной политики строится на парадигме разумного компромисса экологических и водохозяйственных запросов к водным ресурсам. Очевидна необходимость рационального подхода к проблеме, суть которого заключается в первоочередности мероприятий по экономии водных ресурсов, регулированию и улучшению качества воды, модернизации отраслевого водопользования. Только с учетом комплексных водохозяйственных и водоохраных мероприятий, целесообразно приступать к проектам управления водными ресурсами. Центральным элементом большинства водохозяйственных систем являются водохранилища. Методика оценки гарантированной воды и энергоотдачи водохранилищ – одна из основных решаемых задач в гидролого-водохозяйственной практике. Особенно часто методика используется для обоснования решений в схемах КИОВО, ТЭО водохозяйственных проектов и непосредственно при разработке режимов водопользования и управления водными ресурсами.

**Степень разработанности темы.** Исследования проблематики водохозяйственных расчетов и балансов уходит в середину XX века (С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, 1952). Уже в то время теория водохозяйственных и водно-энергетических расчетов представлялась самостоятельной наукой, которая строится на гидравлике (движение воды), инженерной гидрологии (оценка и прогноз водных ресурсов) с ее стохастическими приложениями, гидрогеологии (подземные воды), теории управления процессами и системами, и завершается экономической оценкой эффективности принимаемых проектных решений. Российская научная школа дисциплины связана прежде всего с именами создателей современной инженерной гидрологии С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (1981, 1982), Потапова М.Б. (1940) и Саваренского А.Д. (1950). В дальнейшем теоретические построения по мере развития компьютерных технологий, создания и функционирования гидротехнических и водохозяйственных систем, развивались Блохиновым Е.Г. (1974), Сванидзе Г.Г. (1977), Сармановым О.В. (1983), Резниковским А.Ш.

(1984), Ратковичем Д.Я. (1993), Фроловым А.В. (2006), Исмайыловым Г.Х. (2006), Сармановым И.О. (2009), Клёповым В.И. (2011), Асариним А.Е. (2012), Александровским А.Ю. (2012), Болговым М.В. (2016), Косолаповым А.Е. (2017), Ратковичем Л.Д. (2007, 2020), Мотовиловым Ю.Г и Гельфаном А.Н. (2019), и другими исследователями. Из зарубежных авторов наиболее результативными можно считать работы Питера Лаукса (2009), которые, несмотря на широту охвата тем, в недостаточной степени отражают водохозяйственную специфику принятых в России подходов. В то же время ряд вопросов остаются не до конца разработанными, либо не имели ранее достаточных инструментов для более обоснованных решений с использованием имитационного и стохастического моделирования. В числе таких вопросов можно назвать оптимизацию режимов регулирования речного стока, обоснование гарантированной водо и энергоотдачи водохозяйственных систем, обоснование режима совместного использования поверхностных и подземных вод, прохождение максимально стока через гидроузлы.

Работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.1.6. «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология»:

п. 7. Водохранилища и подпертые бьефы речных гидроузлов, режимы эксплуатации водохранилищ; методы управления режимами работы водохранилищ и их каскадов. Влияние водохранилищ на режимы рек и окружающую среду.

п. 20. Речной сток и русловые процессы: формирование и пространственно-временные изменения, моделирование и прогнозирование.

**Предмет исследований** – факторы обоснования режима регулирования речного стока и параметров водохранилищ с учетом оценки их водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала. В соответствии с задачами исследований анализируются альтернативные источники водоснабжения, имитационное и оптимизационное моделирование водохозяйственных балансов с учетом гидроэнергетической составляющей, моделируются батиграфические зависимости, формализована практически универсальная система покрытия водопотребления.

**Объект исследований** – водохранилища в составе водохозяйственных систем территориально - временного регулирования речного стока.

**Цель исследований** – постановка и решение задачи анализа и оценки гарантированной водной и энергоотдачи водохранилищ в условиях сезонного и многолетнего регулирования речного стока на основе моделирования различных схем водохозяйственного баланса с учетом многоцелевого водопользования и привлечения альтернативных источников водоснабжения.

**Задачи исследований.** В процессе исследований решались следующие задачи:

- оценка роли водохранилищ в решении водохозяйственных проблем и факторов влияния на их регулируемую способность
- формализация батиграфических зависимостей в створах водохранилищных гидроузлов с помощью степенных функций;
- оценка альтернативных источников водоснабжения с точки зрения области применения, затратности и эффективности;
- формализация универсальной системы критериев удовлетворения требований водопользователей на основе метода «трех групп»;
- разработка имитационной модели водохозяйственного баланса применительно к различным схемам регулирования стока с минимизацией регулирующей емкости водохранилища;
- разработка версии имитационной водно-балансовой модели с максимизацией гарантированной водной и энергоотдачи водохранилища

**Научная новизна исследований.** Проведен анализ водохозяйственно-экологических проблем, решаемых с помощью водохранилищ и факторов, влияющих на их регулируемую способность. Выполнена формализация морфометрических зависимостей для разных диапазонов объемов и площади зеркала водохранилищ. Сделана оценка альтернативных источников водоснабжения с точки зрения области применения и социально-экономической эффективности. Сформулированы критерии удовлетворения требований к водным ресурсам и предложена практически универсальная система критериев покрытия комплексного водопотребления («метод трех групп»), основанная на вероятности попадания водо-

отдачи в заданный интервал значений. Благодаря такому подходу понятие обеспеченности отдачи трансформируется в обеспеченность установленного диапазона значений. Соискателем разработаны версии модели имитационного водохозяйственного баланса с оптимизацией целевых показателей, характеризующих водохозяйственный и гидроэнергетический потенциал речного створа.

**Теоретическая и практическая значимость исследований.** Показана необходимость и перспективность альтернативных источников водоснабжения. Обоснована достаточно универсальная и важная для практики система критериев удовлетворения требований водопользователей в условиях многоцелевого использования водных ресурсов. Предложены имитационные модели водохозяйственного баланса для обоснования параметров водохранилищ на основе оптимизации целевых показателей. Разработан расчетный программный модуль «WEPRIVERSITE» в Excel, позволяющий проводить анализ эффективности регулирования стока в створе водохранилища с заданным набором исходной информации по конкретному объекту.

**Методы диссертационного исследования.** Методические подходы, примененные в диссертации, опираются на теоретические разработки российских и зарубежных ученых, занимающихся неизменно актуальными научно-практическими задачами водохозяйственного проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений различного назначения, включая коммунально – бытовое хозяйство, промышленность, гидромелиорацию. Для решения такого типа задач используются методы системного анализа, включая теоретические методы расчета параметров водохранилищ и режима регулирования стока, инструментарий стохастического и имитационного моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- функции водохранилищ в решении водохозяйственных проблем;
- моделирование морфометрических (батиграфических) зависимостей в створе гидроузла и их влияние на величину водно-энергетического потенциала водохранилищ
- необходимость использования альтернативных источников водоснаб-

жения в современном водном хозяйстве;

- универсальная система критериев удовлетворения требований водопользователей на основе метода «трех групп»;
- имитационная модель водохозяйственного баланса применительно к схемам независимого и компенсированного регулирования стока с минимизацией регулирующей емкости водохранилища;
- имитационная модель водохозяйственного баланса с максимизацией гарантированной водной и энергоотдачи водохранилища.

**Степень достоверности полученных результатов.** Результаты исследований выполнены в соответствии с действующими методиками водохозяйственных и водно-энергетических расчетов, разработками признанных авторитетов в области имитационного и стохастического моделирования, большим количеством специальной литературы по рассматриваемой тематике.

**Личный вклад соискателя** заключается в обзоре и анализе проблем водоснабжения нескольких водохозяйственных объектов в РФ и за рубежом, в изучении традиционных и альтернативных источников водоснабжения, существующих водохранилищ отраслевого и комплексного назначения, разработке макетов и алгоритма моделирования водохозяйственных балансов разной структуры.

**Апробация результатов исследований.** Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова (Москва, 2019); всероссийская конференция с международным участием молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова (Москва, 2021); VI Всероссийский научно-практический семинар ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», посвященный 120-летию со дня рождения Андрея Васильевича Михайлова (Москва, 2023); конкурс научно-исследовательских работ обучающихся в области водоснабжения и водоотведения, ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ» (диплом за II место в номинации «подготовка питьевой воды»); международная научно-практическая конференция «Современное состояние инженерных инфраструктур в АПК» в МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, 2022).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них 1 публикация в журнале международной базы Scopus: Power Technology and Engineering. Получено свидетельство о регистрации базы данных для учебного процесса и разработана компьютерная программа WEPRIVERSITE (Water Energy Potential River Site) в среде Excel для оценки водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала в речном створе.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 165 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Основная часть содержит 19 таблиц, 32 рисунка, список литературных источников из 134 наименований российских и зарубежных исследователей и 2 приложения.

## ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ПРОБЛЕМЫ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ

В начале девяностых годов двадцатого века в Докладе о развитии человеческого потенциала, опубликованном Организацией Объединенных Наций в 1990 году, была выдвинута идея безопасности человека в качестве основы, выходящей за рамки классической концепции национальной безопасности, которая ограничивалась военными аспектами, безопасностью и смежными аспектами. Безопасность человека определялась как наличие защиты от непредсказуемых событий, возникновение которых приводит к нарушению человеческой жизни и средств к существованию. Водная безопасность или водозащита считалась неотъемлемой частью этой новой и всеобъемлющей концепции безопасности человека. Отсутствие благоприятных условий для достижения водной безопасности препятствует достижению критериев безопасности [5].

Водная безопасность рассматривалась прежде всего как ситуация, когда у каждого есть возможность или способность иметь доступ к чистой, безопасной воде в достаточном количестве по правильной цене. То есть они должны иметь возможность здоровую и достойную жизнь. При этом население должно сохранять водные экосистемы, обеспечивающие доступ к воде. Качество воды должно гарантировать отсутствие болезнетворных бактерий.

С другой стороны, отсутствие водных ресурсов является серьезным нарушением некоторых из наиболее важных принципов социальной справедливости и гражданства. Предполагается, что справедливое гражданство гарантирует каждому право на равный объем гражданских, политических и социальных прав, включая их эффективное осуществление, в то время как отсутствие водных ресурсов представляет угрозу для него, потому что это уменьшает равные возможности, что является необходимым условием для достижения социальной справедливости.

В настоящее время отсутствие безопасности водных ресурсов больше не рассматривается только с точки зрения физического дефицита воды, который из-

вестен как неспособность водных ресурсов удовлетворить спрос, но также и как результат плохой политики управления водными ресурсами.

Изменение климата за последние два десятилетия, сопровождающееся изменением характера осадков, возникновением экстремальных погодных явлений и повышением уровня моря, ясно высветило разрушительные свойства воды, которые проявляются в штормах, ураганах, наводнениях и даже засухах. Именно это побудило гидрологов рассматривать водную безопасность как также связанную со способностью прогнозировать риски и возможностью уменьшения ущерба, наносимого разрушительными свойствами воды [3, 5].

Глобальное потепление и изменение климата, чрезмерный забор воды из водоносных горизонтов, загрязнение поверхностных и подземных вод - все это угрожает экосистемам и доступности пресной воды.

Почти повсюду в мире вода загрязнена в масштабах, которые угрожают здоровью людей и экономическому развитию нынешнего и будущих поколений, поскольку последствия потери водных ресурсов будут шокирующими, учитывая, что вода является основной потребностью для всей жизни.

Что касается людей, то сообщества, имеющие доступ к безопасной и адекватной воде и санитарии, с наибольшей вероятностью будут процветать.

С экономической точки зрения, без этого многие пострадали бы от вспышек болезней нищета и даже перемещение населения из-за нехватки воды. Вода необходима для выживания человека и имеет решающее значение для будущего человечества.

Водная безопасность является основой гуманитарных программ и программ развития. Хотя мы признаем, что глобальная водная безопасность является недостижимой целью, которая требует высокого уровня сотрудничества, достижения консенсуса и командной работы. Это требует амбициозного проекта, опирающегося на партнерские отношения и использующего различные внутренние и внешние ресурсы.

### 1.1. Водные ресурсы речного бассейна, методы анализа и оценки

Мировые запасы водных ресурсов подвержены изменениям, динамика которых пока сложно прогнозируема. Содержащаяся в мантии Земли вода (более 15 млрд кубокилометров) с конечной вероятностью может поступать в гидросферу в результате различных процессов в глубинных слоях земного шара, включая вулканические извержения. Более близкие во времени явления, такие как таяние и разрушение ледников с очевидной тенденцией роста, приводят к образованию достаточно крупных озер. Причины изменения климата, связаны, в том числе, с антропогенным воздействием на природную среду. Вырубка лесов, огромные объемы выбросов в атмосферу, загрязнение почвы, сброс недостаточно очищенных сточных вод в водные объекты способствуют развитию парникового эффекта [3, 4, 6, 112].

Современная оценка количества воды, содержащегося в гидросфере, оценивается примерно в полтора миллиарда кубических километров. Несложно подсчитать, что, распределив названный объем воды по поверхности земной сферы с радиусом 6370 км, мы получим сравнительно «тонкую» водную оболочку шириной 2,75 км. Подземные воды составляют при этом примерно 60 млн. км<sup>3</sup>. В то же время на долю пресных вод приходится всего 35 млн. км<sup>3</sup>, из которых за вычетом снегов и ледников остается лишь 95 тысяч кубических километров (рис. 1.1). Это достаточно внушительная цифра, тем не менее вследствие неравномерного распределения ресурсов по территориям земного шара, дефицит воды - очень распространенное событие. Причина в том, что области недостаточного увлажнения охватывают не менее 60 % земель с населением в несколько миллиардов человек. Распределение потенциальных водных ресурсов в разрезе регионов мира показано на рисунке 1.2.

По материалам российского института стратегических исследований (РИСИ) уровень использования ресурсов поверхностных пресных вод во всем мире несколько превышает 50% доступных возобновляемых ресурсов. Прогнозируется, что к 2025 году количество стран с критически низким уровнем водопотреб-

ления вырастет примерно два раза и достигнет 32-35. В числе стран с такой перспективой Ближний Восток, ряд постсоветских стран.

Многим группам живых организмов грозит гибель вследствие вероятных изменений климата. Сейчас трудно предсказать масштабы последствий, но можно их только предсказать с той или иной степенью вероятности. Влияние изменений климата на гидрологические процессы очевидна, поэтому модели речного стока и других элементов водного баланса строятся на вероятностной основе с использованием установленных временных трендов.

В результате работы «Рио+20» более ста стран подписали совместное заявление о мировом развитии в будущем. Конференция заложила основу для целей устойчивого развития в таких ключевых областях, как продовольственная безопасность, распределение воды и энергии. В итоговом заявлении содержится обязательство стран-участниц предпринять шаги по снижению загрязнения морских экосистем и укрепление программы ООН по окружающей среде.

Следует отметить, что Россия как страна с огромным потенциалом водных ресурсов занимает передовые позиции в области качественного водопользования. В то же время, множество проблем и методы их решения пока лишь изложены в материалах программы развития водохозяйственного комплекса страны на ближайшее десятилетие [23, 82].



Рисунок 1.1 – Состав гидросферы

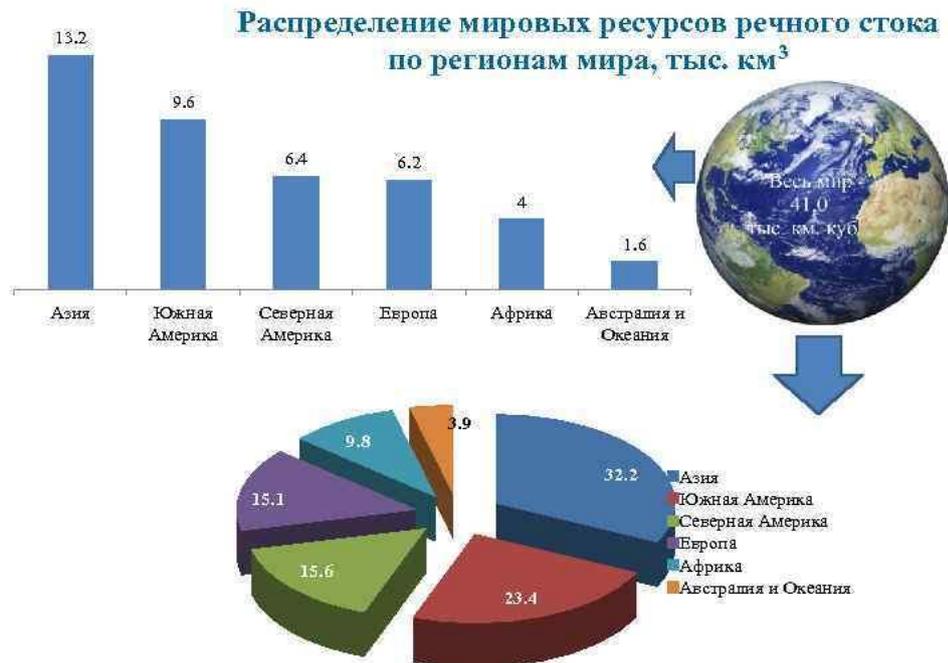


Рисунок 1.2 – Распределение водных ресурсов по мировым регионам

Водные ресурсы складываются из статических запасов и возобновляемых вод. Практическое значение для человека имеют в настоящее время ежегодно возобновляемые ресурсы речного стока. Объем годового стока (средний за многоле-

тие) на территории России в границах до 2022 года составлял более 4 тысяч кубокилометров, что соответствует около 28 тыс. м<sup>3</sup>/год на одного человека (в Европе данный показатель в 6 раз ниже). Сток маловодных лет крупных рек РФ по нашим оценкам находится на уровне на уровне (70-75) % от среднего. У средних и малых рек данный показатель существенно меньше в зависимости от условий формирования, определяющих многолетнюю изменчивость гидрологических характеристик. Изменчивость годовых объемов стока оказывает существенное влияние возможность его использования и на эффективность регулирования стока водохранилищами [8]. В крупных бассейнах РФ, таких как Волга, Дон, Днепр, Печора, Сев. Двина сток многоводных лет выше многолетней нормы в полтора-два раза. Наоборот, в маловодные имеет место снижение на (30-50) %. Сибирские реки характеризуются относительно невысокой изменчивостью. Наибольшие коэффициенты вариации свойственны засушливым районам Прикаспийской низменности и Казахстана, когда сток экстремально маловодных лет близок к нулю. На большей части территории СССР – выраженное весеннее половодье. Что касается режима формирования стока, то в среднем около 80 % стока формируется из поверхностных вод и порядка 20 % из подземных ресурсов. При создании водохозяйственных систем показателем водообеспеченности является соотношение водных ресурсов расчетных маловодных периодов с водопотреблением [21, 43, 67].

В зависимости от масштабов водохозяйственного комплекса принимаются во внимание водные ресурсы одного или нескольких речных бассейнов или подбассейнов. Анализ и оценка изменений речного стока последних десятилетий исследованы в работах В.Ю. Георгиевского, Н.И. Коронкевича, Г.Х. Исмайылова, А.В. Фролова, Н.Л. Фроловой, Р.Г. Джамалова, С.А. Журавлевой, М.В. Болгова и других ученых.

В условиях интенсификации водопользования, изменения климата и землепользования достижение надежного управления водными ресурсами в масштабах речного бассейна становится все более сложной задачей. Водораспределение внутри водохозяйственного комплекса должна распределяться с учетом приоритетности, правомерных критериев удовлетворения требований между различными

отраслями, при условии сохранения экологических требований водных и околоводных экосистем [4, 38, 67].

Оценка морфометрических характеристик водных бассейнов с точки зрения управления водными ресурсами является одним из важных факторов учета в наших исследованиях, главным образом вследствие их изменения во времени и влияния этих изменений на регулируемую способность водохранилищ. Морфометрические характеристики водных бассейнов непосредственно связаны с геологической структурой, климатом, растительным покровом, поскольку влияют на гидрологию водотоков. Причиной изменения морфометрических характеристик, в частности батиграфии, такие как загрязнение, эрозия почвы, оползни и наводнения. К этим причинам добавляется небрежное отношение к экологии, связанное вырубкой лесов (или наоборот с облесением), строительство сооружений на водосборах в пределах водоохраных зон и другие [4, 6, 20, 38].

В то же время сезонное и в особенности многолетнее регулирование стока, хотя и увеличивает гарантию водоснабжения, одновременно усложняет управление водными ресурсами, поскольку требует развития инфраструктуры, правильной эксплуатации водохранилищ и других сопутствующих сооружений. Меняется естественный режимы стока, перекрываются пути движения рыбы и .т.п.. Вероятное изменение климата вносит неопределенность в оценку количества располагаемых ресурсов [28, 37, 81, 113].

Повышается необходимость разработки методов надежного определения гарантированных ресурсов. Гидрологическое моделирование, анализ данных и сценарное планирование используются для оценки доступности воды в различных климатических условиях и сценариях регулирования. Конечно, этому должна способствовать соответствующая нормативно-правовая основа. Эта основа должна включать распределение прав на воду, требования к экологическим стокам и режимы управления водохранилищами и системами перераспределения стока [38, 70, 115].

Основным инструментом определения располагаемых водных ресурсов в современной практике управления водными ресурсами являются имитационные и

оптимизационные математические модели, которые позволяют имитировать как естественные гидрологические и гидрогеологические процессы, так и режим управления отдельными водохранилищами или их системами. Одновременно при этом ставится задача сделать алгоритм управления наиболее оптимальным и одновременно менее сложным.

Гидрологические модели являются основой для оценки гарантированных водных ресурсов. Теория моделирования гидрологических процессов, по существу, начинается с середины XX века. С тех пор появились методы стохастического и имитационного моделирования, способные объединить моделирование естественных процессов и технологий управления водными ресурсами. Гидрологическое моделирование включает разработку и применение математических и вычислительных моделей для представления сложных взаимодействий между элементами водного баланса в речного бассейна или подбассейна [4, 5, 43, 75].

Комплексное управление водными ресурсами, включающее гидролого-водохозяйственное моделирование дает возможность отрабатывать различные сценарии изменения гидрологических, экологических и социально-экономических факторов в процессе принятия решений.

**Нормативно-правовая база** играет жизненно важную роль в определении гарантированных ресурсов и управления ими, поскольку учитывает следующие факторы [38]:

- права на воду, регулирующие водораспределение, основанные на старшинстве или права прибрежных государств, влияют на определение гарантированных ресурсов в случае трансграничных отношений

- экологические потоки - учет требований к экологическим стокам гарантирует необходимое количество воды для экономики и населения

- ПИВР (правила использования водных ресурсов водохранилищ) регулируют эксплуатацию (управление) одного или нескольких водохранилищ системы на основе серии диспетчерских графиков, что обеспечивает преемственность проектных решений с режимом эксплуатации, включая целевые и комплексные пуски из водохранилищ.

Для оценки гарантированных ресурсов при сезонном и многолетнем регулировании стока используются многолетние данные наблюдений за стоком и другими ЭВБ. Обычно ретроспективный ряд принимается в качестве прототипа будущего водного режима [17]. Либо выполняется стохастическое моделирование гидрологической и гидрометеорологической информации в нужном объеме. Для этого необходимы методы теории вероятностей и математической статистики, которые будут реализовывать принятую вами модель процесса. В качестве такой модели для стока обычно применяются различные версии простой цепи Маркова (авторегрессия первого порядка). Сценарный анализ применяется уже в имитационном моделировании для имитации режима управления [98, 99].

Определения гарантированных ресурсов при независимом сезонном и долгосрочном регулировании предусматривает использование этого для:

- планирование распределения воды между субъектами вододеления
- использование в разработке стратегий борьбы с засухой
- оптимизацию развития инфраструктуры, включая планирование водной инфраструктуры, в виде водохранилищ, водоводов, ирригационных систем и т.д.

Далее приводятся некоторые тематические исследования, выполненные в разное время в разных странах.

### **Тематические исследования разного времени**

Несколько тематических исследований иллюстрируют определение гарантированных ресурсов при независимом сезонном и долгосрочном регулировании:

**Бассейн реки Колорадо:** Управление водными ресурсами в бассейне реки Колорадо включает сложные соглашения и правила для распределения гарантированных ресурсов между многочисленными заинтересованными сторонами, включая семь штатов США и Мексику. Бассейн реки Колорадо служит характерным примером для понимания сложностей управления водными ресурсами в засушливых и полузасушливых регионах.

**Бассейн Мюррей-Дарлинг, Австралия:** План бассейна Мюррей-Дарлинг в Австралии направлен на обеспечение эффективного управления водными ресурсами путем установления требований к экологическому стоку и распределения

гарантированных ресурсов различным пользователям, включая сельское хозяйство и окружающую среду.

**Бассейн реки Янцзы, Китай:** Бассейн реки Янцзы в Китае сталкивается с проблемами, связанными с нехваткой воды, загрязнением и деградацией экосистем. Плотина «Три ущелья», крупнейший в мире гидроэнергетический проект, имеет значительные последствия для гарантированных ресурсов и регулирования стока в бассейне.

Традиционные трудности при оценке гарантированных ресурсов связаны со следующими факторами:

- доступность и качество информации, обусловленная ограниченной доступностью данных и низким уровнем достоверности в регионах с отсутствием или недостаточностью материалов наблюдений.

- неопределенные на сегодняшний день климатические изменения

- трансграничные речные бассейны требуют скоординированных усилий пограничных стран, что далеко не всегда находит понимание у лиц, принимающих решения.

## **1.2. Методы водоподготовки и влияние хозяйственной деятельности на экологию речного бассейна**

В современных условиях по данным государственной статистической отчетности РФ забор воды из природных водных объектов превышает 80 кубических километров в год, около 80% которых приходится на пресные поверхностные воды. В природные водные объекты сбрасывается значительное количество недостаточно очищенных сточных вод и несколько кубокилометров без очистки. Как следствие многократное превышение ПДК в ряде речных бассейнов с выраженной водохозяйственной напряженностью. Развитие отраслей промышленности и сельского хозяйства, благоустройство городов и населенных пунктов, связанное с техническим прогрессом и ростом населения, неизбежно вызывают дефицит гарантированных водных ресурсов в силу резкого ухудшения качества во-

ды.

В стране с огромными запасами пресных вод можно считать естественным приоритет проблемы качества водных ресурсов. Тем не менее преобладающий подход в водопользовании долгое время был на стороне экономических приоритетов, оставляя экологические интересы на втором плане. Применение экологически грязных технологий в промышленности и сельском хозяйстве, сброс недостаточно очищенных коммунальных стоков, поступление загрязняющих веществ с водосборных территорий способствовало загрязнению поверхностных водных объектов нефтепродуктами, фенолами, биогенными веществами, тяжелыми металлами, различными высокотоксичными веществами. Наибольшее антропогенное воздействие испытывает р. Волга с притоками, в которые поступает почти половина сосредоточенных сточных вод (Маркин, Раткович, Глазунова, 2015) [6, 50, 54, 112].

Водная стратегия РФ на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительством Российской Федерации в 2009 г. и пролонгируемая до 2030 года, вскрывает проблемы и намечает основные направления развития водохозяйственного комплекса страны. Стратегия реализуется посредством федеральной и локальных государственных программ.

Качество поверхностных вод определяется совместным действием климатических и геологических факторов: количество осадков, экологическая обстановка в бассейне, вещества, несущие пыль, вулканический пепел, бактерии и другие негативные ингредиенты. Значительным загрязнителем являются промышленные выбросы в атмосферу, увеличивающие загрязнение благодаря органическим соединениям азота и серы, которые могут даже провоцировать кислотные дожди. Качество воды часто ухудшается из-за деятельности человека и инфраструктуры, что делает сам источник жизни угрозой для жизни [25]. Соответствие степени загрязнения оценочным показателям можно проследить по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Гигиеническая классификация водных объектов по степени загрязнения

Оценочные показатели загрязнения водных объектов								
Степень загрязнения	Органолептические свойства		Токсикологические свойства	Санитарный режим водоемов		Бактериологические показатели		Индекс загрязнения
	Запах, привкус (в баллах)	ПДК <sub>орг</sub> , степень превышения	ПДК <sub>токс</sub> , степень превышения	БПК <sub>полн</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Растворенный кислород, мг/дм <sup>3</sup>	Число бактерий группы кишечной палочки		
						I и II КВ <sup>1</sup>	I и II КВ	
Доп.	2	1	1	3-6	4	Не более 1·10 <sup>4</sup>	Не более 1·10 <sup>4</sup>	0
Умер.	3	4	3	6-8	3	Более 1·10 <sup>4</sup> -1·10 <sup>5</sup>	Более 1·10 <sup>4</sup> -1·10 <sup>5</sup>	1
Выс.	4	8	10	8-10	2	Более 1·10 <sup>5</sup> -1·10 <sup>6</sup>	Более 1·10 <sup>5</sup> -1·10 <sup>6</sup>	2
Чрезв. выс.	>4	>8	100	>8-10	1	Более 1·10 <sup>6</sup>	Более 1·10 <sup>6</sup>	3

#### Примечание

<sup>1</sup>КВ - категория водопользования. К I категории водопользования относятся водные объекты, используемые для хозяйственно-питьевых целей, ко II категории - водные объекты, используемые для культурно-бытовых целей, а также расположенные в черте населенных мест.

Организация Объединенных Наций признала чистую воду одним из основных прав человека. Тем не менее, большая часть населения мира каждый день живет в условиях, когда вода находится под угрозой. Это может означать, что питьевая вода непригодна или что источники поверхностных вод находятся под угрозой, другими словами, загрязнение рек и озер. Это касается не только людей, но и всех форм жизни. Категории качества воды отслеживаются в таблице 1.2 и по показателю НДК в таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Основные категории качества воды в водоисточниках

описание	категория	Использование и действительность
Высокого качества	1	Чистая вода, используемая для питья и других целей, например вода из горных источников.
Хорошее качество	2	Чистая вода с пониженной степенью 1 категории - и используется после простой фильтрации и стерилизации
Умеренное качество	3	Вода, содержащая нетоксичные загрязняющие вещества, удаляемые путем глубокой фильтрации и используемая для орошения и разведения рыбы.
Низкое качество	4	Вода, загрязненная одним или несколькими загрязняющими веществами, очищенная и используемая для некоторых промышленных целей
Плохое качество	5	Вода, загрязненная несколькими опасными или токсичными загрязнителями

Таблица 1.3 – Нормативы допустимых концентраций (НДК) загрязняющих веществ в бытовых сточных вод

Список загрязненных веществ	НДК загрязненных веществ, мг/дм <sup>3</sup>
Азот аммонийный	18
Формальдегид	0,6
Алюминий	0,5
БПК5	700
Взвеш. в-ва	300
Железо общее	1,1
Жиры	50
Кадмий	0,05
Медь	0,04
Нефтепродукты	0,7
Свинец	0,5
Сульфаты	500
Сульфиды	1,5
Хром (III)	0,5
Хром (VI)	0,2
Цинк	0,1

Источники воды могут быть загрязнены тяжелыми металлами и сложными органическими соединениями, такими как побочные продукты нефти или фармацевтических препаратов, радиоактивными изотопами и микроэлементами. Перемещение этих загрязнителей через водные системы зависит от их растворимости в воде и способности связываться с мелкими частицами. Таким образом, некоторые загрязняющие вещества могут перемещаться на большие расстояния от источника, в то время как другие нейтрализуются путем самоочистки речной воды.

Огромные усилия предпринимаются для улучшения состояния критических водоемов. В этом отношении был достигнут прогресс. Датчики и детекторы используются для изучения движения загрязняющих веществ в воде, для измерения качества воды и для лучшего понимания путей переноса загрязнителей. Это помогает избежать и смягчить последствия загрязнения. Обучение должно быть сосредоточено на аналитических методах для повышения их точности и уровней обнаружения. Это позволяет правительствам и лицам, принимающим решения, быть уверенными в надежности получаемых ими данных о качестве воды [69].

Загрязнители сельскохозяйственных, городских и промышленных попадают в водоносные горизонты, увеличивают частоту и интенсивность вредоносного цветения водорослей в пресных водах с низким уровнем стока. Увеличение концентрации микроэлементов в подземных водах стало серьезной проблемой общественного здравоохранения во многих странах. Это включает, например, более высокие уровни мышьяка в грунтовых водах. Два изотопа урана, уран-238 и уран-235, используются для оценки того, имеет ли уран в воде естественное происхождение или он является продуктом ядерного топливного цикла. Исследователи также смогли показать степень загрязнения радионуклидами поверхностных вод, находящихся на воздухе в открытых водоемах. Эта информация была особенно важна после аварий в Чернобыле и Фукусиме.

Чтобы обнаруживать загрязняющие вещества до того, как они станут угрозой для здоровья или окружающей среды, лабораториям необходимы знания в области аналитических методов, обеспечивающих получение высококачественных результатов даже в следовых количествах. Лица, принимающие решения, также

должны иметь возможность полагаться на данные, предоставленные лабораториями, для принятия соответствующих решений.

Определяет пригодность воды для потребления человеком на основе расчета значений коэффициента качества воды, который устанавливается в зависимости от различных химических и биологических элементов (показателей), а именно pH, общего количества растворенных солей (TDS) и общей жесткости (ТН ) Кальций (Ca), магний (Mg), железо (Fe), фториды (Cl), фосфаты (PO<sub>4</sub>) и колиформные бактерии (E.coli), в дополнение к загрязнению тяжелыми металлами, которые считаются водой Промышленные отходы и выбросы являются первым источником этого загрязнения. Географические информационные системы (ГИС) используются в качестве инструмента для создания карт пространственного распределения качества подземных вод в любой целевой области исследования. Можно построить несколько линейных кривых, чтобы показать взаимосвязь между независимыми переменными (показатели качества воды) и зависимой переменной (качество воды).

### **Методы водоподготовки природных и сточных вод**

Озера, реки и подземные воды, загрязняются в процессе хозяйственной деятельности человека. Загрязняющие вещества поступают как с природных объектов (лесные угодья, луга, поймы рек и т.д.), поступающие со склонов сельскохозяйственные стоки, несущие пестициды и ядохимикаты (диффузный сток), промышленные сбросы (сосредоточенные). Сточные воды содержат различные загрязняющие вещества, в том числе органические и неорганические материалы, питательные вещества, патогены и другие вещества, которые могут нанести вред здоровью человека и окружающей среде. Методы, используемые для очистки природной воды и сточных вод, различаются, поскольку источники и характеристики этих двух типов воды различны.

Как правило, природные воды менее загрязнены чем сточные воды, и может потребоваться только базовая очистка, чтобы сделать ее пригодной для питья. Природные процессы очистки воды имитируют процессы, происходящие в природных экосистемах.

В настоящее время применяются такие технологические схемы, когда совмещаются несколько методов очистки из приведенных на рисунке 1.3.

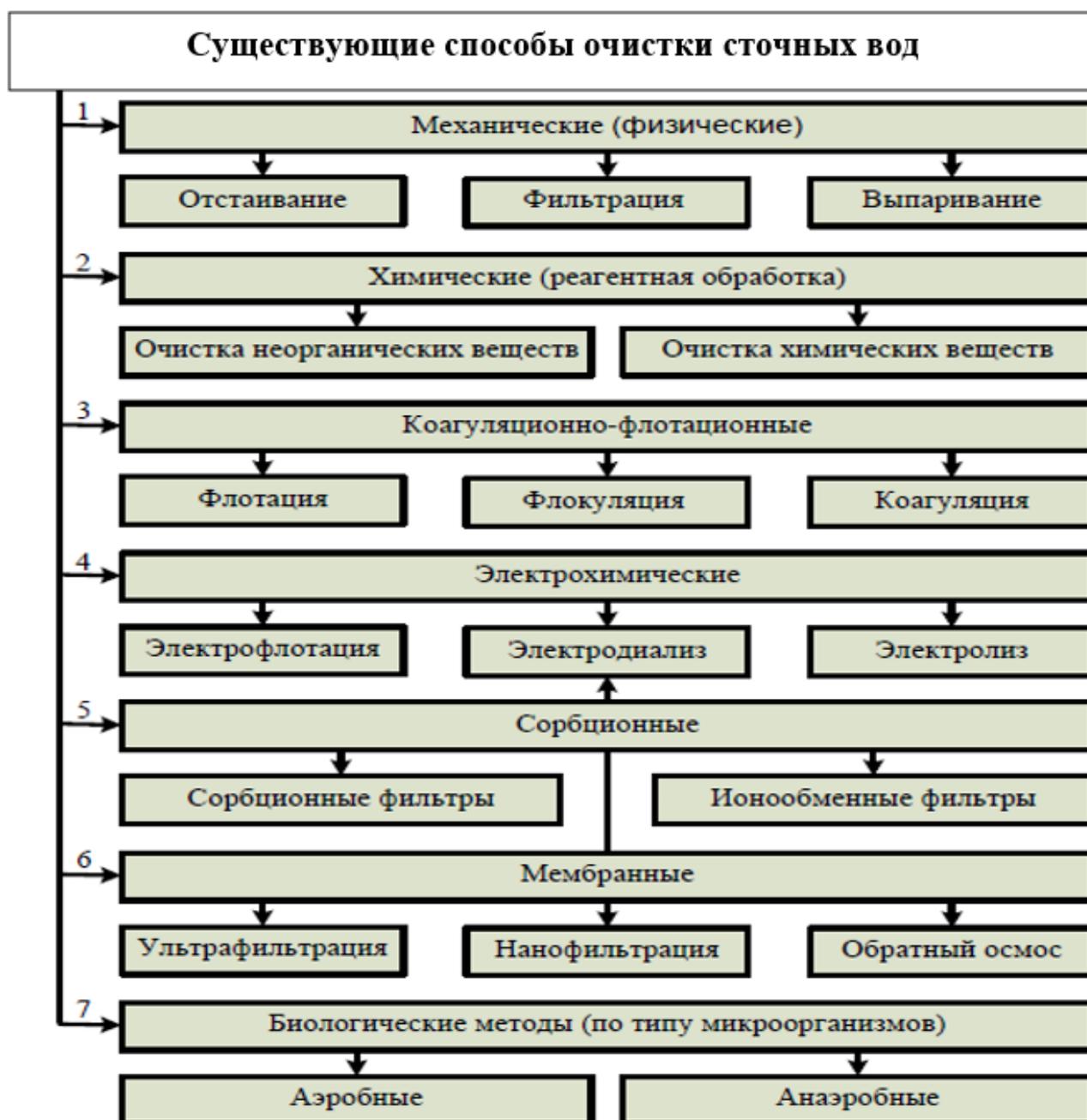


Рисунок 1.3 – Существующие способы очистки сточных вод

К этому следует добавить инновационные этапы очистки сточных вод на основе мембранных методов (доочистка) и экологические требования таким образом, чтобы гарантировать повторное использование воды, особенно в промышленности.

Загрязнение уничтожило важную часть пресной питьевой воды, которая может быть в двух различных формах: одна является естественной, а другая находится под влиянием человека из-за деятельности человека и большой эксплуатации природных ресурсов и бесхозяйственности.

**Естественное загрязнение** - загрязнение земного или геологического происхождения (геогенное загрязнение). Вызвано появлением или увеличением в воде природных компонентов, извержений вулканов на дне морей. Большинство этих загрязнителей обычно нетоксичны, несмотря на наличие различного вредного воздействия на водные организмы, и возникающие при этом загрязнения находятся в пределах самоочищающейся способности.

**Антропогенное загрязнение**, наиболее актуальный вид загрязнений. Они происходят вследствие деятельности человека, разного генезиса. Загрязняющие вещества, возникающие в результате различной деятельности человека, можно разделить на полусинтетические (сырье или природные материалы, соединения фосфора и азота, минеральные руды и самые опасные синтетические загрязнители, такие как пестициды – токсичные соединения на основе хлора и фосфора, промышленные масла, пластмассы, каучук.

Другая классификация, которая чаще встречается в инженерной деятельности делит источники загрязнения на **точечные и диффузные**. К первой категории относятся точки сброса загрязненных вод всех видов, бытовых и промышленных, оросительно-дренажные каналы и тому подобное, которые могут контролироваться и бороться с ними легче с помощью очистных сооружений и штрафных санкций. Наиболее неприятными являются диффузные загрязнения. Это отдельная проблема, которой посвящены многие последние научные исследования.

В таблице 1.4 приведены нормы удельных значений некоторых из этих загрязняющих веществ в хозяйственно-бытовых и промышленных сточных водах, исчисленные в мг/л.

Таблица 1.4 – Характеристика промышленных и бытовых сточных вод, сбрасываемых в водоток.

Показатели	Тип сточных вод	Диапазон загрязнения (мг/л)
BOD5	Бытовые	300-100
	Молочная промышленность	570
	Сахарная промышленность	1230
TDS	Бытовые	850-250
TSS	Бытовые	100-350
	Химическая промышленность	860
	Бумажная промышленность	1360
TOC	Бытовые	100-300
N	Бытовые	20-85
P	Бытовые	6-20
CL	Бытовые	30-100

Международные исследования показывают, что водные ресурсы мира, в том числе реки и озера, загрязнены различными уровнями загрязняющих веществ (таблица 1.5). Отложения и взвешенные твердые частицы являются наиболее распространенными загрязнителями речной воды, в то время как азотные и фосфорные соли (питательные вещества) преобладают в озерной воде. Оценка точечных и неточечных источников загрязнения включает определение изменения некоторых компонентов во времени и пространстве. Это изменение либо измеряется в реальном времени, либо моделируется моделью, которая отражает измерения в реальном времени с прошлой деятельностью, и это моделирование может предоставить нам полезные и чувствительные значения для будущего загрязнения.

Использование математических моделей для оценки источников точечного и неточечного загрязнения осуществляется путем заполнения информационных пробелов, выделения критических контрольных точек для будущих химикатов, что дает нам информацию о необходимости очистки или нет, за счет использования правил, уравнений и математических соотношений, а также использования нескольких методов линейной регрессии и моделей переноса растворов и направляющих загрязняющих веществ.

Таблица 1.5 – Доля загрязняющих веществ в воде рек и озер

Загрязнители	Процент типов загрязнения%	
	Реки	Озёра
Осадки и взвешенные вещества	47	22
Питательные вещества (азот и фосфор)	13	59
Патологические факторы	9	2
Реактивные кислотные загрязнители	7	4
Токсичные материалы	6	3
окисляемые материалы	4	3
Пестициды	3	2
Соленость	2	0.03

Загрязнение воздуха газами, исходящими из дымоходов крупнейших заводов мира, играет основную роль в кислотных дождях, и это не обязательно должны быть заводы одной страны, но загрязнение может быть трансграничным из других стран из-за ветрового фактора и разность атмосферного давления между регионами и орбитами на земном шаре. Компоненты загрязнения перемещаются далеко от своих первоисточников и при взаимодействии с дождевой водой будут влиять на кислотность дождя, нанося ущерб качеству воды водоемов и подземных водохранилища. Объем газов, выбрасываемых из дымовых труб крупных заводов промышленно развитых стран мира, оценивается примерно в 200 млн т ежегодно. Проблема кислотных дождей обострилась после того, как заводы, загрязняющие воздух, увеличили высоту своих дымовых труб, чтобы рассеять дым воздушными потоками на больших высотах, однако такая обработка загрязнения привела к переносу загрязняющих веществ на большие расстояния через границы стран. Это явление получило название "Трансграничное загрязнение" по мере нарастания проблемы [56]. Оно осложняется движением ветров, переносящих оксиды, вызывающие кислотные дожди, из одного места в другое, как это имеет место в Северной Америке. Известно, что государства из американского промышленного пояса,

таких как Огайо, несут ответственность за примерно 50% кислотных дождей, выпадающих на Канаду.

Вода и связанные с ней экосистемные услуги рек играют ключевую роль в здоровье человека и социально-экономическом развитии. Концепция здоровья речной экосистемы была впервые предложена в Законе США о чистой воде в 1972 г., который касался «химической, физической и биологической целостности вод страны» (Закон, 1972 г.). Среди других важнейших экосистемных услуг речные экосистемы обеспечивают людей жизненно важными водными ресурсами, поэтому здоровье речных экосистем имеет большое значение для жизни человека. Из-за обширного вмешательства человека, такого как изменение растительного покрова в водосборных бассейнах рек в результате вырубки лесов для сельскохозяйственной деятельности и жилых районов (Джаявардана и др., 2017), речные экосистемы превратились из здоровых в неустойчивые (Нанди и др., 2016). Пугубные последствия загрязнения, образования каналов и регулирования рек обычно сокращают биологическое разнообразие водных экосистем (Мэддок, 1999).

Качество воды в речных бассейнах находится под большим давлением из-за разнообразной деятельности человека, в том числе в крупных городских центрах, промышленности, сельском хозяйстве, транспорте и добыче полезных ископаемых. Наиболее важными аспектами загрязнения воды являются: органическое загрязнение, пищевое и микробное загрязнение, химическое загрязнение тяжелыми металлами и опасными веществами, а также морфологическое изменение воды. Поскольку большая часть речных бассейнов подвержена многократным нагрузкам, существуют серьезные и важные риски недостижения хорошего и стабильного экологического состояния и хорошего химического состояния воды в обозримом будущем. В 2009 году оценка по результатам национальной переходной сети мониторинга протяженности водных объектов бассейна реки Дунай показала, что только 22% речных водоемов достигли хорошего экологического состояния или хорошего экологического потенциала и только 45% речные водоемов достигли хорошего химического состояния.

Недавняя антропогенная нагрузка на поверхностные воды в связи с изменением климата увеличила вызовы современного этапа, так как эта социально-экономическая деятельность, наряду с изменчивостью климата, сильно повлияла на гидрологическую и экологическую систему водоемов за последние 100 лет. Еще больше осложняет ситуацию слабость стратегий управления. Эти бассейны расположены в разных регионах мира из-за проблем, ограничивающих их эффективность в достижении устойчивого развития. Более того, появляется новый вызов ввиду увеличения водопотребления и невозможности компенсировать дефицит, особенно в развивающихся странах, которые на значительной части страдают от нехватки воды.

Оценка состояние речных экосистем в крупных бассейнах важна при рассмотрении комплексного влияния антропогенной деятельности на эти экосистемы. Исследование, проведенное в Китае, оценило состояние речной экосистемы в бассейне реки Хайхэ, население которого, согласно статистике 2010 года, составляет около 140 миллионов человек, путем отбора проб на 148 речных участках в пред- и последождливый сезоны в 2013 г. Была создана модель для оценки состояния речной экосистемы на основе физико-химических, питательных и показатели макробеспозвоночных, а уровень здоровья делился на «очень плохой», «плохой», «удовлетворительный», «хороший» и «отличный» в соответствии с баллом здоровья, рассчитанным по модели оценки. Результаты оценки показали, что состояние речной экосистемы в целом было «плохим», а водосборы не были оценены как «отличные». Процент водосборов, которые считаются имеющими «очень плохое», «плохое», «удовлетворительное» или «хорошее» состояние речной экосистемы, составил 12,88%, 40,91%, 40,15% и 6,06% соответственно. По результатам этого исследования сделан вывод о том, что городские территории с хозяйственной, сельскохозяйственной и социальной деятельностью человека оказали наиболее сильное негативное воздействие на качество воды и экосистемы речных бассейнов, где интенсивность землепользования сыграла наибольшую роль в воздействии на здоровье речной экосистемы, а социальные и экономическая деятельность заняла второе место.

Биологические индексы являются широко используемым методом оценки состояния речной экосистемы (Мэнг и др., 2009). Например, водные организмы, такие как макробеспозвоночные (Смит и др., 1999), рыба (Карр, 1981), водоросли (Пойкан и др., 2016) и планктон (Рейнольдс, 2003), обычно используются в качестве индикаторов для оценки здоровья речных экосистем.

Макробеспозвоночные являются функционально важными участниками речных экосистем, которые разлагают и перерабатывают автохтонное и аллохтонное органическое вещество (Кович и др., 1999), связывают водные и наземные пищевые сети (Шарнвебер и др., 2014) и являются важным источником питания для рыб. сообщества (Вадебонкур и др., 2002). Макробеспозвоночные являются одними из наиболее широко применяемых биологических индикаторов для оценки здоровья речных экосистем (Бирк и др., 2012) из-за преимуществ, которые они обеспечивают, таких как их повсеместное распространение, длительный жизненный цикл, простота отбора проб и идентификации, а также оседлый образ жизни (Шан и др., 2016).

Антропогенная деятельность может изменить поток воды и ухудшить речные среды обитания и биотические условия (Азами и др., 2015), что оказывает большое влияние на здоровье речной экосистемы. Типы землепользования тесно связаны с характеристиками антропогенной деятельности, которая, в свою очередь, определяет перенос антропогенных веществ в гидрологические системы в результате процессов стока [6, 45, 112]. Интенсивность землепользования также является важным фактором, контролирующим структуру водных сообществ, и может использоваться в качестве косвенного показателя состава и структуры сообществ макробеспозвоночных (Торнблом и др., 2011). Характеристики ландшафта широко признаны в качестве факторов, сильно влияющих на качество речной воды (Ай и др., 2015; Кендлер и др., 2017; Ши и др., 2017 г.). Уровень экономического развития также оказывает сильное влияние на загрязнение питательными веществами (Дуан и др., 2009). Плотность населения и промышленное развитие считаются важными факторами ухудшения качества воды во внутренних водах (Дуан и др., 2009 г.; Чжоу и др., 2017 г.). Поскольку в большинстве случаев адми-

нистративные единицы не включают весь водосборный бассейн, количество исследований, связывающих социально-экономические показатели с качеством воды, ограничено (Чжоу и др., 2017 г.).

Изучение воздействия хозяйственной деятельности на экосистемы речных бассейнов дает отправную точку для управления загрязняющими веществами и всеми факторами, играющими важную роль в ухудшении состояния экосистем, а также для рационального управления реками и их бассейнами в целом.

Это говорит о том, что следует ограничивать урбанизацию в быстрорастущих районах, увеличивать площадь лесных и пастбищных угодий в водосборных бассейнах, а также принимать более строгие меры и ограничения на сброс сточных и промышленных сточных вод, оказывающих наибольшее влияние на здоровье населения. речной экосистемы При управлении речными бассейнами также следует учитывать сезонные различия. Таким образом, совокупный эффект землепользования и социальной экономики требует дальнейшего внимания.

### **1.3. Принципы и мероприятия рационального водопользования**

Концепции водоснабжения, интегрированного управления водными ресурсами, рационального использования воды и устойчивости тесно связаны друг с другом, поскольку один из них не может быть достигнут без другого, они являются основными принципами государственной водной политики. Рационализации водопользования стала неизбежной в условиях высоких цивилизаций. К сожалению, принцип нарушается в угоду коммерческим интересам в странах третьего мира. Рекомендации в части рационального использования воды [5, 23] приведены ниже:

- необходимость разъяснительной работы о необходимости бережного отношения к водным ресурсам;
- борьба с утечками, которая сводится всего лишь к открытию водопроводных кранов только по необходимости, особенно в районах с дефицитом воды;

- необходимость периодического обслуживания сетей водоснабжения для предотвращения потерь в сети и установки водосберегающих частей;
- использование сточных вод в сельской местности для орошения растений, поскольку они не требуют сложных и дорогостоящих процессов очистки;
- полив растений рано утром или на закате во избежание сильного испарения воды, что вынуждает фермера увеличивать количество поливов до тех пор, пока растение не получит свою потребность;
- использование современных методов орошения, особенно капельного орошения, во избежание больших потерь воды, а значит, и ее экономии, и рационализации использования воды для сельского хозяйства;
- очистка сточных вод, чтобы сделать их пригодными для орошения и промышленного использования;
- введение жестких ограничений на промышленную очистку и повторное использование воды в замкнутых циклах, так как промышленность является основным потребителем воды и наиболее опасным источником загрязнения водных ресурсов;
- усиление постоянного мониторинга поверхностных и подземных источников воды и периодических замеров загрязняющих веществ, что способствует своевременному принятию соответствующих решений и работе по созданию моделей, прогнозирующих будущее водно-экологическое состояние этих источников для предотвращения экологических катастроф и сохранения стабильности этих источников.

По сумме исследований в части рационального использования водных ресурсов формулируем следующие положения. Водопотребление локального значения или в масштабах речного бассейна в любом случае связано с функционированием водохозяйственного комплекса и оказывает влияние на социально-экологическую обстановку. При разработке комплексных водохозяйственных и водоохраных мероприятий следует принимать во внимание весь спектр влияющих факторов, в особенности касающихся истощения ресурсов, загрязнения водных объектов, воздействия на окружающую природную среду. Понятие рацио-

нального водопользования довольно объемлющее, поскольку проще определить, что такое нерациональное водопользование, перечислив все его последствия, как уже случившиеся, так и вполне вероятные.

Принципы рационального водопользования известны и сводятся к следующим позициям [23]:

- учет и контроль использования водных ресурсов;
- обоснование и планирование мероприятий по управлению водными ресурсами, охране водных объектов и контролю негативного проявления вод применительно к планируемой водохозяйственной деятельности;
- обоснование допустимой нагрузки на водные объекты;
- обоснование природоохранных и водоохранных требований к водному режиму при строительстве гидротехнических и иных сооружений;
- разработка методов компенсации высокой антропогенной нагрузки и грядущих изменений климата;
- правовая деятельность.

**Перечень мероприятий**, строящихся на этих принципах в терминах РВП достаточно широк, наиболее важные в их числе сформулированы ниже:

- совершенствование технологий очистки воды;
- повторное использование сточных вод КБХ на орошение и хозяйственные нужды после доочистки – актуально для крупных промышленных центров, таких как Московский регион;
- в орошении сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО) эффективно использование городских стоков благодаря высокому содержанию органики. Кроме того, обеззараживание стоков в почве более интенсивно, поскольку окислительные и микробиологические процессы идут быстрее. ЗПО располагают на хорошо дренированных землях во избежание вторичного засоления. На ЗПО выращиваются травы, технические культуры, кормовые, кустарники, древесная растительность. Оборудуются ограждающей сетью для перехвата стоков с водосборной площади. Водоотведение организуется посредством обвалования с быстрым отводом скапливающейся воды. При близком залегании грунтовых вод (опасность за-

грязнения фильтрационными водами с ЗПО) применяется осушение. Дренажные воды поступают в водоприемник через простейшие очистные сооружения в устьях коллекторов;

- разработка оптимальных норм водопотребления с учетом климатических условий;
- совершенствование методов утилизации отходов;
- борьба с утечками воды, водомерные счетчики;
- внедрение отдельных водопроводов для коммунального водоснабжения и промышленного водоснабжения;
- устройство централизованного водоснабжения и канализации в сельской местности;
- строительство и реконструкция ливневой канализации;
- строительство и реконструкция очистных сооружений канализации;
- широкомасштабное восстановление магистральных водоводов с установкой труб с антикоррозийными свойствами;
- совершенствование технологии (реагентного, импульсного, совместного) восстановления водозаборных скважин;
- новые конструкции скважин из новых материалов;
- создание и совершенствование конструкций фильтров, водоподъемного оборудования и т.д.;
- развитие систем канализации до достижения баланса между водопотреблением и водоотведением;
- совершенствование технологий очистки вод в соответствии с требованиями СанПин 2.1.4599 – 96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества вод»;
- внедрение современных технологий коммерческого и технического водоучета;
- более широкое внедрение оборотных, оборотно-прямоточных, последовательных и комбинированных систем водоснабжения в промышленности. Это

позволяет существенно сократить объем водозабора и сброса сточных вод. Безвозвратные потери стока могут быть меньше, но общий ущерб, наносимый водоприемнику несопоставим благодаря сохранению водного режима и сокращению загрязненных стоков. Благодаря применению оборотных и комбинированных систем ежегодно удается экономить более 100 кубических километров свежей воды.

Рациональное водопользование – это безусловно фактор экологической безопасности. Международная практика водных отношений, отраженная в многочисленных документах, выглядит следующим образом. Вот ссылки на несколько ключевых исследований, которые внесли значительный вклад в понимание управления нерегулируемыми стоками и водными ресурсами во всем мире.

1. Доклад о развитии водных ресурсов мира (WWDR): подготовленный Всемирной программой оценки водных ресурсов ЮНЕСКО (WWAP), WWDR предоставляет всесторонний анализ глобальных проблем водных ресурсов, включая оценки доступности воды, водопользования и проблем, связанных с водой во всем мире.

2. Специальный отчет МГЭИК об управлении рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий для содействия адаптации к изменению климата (SREX): В этом отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) оценивается научная литература об экстремальных погодных явлениях, включая наводнения, и их воздействиях на водные ресурсы. и общество.

3. Доклад ООН о состоянии водных ресурсов мира, посвященный водным ресурсам и изменению климата (WWDR): еще один выпуск серии WWDR. В этом отчете основное внимание уделяется взаимодействию между водой и изменением климата, включая влияние изменчивости и изменения климата на нерегулируемый сток и доступность воды.

4. Отчет Организации Объединенных Наций о мировом развитии водных ресурсов о качестве воды (WWDR): В этом отчете рассматриваются проблемы качества воды во всем мире, включая воздействие загрязнения на водные ресурсы и экосистемы, которые могут повлиять на нерегулируемый поток и надежность источников воды.

5. Технические документы Глобального водного партнерства (ГВП). ГВП выпускает технические документы и публикации по различным аспектам управления водными ресурсами, включая интегрированное управление водными ресурсами (ИУВР), и сопротивляемость к изменению климата, которые имеют отношение к оценке гарантированных ресурсов для нерегулируемого стока.

6. Исследовательские статьи в журналах по гидрологии. Ключевые журналы по гидрологии и водным ресурсам, такие как «Исследование водных ресурсов», «Журнал гидрологии» и «Журнал гидрологических наук», публикуют исследовательские статьи по оценке нерегулируемого стока, гидрологическому моделированию и распределению воды во всем мире.

7. Отчеты Международного института управления водными ресурсами (IWMI). IWMI проводит исследования по управлению водными и земельными ресурсами во всем мире, готовя отчеты и исследования по дефициту воды, ирригации, управлению подземными водами и другим темам, имеющим отношение к оценке гарантированных ресурсов для нерегулируемого стока.

8. Отчеты Всемирного банка об управлении водными ресурсами. Всемирный банк публикует отчеты и исследования по вопросам управления водными ресурсами во всем мире, включая управление речными бассейнами, развитие водной инфраструктуры и устойчивость к изменению климата, которые дают представление об управлении нерегулируемым стоком.

9. Отчеты Европейского агентства по окружающей среде (ЕАОС). Сосредоточившись на Европе, ЕАОС готовит отчеты и оценки по управлению водными ресурсами, включая оценки качества воды, количества воды и практики управления речными бассейнами, которые могут дать понимание, применимое к другим регионам.

10. Одним из примечательных исследований, дающих представление об оценке водных ресурсов, включая нерегулируемый сток, в России, является «Национальный отчет Российской Федерации о выполнении Рамочной водной директивы (РВД)», представленный Европейскому агентству по окружающей среде (ЕАОС) [46].

Указанные справочные исследования и источники дают всесторонний обзор глобальных усилий по оценке и управлению гарантированными ресурсами для нерегулируемых потоков, охватывая широкий спектр тем, регионов и перспектив.

В рамках неструктурированного анализа стока гарантированные ресурсы для нерегулируемого стока включают в себя неотъемлемые элементы, поддерживающие гидрологический цикл внутри водораздела или речного бассейна. К ним относятся такие естественные процессы, как осадки, таяние снегов, разгрузка грунтовых вод и поверхностный сток. Осадки и снегопады служат основными источниками поступления воды, влияя на поверхностный сток, инфильтрацию в почву и пополнение подземных вод. Сезонное таяние снегов играет жизненно важную роль в увеличении речного стока в теплые месяцы, влияя на временную изменчивость нерегулируемого стока. Сброс подземных вод из водоносных горизонтов и источников обеспечивает постоянный базовый сток, особенно в засушливых условиях. Поверхностный сток, возникающий, когда количество осадков превышает инфильтрационную способность почвы, напрямую способствует стоку рек, особенно во время интенсивных дождей или таяния снегов. Инфильтрация в почву пополняет грунтовые воды и влияет на распределение осадков между различными гидрологическими путями. Кроме того, естественные источники, зоны просачивания, прерывистые ручьи, водно-болотные угодья и естественные водоемы, такие как озера и пруды, способствуют поддержанию режима стока и поддержке водных экосистем в пределах водораздела. Понимание динамики этих природных водных ресурсов имеет важное значение для комплексного управления водными ресурсами и сохранения экосистем.

Эти гарантированные ресурсы нерегулируемого стока необходимы для поддержания экологической целостности речных систем, поддержки водной среды обитания, поддержания биоразнообразия и обеспечения водой для различных нужд человека.

К основным задачам исследования оценки гарантированных ресурсов нерегулируемого потока относятся:

- количественная оценка: для количественной оценки объема, времени и пространственного распределения нерегулируемого стока в пределах данного водораздела или речного бассейна.
- описание естественной изменчивости и предсказуемости нерегулируемых режимов стока в различных временных масштабах, включая сезонные, годовые и межгодовые вариации.
- оценка экологического значения нерегулируемого стока для поддержания здоровых речных экосистем, поддержки водной среды обитания и поддержания биоразнообразия.
- определение роли нерегулируемого стока в удовлетворении спроса на воду для различных целей, включая сельское хозяйство, промышленность, муниципальное водоснабжение и охрану окружающей среды.
- выявление и оценка рисков, связанных с изменениями нерегулируемого стока, такие как риск наводнений, засух, эрозии и деградации среды обитания.
- изучение влияния изменений климата на нерегулируемые режимы стока, и оценить сопротивляемость экосистем и систем управления водными ресурсами к этим изменениям.

Индикаторы гидрологических изменений (ИГИ) для оценки воздействия эксплуатации водохранилища и изменения климата на режимы стока ниже по течению от краевых плотин. ИГИ включает 33 показателя, сгруппированных в пять категорий, описывающих режим стока с точки зрения величины ежемесячного стока, величины и продолжительности экстремальных годовых стоков, основного состояния стока, времени годовых экстремальных стоков, возникновения и продолжительности высоких и низких пульсаций, а также скорость и частота изменения потока (табл. 1.6).

Таблица 1.6 – Категории показателей ИГИ и их экологическое значение.

Группы	Характеристики режима	Гидрологический параметр	Экологическое значение
Группа 1: Величина ежемесячного состояния воды.	Величина и время	Среднее значение за каждый календарный месяц	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Поддержание подходящих условий окружающей среды для водных и наземных организмов.</li> <li>- Обеспечить еду и кров пушным млекопитающим.</li> <li>- Поддержание влажности почвы и необходимых минералов.</li> </ul>
Группа 2: Масштабы и продолжительность ежегодных экстремальных водных условий.	Величина и продолжительность	Годовые минимумы и максимумы, средние значения за 1,3, 7, 30 и 90 дней, Число дней с нулевым стоком, Индекс базового стока: минимум за 7 дней, расход/средний расход за год	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Формирование компонентов русла реки, пригодных для обитания.</li> <li>- Создание речной экосистемы</li> <li>- Распространение флоры в русле реки и пойме.</li> </ul>
Группа 3: Время ежегодных экстремальных водных условий.	Тайминг	Дата поливного года каждого ежегодного 1-дневного максимума и минимума	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Улучшить механизм поведения водных обитателей</li> <li>- Доступ к конкретным средам обитания на различных этапах</li> <li>- Улучшение нереста мигрирующих рыб.</li> </ul>
Группа 4: Частота и длительность высоких и низких импульсов.	Величина, частота, продолжительность	Количество высоких и низких пульсов за год. Средняя продолжительность высоких и низких пульсов в течение каждого года.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Эффективное распределение питательных веществ между основным руслом и поймой</li> <li>- Накапливать отложения пластовой нагрузки и правильно распределять</li> <li>- Обеспечить достаточное снабжение кислородом прибрежной зоны.</li> </ul>
Группа 5: Скорость и частота изменения состояния воды.	Частота, скорость изменения	Средние значения всех положительных и отрицательных различий между последовательными дневными средними значениями и количеством подъемов и падений	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Стресс растений из-за засухи из-за дефицита воды.</li> <li>- Изоляция организмов в пойме при колебании уровня воды.</li> <li>- Уязвимость застрявших организмов</li> </ul>

Сравнительные исследования для оценки гарантированных ресурсов нерегулируемого стока в гидрологии обычно включают сравнение наблюдаемых данных о стоке или смоделированных сценариев стока с заранее определенными контрольными показателями или стандартами. Эти исследования помогают оценить достаточность ресурсов (таких как инфраструктура, кадровое обеспечение или возможности реагирования на чрезвычайные ситуации) для обработки различных условий потока.

Сравнительное исследование в речном бассейне может включать сравнение наблюдаемых данных о стоке с нормативными стандартами картографирования пойм. Если наблюдаемые скорости потока превышают нормативную границу поймы чаще, чем разрешено стандартом (например, вероятность превышения 1% в год), это предполагает потенциальный недостаток мер по борьбе с наводнениями или возможностей реагирования на чрезвычайные ситуации. Рекомендации могут включать обновление карт пойм, совершенствование систем предупреждения о наводнениях или реализацию структурных мер по снижению риска наводнений [70].

Таким образом, эталонные исследования играют решающую роль в оценке гарантированных ресурсов для управления нерегулируемым стоком в гидрологии, обеспечивая систематическую основу для оценки достаточности ресурсов и выявления возможностей для улучшения.

## **Выводы по главе 1**

Водные ресурсы речного бассейна являются объектом регулярного использования в процессе жизнедеятельности. В свою очередь нормальное водопользование на современном этапе развития цивилизации динамичный процесс, требующий постоянного внимания на основе комплексного мониторинга и инженерной поддержки. На это настроена многоступенчатая структура водохозяйственного комплекса как в РФ, так и за рубежом.

Рост водопотребления в странах мирового сообщества требует одновременного решения проблем количества и качества водных ресурсов посредством разного характера водохозяйственных и водоохраных мероприятий. Превентивная часть этих мероприятий должна предшествовать масштабным инженерным планам, связанным с территориально-временным перераспределением вод, как правило речного стока.

## **ГЛАВА 2. ВОДОХРАНИЛИЩА В РЕШЕНИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОБЛЕМ**

Во второй главе анализируется роль водохранилищ в управлении водными ресурсами, рассматриваются существующие классификации водохранилищ, приводятся примеры комплексного функционирования водохранилищ в решении водных проблем. Водоохранилища играют ключевую роль в решении различных проблем, связанных с водой, включая дефицит водных ресурсов, борьба с наводнениями, выработка гидроэнергии, навигация и охрана окружающей среды.

Естественные впадины и каменные полости. Древние люди, вероятно, использовали естественные впадины и скальные образования для сбора и хранения воды для своих сообществ. Простые земляные плотины были построены для накопления воды и служили основной формой хранения воды для бытовых и сельскохозяйственных целей. Исторические цивилизации, такие как Месопотамия и Египет, использовали элементарные системы хранения воды, включая колодцы и цистерны, для сельскохозяйственных и бытовых целей.

### **Гидротехническое строительство и достижения XX века**

Промышленная революция привела к росту урбанизации и промышленной активности, что повысило спрос на надежные источники воды. Промышленная революция способствовала значительному росту распространению гидроузлов по всему миру, и главная задача было четко сформулирована: водоснабжение и гидроэнергетика. В 20-м веке это проявилось особенно сильно. Это было связано со множеством политических событий и бурным развитием науки, что позволило создать совершенные гидротурбины и научно-обоснованные ирригационные системы. Крупные водохранилища и каскады стали неотъемлемой частью планов регионального развития.

### **Плотина Гувера, США (1935 г.)**

Производство гидроэлектроэнергии: Плотина Гувера, построенная во время Великой депрессии, является знаковым примером крупномасштабного строитель-

ства плотин. Он не только обеспечивал борьбу с наводнениями и поливную воду, но также производил значительную гидроэлектроэнергию для юго-запада Соединенных Штатов.

#### **Плотина Гранд-Кули, США (1942 г.)**

Ирригация и энергоснабжение: Плотина Гранд-Кули в штате Вашингтон сыграла решающую роль в превращении засушливых земель в продуктивные сельскохозяйственные районы посредством орошения. Он также предоставил значительную гидроэнергию для поддержки промышленного развития во время Второй мировой войны.

#### **Плотина Кароба, Замбия/Зимбабве (1959 г.)**

Назначение: гидроэнергетика и экология. Плотина Кароба на реке Замбези создала озеро Кароба, одно из крупнейших искусственных озер в мире. Плотина не только вырабатывает гидроэлектроэнергию, но также поддерживает орошение и обеспечивает воду для различных целей.

#### **Плотина Вольта, Гана (1965 г.)**

Многоцелевое развитие: Плотина Вольта на реке Вольта сыграла решающую роль в развитии Ганы, обеспечивая гидроэлектроэнергию, воду для орошения и поддерживая рыболовство. Это пример многоцелевого подхода к строительству плотин.

#### **Асуанская плотина, Египет (1970 г.)**

Контроль над разливом Нила: Асуанская плотина, построенная на реке Нил, была монументальным проектом для Египта. Это позволило взять под контроль ежегодные разливы Нила, защитив сельскохозяйственные угодья и сделав возможным более надежное орошение. Кроме того, это способствовало увеличению выработки электроэнергии.

#### **Озеро Насер, Судан/Египет (1971 год)**

Эффективное управление водными ресурсами -приоритетная задача проектирования водохозяйственных систем. Строительство Высокой Асуанской плотины привело к образованию озера Насер. Это обширное водохранилище не только

регулирует течение Нила, но и поддерживает методы режим комплексного управления водными ресурсами, включая развитие рыболовства и сельского хозяйства.

### **Плотина Итайпу, Бразилия/Парагвай (1984 г.)**

Трансграничное сотрудничество: плотина Итайпу, расположенная между Бразилией и Парагваем, является свидетельством международного сотрудничества в строительстве плотин. Она входит в число крупнейших гидроэлектростанций мира, внося значительный вклад в энергетические потребности обеих стран.

### **Плотина Тукуруи, Бразилия (1984 г.)**

Региональное развитие: Плотина Тукуруи, расположенная на реке Токантинс, является ключевым компонентом энергетической инфраструктуры Бразилии. Он сыграл жизненно важную роль в региональном развитии, обеспечивая электроэнергией промышленность и домохозяйства.

Эти достижения подчеркивают преобразующее воздействие крупномасштабных плотин и водохранилищ на управление водными ресурсами, производство энергии и экономическое развитие на протяжении всего двадцатого века. Хотя эти проекты принесли значительную выгоду, они также подняли экологические и социальные вопросы, которые продолжают формировать дискуссии вокруг стабильной водной инфраструктуры в двадцать первом веке.

### **Плотина Бакун, Малайзия (2011 г.)**

Развитие гидроэнергетики: Бакунская плотина является выдающимся достижением в Юго-Восточной Азии, внося значительный вклад в увеличение мощности производства электроэнергии в Малайзии. Это часть более масштабного плана по использованию гидроэнергетического потенциала страны.

### **Водоохранилища КНР**

#### **Плотина «Три ущелья», Китай (2008 г.)**

Производство гидроэлектроэнергии: Плотина «Три ущелья» на реке Янцзы является крупнейшей электростанцией в мире. Она обладает огромным потенциалом для производства гидроэлектроэнергии, что вносит значительный вклад в энергетические потребности Китая и снижает зависимость от ископаемого топлива. Гидроэнергетика играет большую роль в экономике КНР. Причем она достиг-

ла по факту самых больших масштабов в мире. Об этом говорят, например, более 22 тысяч плотин с высотой больше 15 метров. Общее количество достигает 80 тысяч единиц. Чуть менее половины их используются для орошения земель. До сих пор используется ирригационная система Дуцзяньянь, сооруженной в третьем веке до нашей эры. В Китае построена самая высокая в мире арочная плотина Цзиньпин высотой 305 метров. В составе гидроузла мощная ГЭС мощностью 3600 МВт и средней выработкой электроэнергии до 18 ТВт\*час. Назначение объекта конечно же комплексное с доминирующей энергетикой, второй целью является защитой от наводнений, третьей – защита от эрозии. По объему водохранилища в КНР самой большой (39,3 км<sup>3</sup>) с площадью зеркала 104км<sup>2</sup> является плотина Три ущелья.

Таким образом гигантская река Китая Янцзы (протяженность 6,5 тысяч км) приняла на себя роль гидротехнического флагмана, расположив в своем течении каскад сооружений. На сегодня это 6 ГЭС с суммарной установленной мощностью более 70 МВт. Каскад находится в стадии строительства (возводятся еще три гидростанции). Водный режим Янцзы обусловлен муссонным климатом территории и имеет выраженное летнее половодье и зимнюю межень. Решаются задачи выработки электроэнергии, сокращения волны паводков, обеспечения речного судоходства, регрессии эрозионных процессов, гарантированного водопользования.

### **Водохранилища Сирии**

Большая часть водных ресурсов Сирии принадлежит реке Евфрат с притоками – более 95 %. Другие реки в основном пересыхающие. Государство располагает ирригационным фондом 6 млн. га, которые далеки от гарантированного водообеспечения. Самое большое водохранилище — Эль-Асад (Табка) полным объемом 11,9 км<sup>3</sup> и площадью зеркала 630 км<sup>2</sup>. Гидроузел обеспечивает 90% энергопотребления Сирии. Установленная мощность ГЭС — 800 тыс. кВт, средняя годовая выработка электроэнергии — 5,6 млрд кВт\*час. Помимо энергетической нагрузки в задачу водохранилища входит регулярное орошение 640 тыс. га. В настоящее время идет планомерное развитие современных ирригационных систем и орошается лишь 10 % земель. Проблемные моменты переселение около 60 тыс.

человек. На месте малого поселения Табка возвели город Эс-Саура (Революция) с населением около 100 тысяч человек. Эта водохозяйственная система стала базовой основой для социально-экономических и хозяйственных преобразований в Сирии.

### Наиболее крупные гидроузлы в мире и в РФ

Наиболее крупные водохранилищные гидроузлы земного шара можно видеть в таблице 2.1, где указаны их основные параметры.

Таблица 2.1 – Самые крупные водохранилища на земле

Название	Река	Страны	Объем, км <sup>3</sup>	Площадь, тыс.км <sup>2</sup>
Виктория	Белый Нил	Уганда, Кения, Танзания	204.8	76.0
Братское	Ангара	Россия	169.3	5.47
Кариба	Замбези	Замбия, Зимбабве	160.3	4.45
Насер (Асуан)	Нил	Египет	157.0	5.12
Вольта (Акосомбо)	Вольта	Гана	148.0	8.48
Даниэл-Джонс	Маникуаган	Канада	141.8	1.95
Гурии (Эль-Монтенно)	Карони	Венесуэла	135.0	1.50
Вади-Тартар	Эт-Тартар	Ирак	85.5	3.40
Красноярское	Енисей	Россия	73.3	2.00
Гордон М. Шрам (Портидж-Маунтин)	Пич-Ривер	Канада	70.1	1.68

В РФ два крупнейших каскада ГЭС: Волжско-Камский и Ангаро-Енисейский. АЕК - Иркутская, Братская, Усть-Илимская и Богучанская – это на реке Ангаре, а Красноярская, Майнская и Саяно-Шушенская - на реке Енисей. Гидроэлектростанции АЕК входят в Единую Энергосистему Центральной Сибири. Ангарский каскад гидроэлектростанций на р. Ангаре имеет суммарную мощ-

ность около 14 ГВт и среднюю годовую выработку электроэнергии больше 70 млрд. кВт\*час. Здесь топографические условия местности позволяют возводить плотины с высоким напором при сравнительно небольших объемах строительных работ. Масштабы сооружений здесь огромные. К примеру, последняя ступень в цепи Ангарского каскада — Богучанская гидроэлектростанция дает около 18 млрд кВт\*час. Суммарная мощность Енисейского каскада ГЭС обладает потенциалом мощности 12.72 ГВт при среднегодовой выработке 45,6 млрд кВт\*час.

### 2.1. Роль водохранилищ в решении водохозяйственных проблем

Роль водохранилищ в современном водохозяйственном комплексе одна из главных, так как они являются обязательным элементом практически всех водохозяйственных систем. В обычном понимании водохранилища представляют собой искусственно созданные накопители водных ресурсов, перераспределяющие речной сток между сезонами года или в многолетии. Водоохранилища также служат для хранения и очистки вод способствуя улучшению их качества.

Они появились на земле более 4 тысяч лет назад. Основные цели – орошение и борьба с наводнениями в таких странах как Египет, Месопотамия и Китай. В настоящее время водохранилища емкостью выше 100 млн кубометров распределены по странам и континентам следующим образом (табл. 2.2 и табл. 2.3).

Таблица 2.2 – Распределение водохранилищ по земному шару

Регионы мира	Примерное количество	Полный объем, км <sup>3</sup>
Европа	517	616
Азия	577	1628
Африка	105	885
Северная Америка	883	1678
Центральная и Южная Америка	202	641
Австралия	73	77
Весь мир	2357	5524

Таблица 2.3 – Крупнейшие водохранилища мира

Водохранилище	Река	Страна	Полный объем, км <sup>3</sup>	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
Братское	Ангара	РФ	169,3	5470
Кариба	Замбези	Замбия	160,4	4450
Насер	Нил	ОАР, Судан	157,0	5120
Вольта	Вольта	Гана	148,0	8480
Великая Эфиопская плотина возрождения	Нил	Эфиопия	74,0	1541
Красноярское	Енисей	РФ	73,3	2000
Вади - Тартар	Тигр	Ирак	67,0	2000
Санмынься	Хуанхэ	КНР	65,0	3500
Куйбышевское	Волга	РФ	58,0	6448
Бухтарминское	Иртыш	Казахстан	53,0	5500

Водохранилища всегда звено с одной стороны водохозяйственной системы, а с другой – важная часть водохозяйственного комплекса.

Водохранилища связаны с множеством факторов, определяющих их функционирование. В их числе:

- водный режим и сложившийся режим управления водными ресурсами;
- морфометрические характеристики;
- уровенный режим;
- распределение объема водохранилища на составляющие;
- зоны выклинивания подпора, статические и динамические объемы, естественные и антропогенные;
- ледовый режим водохранилищ;
- русловые процессы, заиление;
- вариантность водного и водохозяйственного баланса;
- динамикой тех или иных физико-географических процессов;
- влияние водохранилищ на окружающую среду;
- влияние водохранилищ на социально-экономические условия;
- правила управления и эксплуатации.

Следует отметить, что создание водохранилищ является антропогенным вмешательством в водную экологию и не только в водную в зависимости от масштабов воздействия. Влияние сказывается и на климате территории, поскольку вызывает изменение природных и хозяйственных условий. Но основным фактором является назначение, которое распространяется на все аспекты экономики и жизнедеятельности. По назначению водохранилища делят на *целевые*, создаваемые для одной из отраслей водного хозяйства, и *комплексные*, если водохранилище планируется использовать несколькими его отраслями.

Создание водохранилищ с доминирующим целевым назначением обусловлено несколькими причинами:

- требования к качеству воды, режимам эксплуатации водохранилищ, охране их прибрежной зоны (водохранилища питьевого водоснабжения и промышленного рыбоводства)
- режим эксплуатации ряда водохранилищ исключает возможность их использования другими отраслями хозяйства. Это относится к некоторым ирригационным водохранилищам, почти полностью опорожняемым, к небольшим водохранилищам гидроаккумулирующих станций, уровень которых повышается и понижается несколько раз в течение суток
- вблизи ряда водохранилищ отсутствуют другие водопользователи и водо-потребители. Таковы в большинстве случаев высокогорные водохранилища гидроэлектростанций и водохранилища, созданные в необжитых местах (северные части Сибири, Канады, некоторые пустынные районы).

**Гидроэнергетические водохранилища.** Быстрый рост числа крупных водохранилищ во всем мире в середине XX века был вызван бурным развитием гидроэнергетики. ГЭС при нормальной эксплуатации сооружений гидроузла и оборудования может работать долгие годы. Однако многолетняя работа сопровождается заилением чаши и как следствие снижением регулирующей способности.

**Водоохранилища для водоснабжения.** Для водообеспечения крупнейших городов мира, городских агломераций с числом жителей свыше 1 млн. и крупных промышленных центров с водоёмкими производствами, как правило, требуются

поверхностные водоисточники из-за медленного возобновления подземных водных ресурсов. Поэтому, если перечисленные водопотребители не находятся на побережье крупных озёр или озёрных рек, их централизованное водоснабжение осуществляется из водохранилищ и зарегулированных ими рек.

Большинство крупных гидроэнергетических водохранилищ часто становятся источниками водоснабжения быстро растущих городов с водоемкими производствами. Водообеспечение тепловых и атомных станций осуществляется целевыми водохранилищами (водоемы-охладители Чернобыльской и Курской АЭС, Белоярское - на р. Пышма для Белоярской АЭС под Екатеринбургом, водохранилище Смоленской АЭС на р. Десне в бассейне Днепра).

**Ирригационные водохранилища.** обеспечивающий компонент крупных оросительных систем в засушливых регионах мира. К числу наиболее крупных из них относятся Краснодарское на р. Кубань, Каракумское и Чардаринское - на р. Сырдарья. За рубежом - Индия, центральный и южный Китай, Австралия – от водоемов крупного размера до малых водохранилищ и прудов.

Отличительная черта ирригационных водохранилищ - наличие пресной воды и отсутствие ядовитых, радиоактивных, канцерогенных и других отравляющих веществ, способных накапливаться в возделываемых культурах. Соответственно формулируются требования ирригации заключаются в поддержании объемов водоподдачи и уровней, которые обеспечивают бесперебойный отбор воды из водохранилищ в подкомандные оросительные системы, в том числе для затопления рисовых чеков.

Рыбное хозяйство ориентировано на уменьшение зимней сработки водохранилищ для предотвращения зимних заморов и гибели рыбы. Наполнение водохранилища после зимней сработки до отметки НПУ желательно к началу весеннего нереста рыб с сохранением этой отметки до конца нереста. В это время особенно недопустимы резкие (более чем 5—10 см) колебания уровня (иначе обсыхает и гибнет икра рыб). В течение лета для возобновления луговой растительности в целях создания нерестового субстрата (для нереста будущего года) желательна ежегодная летняя сработка уровня на 1—2 м. На отдельных водохранили-

цах рекомендуется небольшое понижение уровня воды осенью для привлечения рыбы из заморных зон в более глубокие акватории водохранилища.

Низовья рек требуют весеннего затопления нерестилищ в поймах и дельтах. Рыбохозяйственные попуски должны обеспечивать плавный подъем и спад уровней и продолжаться 1—2 месяца. Это согласуется и с требованиями ГЭС, которые ориентированы на гарантированные значения мощности. Рыбоводно-рекреационные водохранилища и пруды, обычно небольшого размера сооружаются вблизи крупных городов и служат источником свежей, наиболее ценной в пищевом отношении рыбы для населения и местом массового отдыха, так называемого «отдыха выходного дня». Для рекреации помимо традиционных запросов водоснабжения санаторно-курортных комплексов требуется стабильный уровень режим в сезоны массового отдыха и спорта.

Для выполнения функции борьбы с наводнениями и их последствиями необходимо, чтобы в периоды экстремальных половодий и паводков водохранилище должно располагать резервом для аккумуляции части гидрографа. Поэтому практически все водохранилища должны быть сработаны до отметки НПС (нормальной предполоводной сработки), которые даже могут быть дифференцированы для различных прогнозируемых условий.

Противопаводковые водохранилища сооружаются на реках с многоводными и трудно прогнозируемыми паводками. В России преимущественно противопаводковыми служат крупнейшие Зейское и Бурейское водохранилища в бассейне Амура, предназначенные, в первую очередь, для уменьшения высоты и частоты наводнений в среднем и нижнем течении этой многоводной реки. Много противопаводковых водохранилищ построены в США и Японии.

Пойменные попуски в регионах с летне-осенними половодьями требования сельского хозяйства совпадают с общими противопаводковыми задачами. При сельскохозяйственном использовании пойм нежелательны зимние наводнения, вызываемые пропуском через турбины ГЭС высоких расходов воды, поскольку пропускная способность русла снижается вследствие ледового покрова.

## 2.2. Классификационные схемы водохранилищ

Таким образом водохранилища — это универсальные структуры, которые служат множеству целей, удовлетворяя различные потребности человека, а также влияя на экологические системы и ландшафты. Их проектирование и управление требуют тщательного баланса между потребностями человека и экологической устойчивостью.

Водоохранилища играют решающую роль в управлении водными ресурсами, обеспечивая воду для различных целей, таких как питье, орошение и производство электроэнергии. Эти искусственные водоемы бывают разных форм и размеров, что приводит к разработке различных классификаций, основанных на их функциях, размерах и воздействии на окружающую среду. В этом исследовании мы углубимся в существующие классификации водоемов, изучим критерии, которые их определяют, и значение этих классификаций в управлении водными ресурсами.

**Классификация водохранилищ** имеет большое значение, как с практической, так и с научной точки зрения. Российская (советская) методология классификации связана с именами А.Б. Авакяна, В.А. Шарапова, К.К. Эдельштейна и других выдающихся отечественных ученых. Согласно классификации К.К. Эдельштейна водоемы, связанные с хозяйственно-питьевым и техническим водоснабжением, относятся к *водоемам повышенного качества*. В связи с этим эксплуатация водоемов направлена на предотвращение антропогенного эвтрофирования. Следовательно, должно обеспечиваться природное самоочищение воды, достаточное для поддержания органолептических свойств. В этих водоемах в соответствии с требованиями гидроэкологии желательна олиготрофная стадия состояния. К этой же категории относятся и все гидроэнергетические водохранилища, поскольку они, даже созданные в незаселенных районах, становятся источниками водоснабжения для строителей и в качестве агента для охлаждения гидроагрегатов.

Для водоемов повышенной биологической продуктивности, используемых

только в рыбном и сельском хозяйстве, эвтрофирование, наоборот, желательно для повышения рыбопродуктивности прудов или плодородия орошаемых их водами земель. Наконец в рамках той же классификации, выделяются водоёмы, качество воды в которых незначимо для основных водопользователей. К данной категории относятся водохранилища транспортного назначения, противопаводковые, водоёмы, сооружённые для приема и разбавления сточных вод, для межбассейновой переброски стока, для обводнения малых рек близких или смежных бассейнов.

Приведенная ниже классификация предусматривает разделение водохранилищ, регулирующих водный сток, на три основных группы: по назначению, по типу регулирования и по масштабам влияния. По назначению можно выделить:

- отраслевые гидроузлы, ориентированные на удовлетворение требований одной отрасли (энергетика, сельское хозяйство, хозяйственное водоснабжение и т.п.)
- более распространенные – водохранилища комплексного назначения, то есть многоцелевые
  - природоохранные решают задачи природообустройства
  - противопаводковые водохранилища предназначены для защиты территорий и населения от наводнений.

Каждый из указанных типов в свою очередь подразделяется в соответствии со схемой (рис. 2.1). Данная классификация, чисто функциональная, предусматривает разделение водохранилищ, регулирующих водный сток, на три основных группы: по назначению, по типу регулирования и по масштабам влияния. По назначению можно выделить:

- отраслевые гидроузлы, ориентированные на удовлетворение требований одной отрасли (энергетика, сельское хозяйство, хозяйственное водоснабжение и т.п.)
- более распространенные – водохранилища комплексного назначения, то есть многоцелевые
  - природоохранные решают задачи природообустройства

▪ противопаводковые водохранилища предназначены для защиты территорий и населения от наводнений.

Каждый из указанных типов в свою очередь подразделяется в соответствии со схемой.

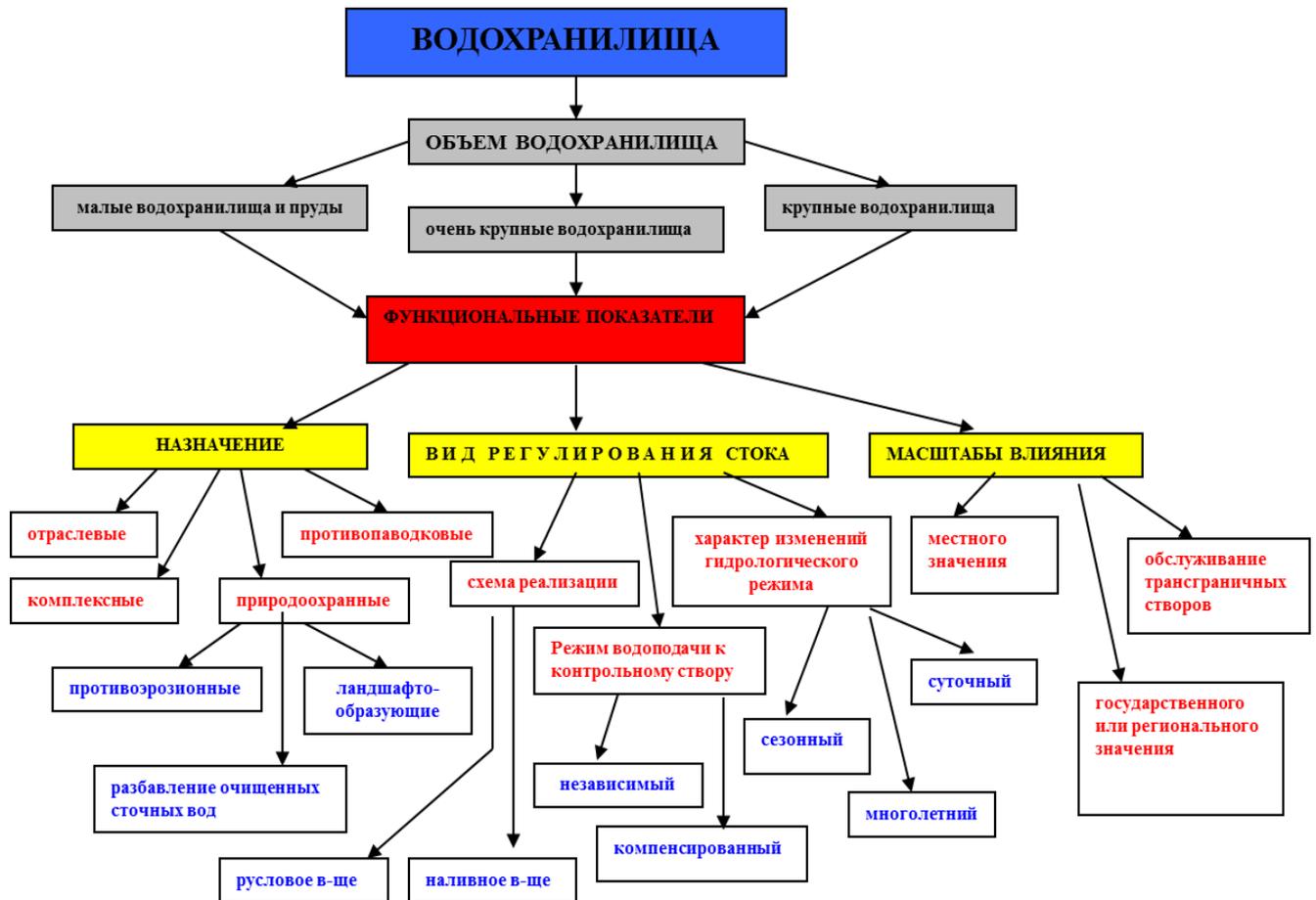


Рисунок 2.1 – Функциональная классификация водохранилищ

Режимы использования многоцелевых водохранилищ компромиссны. Несмотря на это, в большинстве случаев комплексное использование водохранилищ экономически более рационально по сравнению с малыми локальными емкостями одноцелевого назначения.

При проектировании и управлении водохранилищами необходимо предусматривать специальные санитарные и природоохранные попуски из водохранилищ. Осуществление из водохранилищ рыбохозяйственных попусков в низовья и дельты рек приводит к понижению уровней воды в водохранилищах, что наносит

ущерб рыбному хозяйству, так как обсыхает и погибает отложенная рыбой икра, на мелководьях гибнет молодь и т. д.

### **Малые, средние и большие резервуары**

Резервуары можно разделить в зависимости от их емкости на малые, средние и большие категории. Критерии классификации различаются в зависимости от региона, но, как правило, малые водохранилища имеют емкость до нескольких миллионов кубических метров, средние водохранилища варьируются от нескольких миллионов до ста миллионов кубических метров, а крупные водохранилища превышают этот диапазон. Классификация по размерам важна для понимания масштабов хранения и управления водой.

### **Макро-, мезо- и микрорезервуары**

Более детальная классификация по размеру рассматривает макро-, мезо- и микроколлекторы. Макрорезервуары обычно имеют объем хранения, превышающий 100 миллионов кубических метров, мезорезервуары варьируются от 1 до 100 миллионов кубических метров, а микрорезервуары имеют емкость менее 1 миллиона кубических метров. Эта классификация помогает адаптировать стратегии управления к конкретным проблемам, связанным с каждой категорией размера.

### **Классификации, основанные на воздействии на окружающую среду**

**Водоохранилища для охраны окружающей среды.** Водоохранилища могут оказывать значительное воздействие на окружающую среду, изменяя экосистемы и влияя на биоразнообразие. Водоохранилища, охраняющие окружающую среду, проектируются и управляются с упором на минимизацию этих воздействий. Они часто предполагают тщательное рассмотрение экологических факторов, таких как сохранение среды обитания, поддержание качества воды и смягчение нарушения естественного режима стока.

**Многоцелевые резервуары.** Многие водохранилища выполняют несколько функций, таких как водоснабжение, ирригация и выработка гидроэлектроэнергии. Эти многоцелевые резервуары предназначены для удовлетворения различных потребностей и часто считаются более надежными с точки зрения использования ре-

сурсов. Однако их классификация требует детального понимания компромиссов и синергии между различными функциями.

В конечном счете, классификации водоемов, основанные на функциях, размерах и воздействии на окружающую среду, обеспечивают основу для понимания их разнообразной роли в управлении водными ресурсами. Эти классификации не являются взаимоисключающими, поскольку многие резервуары служат нескольким целям и попадают в несколько категорий. Понимая нюансы классификации водоемов, политики, инженеры и экологи могут принимать обоснованные решения для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами в быстро меняющемся мире.

**Технологические достижения в строительстве и управлении водохранилищами.** Технологические достижения на протяжении многих лет существенно повлияли на строительство и управление водохранилищами. Эти инновации повысили безопасность и эффективность водохранилищ, позволяя лучше использовать водные ресурсы. К таким инновациям относятся ГИС (геоинформационные системы), дистанционное зондирование, цифровые модели рельефа, БПЛА, различные автоматизированные системы мониторинга, включая мониторинг качества воды. Далее рассматривается, как водохранилища способствуют надежному и устойчивому водоснабжению для бытовых, промышленных и сельскохозяйственных целей.

**Проблемы городского водоснабжения.** В городских районах водоемы играют решающую роль в обеспечении стабильного снабжения чистой и питьевой водой для удовлетворения потребностей растущего населения. Изучение тематических исследований городских резервуаров водоснабжения дает представление о инженерных, управленческих и политических соображениях, которые способствуют решению проблемы нехватки воды в городах.

**Смягчение последствий наводнений.** Наводнения представляют собой серьезную угрозу общинам, сельскому хозяйству и инфраструктуре. Водоохранилища, предназначенные для борьбы с наводнениями, помогают регулировать поток рек и ручьев, снижая риск наводнений ниже по течению во время сильных дождей

или таяния снегов. В этом разделе рассматриваются инженерные принципы, лежащие в основе водохранилищ для борьбы с наводнениями, и рассматривается их эффективность в снижении риска стихийных бедствий.

**Готовность к чрезвычайным ситуациям.** Водоохранилища играют решающую роль в обеспечении готовности к чрезвычайным ситуациям, обеспечивая защиту от воздействия экстремальных погодных явлений. Анализ практики управления водохранилищами, систем раннего предупреждения и стратегий реагирования на чрезвычайные ситуации проливает свет на то, каким образом водохранилища способствуют управлению стихийными бедствиями.

**Гарантированное производство пиковой энергии.** Гидроэнергетика, возобновляемый источник энергии, используется посредством строительства водохранилищ. В этом разделе рассматривается роль водохранилищ в производстве гидроэлектроэнергии, изучается их вклад в производство энергии, сокращение выбросов парниковых газов и интеграцию возобновляемых источников энергии в глобальный энергетический баланс.

**Тематические исследования гидроэнергетических водохранилищ.** Изучение конкретных проектов гидроэнергетических резервуаров по всему миру дает представление о технологических достижениях, экологических соображениях и социально-экономических последствиях, связанных с производством энергии с помощью водохранилищ. Тематические исследования могут включать такие знаковые проекты, как плотина «Три ущелья» в Китае или плотина Гранд-Кули в США.

**Охрана окружающей среды и биоразнообразие с целью сохранения водных и околородных экосистем.** Водоохранилища, спроектированные с учетом охраны окружающей среды, могут способствовать сохранению биоразнообразия и созданию среды обитания. В этом разделе рассматриваются принципы экологически сознательного управления водохранилищами, освещаются успешные проекты, в которых приоритетом является здоровье и баланс экосистемы.

**Многоцелевые водохранилища.** Многоцелевые водохранилища служат примером интеграции различных функций, балансирования водоснабжения,

борьбы с наводнениями, производства энергии и охраны окружающей среды. Изучение проблем, компромиссов и синергии, связанных с многоцелевыми водоемами, дает всестороннее представление об их роли в решении проблем, связанных с водой [36, 57, 66].

**Адаптация к изменению климата.** Изменение климата ставит новые проблемы в управлении водными ресурсами, влияя на характер осадков, температуру и частоту экстремальных погодных явлений. Водохранилища, если они спроектированы и управляются с учетом климатической устойчивости, могут адаптироваться к этим изменениям. В этом разделе рассматривается, как водохранилища способствуют адаптации к изменению климата и стратегиям смягчения его последствий.

**Инновационные технологии для смягчения климатических изменений.** Технологические достижения, такие как моделирование климата, прогнозная аналитика и технологии «умных плотин», повышают способность водохранилищ реагировать на проблемы, связанные с климатом. Углубленный анализ этих технологий дает представление об их роли в обеспечении надежности и долговечности водохранилищ.

**Лучшие практики управления резервуарами и задачи планируемой перспективы.** Изучение передового опыта в управлении резервуарами предполагает рассмотрение структур управления, взаимодействия с заинтересованными сторонами и интеграции научных исследований в процессы принятия решений. В этом разделе оцениваются успешные тематические исследования и модели управления водохранилищами. Предвидение будущих проблем, таких как рост населения, увеличение спроса на воду и изменение экологических приоритетов, имеет решающее значение для эффективного управления водохранилищами. Изучение новых тенденций, инноваций и потенциальных решений дает перспективный взгляд на меняющуюся роль водохранилищ в решении водных проблем.

Водохранилища играют многогранную и неотъемлемую роль в решении проблем, связанных с водой. Водохранилища вносят значительный вклад в глобальное управление водными ресурсами: от обеспечения надежного водоснабже-

ния до смягчения последствий наводнений, стабильного производства энергии, сохранения экосистем и адаптации к изменению климата. Понимание их разнообразных функций и меняющихся проблем имеет важное значение для разработки стратегий, которые используют весь потенциал водохранилищ для решения водных проблем и построения благоустроенного будущего.

### **2.3. Факторы, влияющие на выбор створа гидроузла**

Водоохранилища создаются либо естественным образом (моря, озера), либо путем использования топографических понижений, потенциально приспособленных для аккумуляции значительных объемов воды. Принимаются во внимание следующие условия.

- Наличие водонепроницаемого основания
- Наличие достаточной топографической емкости
- В створе гидроузла желательно контролировать больше стока, но этому препятствует ряд обстоятельств: большие затраты на строительство, значительные площади затопления, наличие притоков с большим количеством наносов
- Следует по возможности выбирать прямолинейный участок русла во избежание размывов в нижнем бьефе
- Необходимо исключить опасность оползней
- Минимизация производства работ
- Прочностные характеристики грунтов в основании сооружений и тип сооружений
- Морфометрические, в частности батиграфические характеристики створа, играют значительную роль в оценке водохозяйственного и водно-энергетического потенциала

Последний фактор в данном исследовании имеет большое значение, поскольку связан с соотношением глубин, площадей и объемов будущего водохранилища. Последовательность построения в настоящее время основывается на цифровой модели гидрографической сети с использованием ГИС. Предваритель-

но по каждому из конкурентных створов устанавливаются расчетные характеристики: орография (рельеф, уклоны), замыкаемая площадь водосбора, водохозяйственный и гидроэнергетический потенциал, ряд других показателей эколого-экономического характера. Это позволяет отбросить экономически нерентабельные варианты. Для получения кадастровых характеристик рек используется разработанный во «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» ГИС-инструмент, производящий оценку гидроэнергетического потенциала участков рек. Осуществляется автоматизированный подсчет гидроэнергетического потенциала участков рек, основанный на применении электронных топографических карт. Если оценка неудовлетворительна, вариант отбрасывается. Методика предназначена главным образом для выбора створов малых ГЭС. Для более широкого использования необходимо рассматривать больший диапазон показателей. Однако это требует серьезной доработки метода для более широкого круга задач.

#### **2.4. Примеры комплексного функционирования водохранилищ в решении водных проблем**

Проект водоснабжения штата Калифорния (SWP) в США. Калифорния испытывает периодические засухи и имеет высокий спрос на воду из-за сельскохозяйственной деятельности, городского населения и различных отраслей промышленности. Калифорнийский SWP — это сложная система управления водными ресурсами, предназначенная для решения проблем нехватки воды в штате. SWP California State Water Project) — грандиозная водохозяйственная система, обеспечивающей питьевой водой более 27 миллионов человек. Среднеголетняя выработка электроэнергии составляет 6500 ГВт\*час с потреблением нетто примерно 5100 ГВт\*час.

Проект решает проблемы дефицита водных ресурсов в период засухи, что касается практически всех отраслей. Водохозяйственная система комплекса включает сеть водохранилищ, акведуков и насосных станций. Центральный объект системы озеро Оровилл (4,4 кубокилометра), одно из крупнейших в Калифор-

нии. В периоды засухи SWP сбрасывает накопленную воду из озера Оровилл для удовлетворения потребностей в воде сельского хозяйства, городских районов и различных водных районов. Минимальный ежегодный сброс воды из озера Оровилл, варьируемый в зависимости от условий засухи, установлен в 617 млн.м<sup>3</sup>.

Кроме производства гидроэлектроэнергии Озеро Оровилл также служит важным водохранилищем гидроэнергетики, обеспечивая энергетические потребности Калифорнии. Энергетическая мощность составляет около 700 Мвт в год. Параллельно решаются экологические требования по защите и улучшению окружающей среды. Это достигается регулированием сбросов в интересах экосистем, рыболовства и нормативов качества воды. Многогранность проекта обусловлена также переброской воды в Южную Калифорнию, поскольку SWP облегчает передачу воды из Северной Калифорнии в Южную Калифорнию через систему акведуков, удовлетворяя потребности в воде густонаселенных городских территорий. Объемы переброски воды в Южную Калифорнию варьируются в зависимости от спроса и наличия.

### **Достигнутые результаты**

**Производительность сельского хозяйства:**

Поддержка орошаемых сельскохозяйственных угодий: сотни тысяч акров получают воду из SWP, поддерживая выращивание разнообразных культур.

**Городское водоснабжение:**

Обслуживается городское население: Миллионы жителей Южной Калифорнии полагаются на воду SWP для бытового использования.

**Экономическое влияние:**

Вклад в экономику Калифорнии: Экономическая деятельность на миллиарды долларов поддерживается надежным водоснабжением для сельского хозяйства и промышленности.

**Гидроэнергетика:**

Вклад в возобновляемые источники энергии: SWP вносит значительную часть в портфель возобновляемых источников энергии Калифорнии.

**Охрана окружающей среды:**

Сохранение экосистемы: регулируемые сбросы воды поддерживают экосистемы нижнего течения, сохраняя биоразнообразие.

Водный проект штата Калифорния является примером решающей роли, которую действующее водохранилище играет в решении проблем нехватки воды в конкретном регионе. Водоохранилище не только обеспечивает надежное водоснабжение сельского хозяйства и городских территорий, но также способствует выработке энергии и сохранению окружающей среды. Измеримые преимущества демонстрируют ощутимое влияние хорошо управляемой системы водохранилищ на водную безопасность и социально-экономическую стабильность в штате Калифорния.

Нередко в XX – XXI веках строительство водохранилищ, особенно крупных, создают новые международные проблемы. Характерным примером является река Евфрат с площадью водосбора более 650 тыс. км<sup>2</sup> с неполной определенностью в оценке водных ресурсов. Тигр и Евфрат (рис. 2.2) приходят из Турции и являются основным источником водоснабжения десятков миллионов человек.



Рисунок 2.2 – Существующие (выделено черным цветом) и проектируемые, либо строящиеся, гидроузлы (выделено желтым цветом).

Политические конфликты здесь в значительной степени обусловлены отсутствием согласованного плана перспективного водопользования, который в равной степени устраивал бы трансграничные интересы Сирии, Турции и Ирака с последующим переходом к трехсторонним переговорам. Евфрат формирует примерно 80% водных ресурсов Сирии. Создание гидроэнергетического каскада на Евфрате практически завершено. Крупное водохранилище Эль-Асад (1973 год) объемом около  $12 \text{ км}^3$  с площадью зеркала более  $600 \text{ км}^2$  и потерями на испарение около  $1,5 \text{ км}^3$  в год. Назначение объекта – производство электроэнергии наряду с регу-

лярным орошением в долине Евфрата [9]. Гидроузел введен в действие в 1973 г., резко обострив обстановку между Сирией и Ираком, поскольку крупные водохранилища для начала эксплуатации должны набрать определенный объем, соответствующий проектному режиму регулирования. Благодаря участию СССР и Саудовской Аравии конфликт был урегулирован. В 90-е годы аналогичный конфликт возник уже между Турцией и Сирией вследствие заполнения водохранилища Ататюрк. Объем огромного водохранилища на Евфрате составляет 48,7 км<sup>3</sup>, что в сумме с водохранилищами Кебан и Каракая достигает 90 км<sup>3</sup>. В 1980 г. на основе соглашения между Ираком и Турцией создан Совместный технический комитет (далее – СТК) по региональным водам, к которому в 1983 г. присоединилась Сирия. Помимо общих вопросов рационального использования и распределения водных ресурсов Тигра и Евфрата, предусматривались обмен гидрологическими и метеорологическими данными и обсуждение режимов наполнения водохранилищ Каракая и Ататюрка на территории Турции. Несмотря на многочисленные совещания, деятельность СТК была недостаточно эффективной в силу разного понимания принципов совместного использования водных ресурсов, что и привело к прекращению его деятельности в 1992 году. Характерной особенностью практически всех водохозяйственных стратегий стран-участниц является их политическая несовместимость на разных отрезках времени. Следует рассматривать Евфрат и Тигр как единую водную систему или независимо? По мнению Турецкой стороны, обе реки образуют единый трансграничный речной бассейн (Шатт-эль-Араб), и в соответствии с Конвенцией о праве несудоходных видов использования международных водотоков Евфрат не является «международной рекой», оставаясь в области суверенного права Турции. Естественно, что позиция Ирака и Сирии противоположна и основывается на обязательном соглашении по распределению водных ресурсов Евфрата с учетом потребностей каждой из заинтересованных сторон. В 1989 г. подписано соглашение о совместном водопользовании, подтверждающем транзит Евфрата на границе Турции с Сирией в размере 500 м<sup>3</sup>/с, из которых 210 м<sup>3</sup>/с резервируется для Ирака. Наиболее конструктивная инициатива заключалась в создании в 2008 г. совместного «водного института» в Турции, ко-

торый должен работать над решением трансграничных водных проблем трех стран. Инициатива предложена в качестве модели отношений для стран Центральной Азии.

Исходя из имеющейся информации, выполнен экспертный расчет того, сколько водных ресурсов Евфрата может быть гарантировано на границе с Сирией. Источник информации Международной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии [9] имеет в открытом доступе следующие данные (Таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Многолетние параметры стока Евфрата в разные периоды

Период	Средний сток, км <sup>3</sup>	Минимальный наблюдаемый	Максимальный наблюдаемый	C <sub>v</sub>
1938-2010	26,6	12,7	56,8	0,33
1938-1973	30,0	15,0	56,8	0,29
1974-1987	24,9	12,7	34,1	0,27
1988-1998	25,5	14,7	50,1	0,42
1974-1998	25,1	12,7	50,1	0,34

Кривые обеспеченности стока на рисунке 2.3 показаны в естественном состоянии реки, а также с учетом многолетнего регулирования стока.

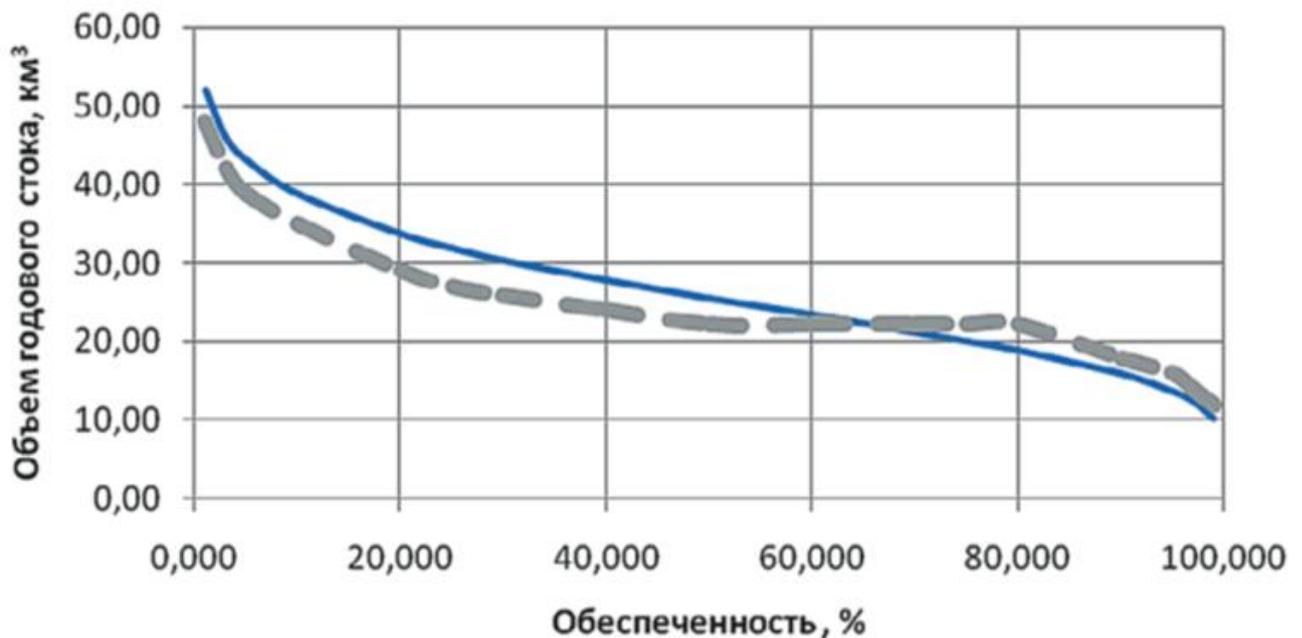


Рисунок 2.3 – Совмещенные кривые обеспеченности стока Евфрата

Приведен наиболее оптимистичный сценарий, поскольку оценки, встречающиеся в публикациях, указывают на более существенное снижение стока в связи с антропогенным воздействием и вероятными изменениями климата. Однако эти оценки приводятся без подтверждения. Как следует из графика, при оптимистичном сценарии транзит в Сирию составляет в среднем 20-22 км<sup>3</sup> в год. В остро-маловодные годы цифры транзита снижаются 12-16 км<sup>3</sup>. Таким образом, обязательства Турции в расчетные маловодные периоды напрямую зависят от водопотребления на территории Турции.

Разнообразие проблем и технических решений в различных водохозяйственных системах очень велико. Известным в России водохранилищем много-летнего регулирования является Цимлянское водохранилище (Цимлянский гидроузел – ЦГУ, Цимлянская ГЭС, 1953 год ввода, рис. 2.4), которое является гарантом водопользования в бассейне Дона. Водоохранилище работает в интересах водообеспечения отраслей экономики, включая энергетику и водный транспорт ниже створа гидроузла. Дополнительной функцией Цимлянского водохранилища является гарантированной обводнение рек Сал и Маныч с самостоятельной водно-экологической системой. Водоохранилище общим объемом 21,5 км<sup>3</sup> (полезная емкость 12,6 км<sup>3</sup>) образовано 13 – ти километровой плотиной, создающей напор 27м. Мощность приплотинной ГЭС 160 тыс. квт. Следствием многолетнего регулирования явилось практически полное прекращение половодий и иссушение пойменных земель Нижнего Дона, нарушившее естественное воспроизводство рыб в Азовском море. Воды Дона сильно загрязнены промышленными стоками центрально-черноземной зоны и Донбасса. Цимлянское водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока, хотя этот проектный режим под большим вопросом, поскольку кардинально изменились морфометрические условия, произошли антропогенные изменения гидрологических условий, режим водопотребления и водопользования [17, 28, 57].

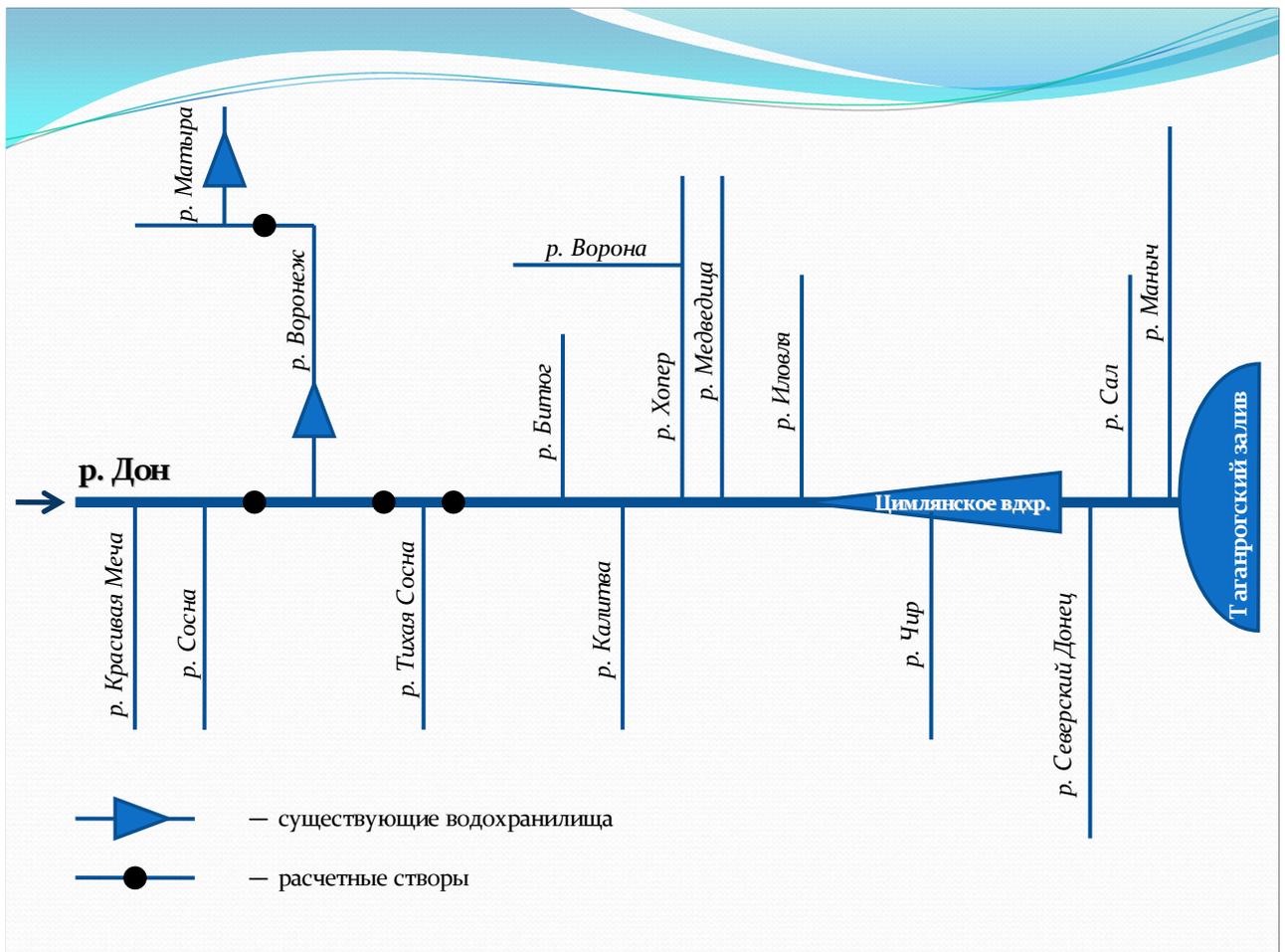


Рисунок 2.4 – Линейная схема реки Дон

Главными гидротехническими и водохозяйственными объектами России являются Волжско – Камский (ВКК) и Ангаро-Енисейский (АЕК) каскады ГЭС (рис. 2.5).

ЭС Сибири -109 ЭС с  $N_{уст}=52$  ГВт, в том числе 25,3 ГВт – ГЭС.

Выработка 88 тВт\*час ~46 % ЭС Сибири

Иркутское водохранилище — на реке Ангаре (Иркутская область и Бурятия) включает в себя озеро Байкал. Строительство гидроузла привело к подъему уровня Байкала примерно на 1,5 м. Объем в-ща примерно 23,7 км<sup>3</sup>, осуществляет многолетнее регулирование стока Ангары.



Рисунок 2.5 – Ангаро-Енисейский каскад ГЭС

Волжско-Камский каскад ГЭС (рис. 2.6) включает в себя 13 гидроузлов на Волге, Каме и Шексне, из них 12 имеют в своем составе гидроэлектростанции. Суммарная установленная электрическая мощность ГЭС в бассейне Волги превышает 12 ГВт, а среднегодовая выработка электроэнергии — 38,5 млрд кВт·час. Крупнейшие гидроэлектростанции каскада, покрывающие пиковую часть графика электропотребления, являются основой Единой энергетической системы России [21].



Рисунок 2.6 – Волжско – камский каскад водохранилищ.

Водохранилища изменяют водный режим водотоков, сокращая объем и продолжительность половодий и паводков. В районах с летними паводками изменение расходов может защищать сельскохозяйственные земли от затопления в период вегетации присуще Закарпатья, Дальнему Востоку. В зонах избыточного увлажнения улучшаются условия обводнения и повышается продуктивность пойменных лугов, которые являются природными пастбищами – отметить необходимость проектирования режимов обводнения пойменных земель (Павлодарско-Омская пойма).

Одна из важнейших хозяйственных и социально экологических проблем, которая может приводить и приводит к критическим для экономики любой страны ущербам – это наводнения разной генетической природы. Водохранилища – один из способов защиты от наводнений. Характерно для гидроэнергетических объектов: Асуанская плотина с водохранилищем более 130 км<sup>3</sup> – 44 км<sup>3</sup> предназначены для регулирования паводков. В крупнейшей в КНР ГЭС «Три ущелья» 22

из 39 км<sup>3</sup> приходится на противопаводковую емкость. Высота призм форсировки может различаться от 10 см на Иовской ГЭС (Мурманская область), один метр БГЭС, 5.5 м на Виллюйской ГЭС (680 мВт – Якутия).

## 2.5. Моделирование батиграфических зависимостей

В числе параметров водохранилища длина береговой линии, площадь акватории, длина водоема, наибольшая глубина, максимальная ширина сечения перпендикулярного линии измеренной длины, площадь дна, водоема, объем водной массы на данной отметке, средняя глубина водоема, средняя ширина, глубина инерционного центра ( $H_{ци}$ ) - параметр, зависящий от конфигурации чаши озера или ложа водохранилища. Инерционный центр водоема – характеристика, указывающая на центр тяжести водной массы. Он нужен для определения гравитационной устойчивости в водоемах разной формы. А также показатель служит для расчетов потенциальной и кинетической энергии водной массы.

Морфометрические характеристики вычисляются по плану водохранилища в изобатах. Строятся кривые по данным промеров и относятся к уровню воды, принятому для построения плана. Значения площадей устанавливается посредством планиметрирования площадей зеркала между изобатами с учетом масштаба линейного и площадного. Далее, используя формулы стереометрии можно установить и объемные характеристики. Наибольший интерес для водохозяйственных и водно-энергетических расчетов представляют батиграфические зависимости (батиграфические кривые  $\omega(z)$  и объемные кривые  $V(z)$ ).

Основное предназначение батиграфических зависимостей – это использование в различных разделах водохозяйственных и водно-энергетических расчетов с целью обоснования проектных и эксплуатационных решений. Объемная кривая используется чаще, чем батиграфическая (главным образом для определения потерь на дополнительное испарение, фильтрацию и льдообразование).

Кривая объемов, аппроксимированная степенной функцией, позволяет быстро пересчитывать объемы в отметки и наоборот отметки (уровни) в объемы.

Кроме того, прослеживается динамика хода уровней воды в верхнем бьефе водохранилищ, а также на водомерных постах. Основным инструментом управления водными ресурсами водохранилищ - диспетчерский график. Без батиграфических зависимостей диспетчерский график не функционален. Формально батиграфические зависимости в водохозяйственных расчетах необходимы для расчета интервальных значений мощности и выработки электроэнергии [77, 129]. Поскольку алгоритм оптимизации методом обобщенного приведенного аргумента (ОПГ) применим к гладким функциям, аппроксимация батиграфических зависимостей в задачах оптимизации является обязательным. Можно возразить, что существуют другие алгоритмы, но в этом случае критически возрастает вероятность получения случайных локальных оптимумов, уводящих от правильных инженерных решений.

Наиболее простым, по нашему мнению, подходом является аппроксимация батиграфических зависимостей степенными функциями, как это показано ниже. Батиграфическая функция через отметки БС и через глубину у плотины выражается так:

$$\begin{aligned}\omega(\nabla) &= k \cdot (\nabla - \nabla_0)^m ; \nabla = \nabla_0 + \left(\frac{\omega}{k}\right)^{1/m} \\ \omega(h) &= k \cdot h^m ; h = \left(\frac{\omega}{k}\right)^{1/m}\end{aligned}\quad (2.1)$$

где:  $\omega(\nabla)$  – площадь зеркала водохранилища на отметке  $\nabla$ , м<sup>2</sup> ;

$\nabla$  - абсолютная отметка наполнения, м ;

$\nabla_0$  – отметка дна

$\omega(h)$  – площадь зеркала, как функция глубины,

$$\omega(\nabla) = k \cdot (\nabla - \nabla_0)^m \quad (2.2)$$

где:  $k$  и  $m$  – параметры функции, подбираемые по имеющейся характеристике рельефа методом среднеквадратического сглаживания в диапазоне влияющих отметок, поскольку учесть полностью весь диапазон отметок таким образом невозможно.

Объемная кривая через отметки БС и через глубину у плотины может быть получена простым интегрированием

$$V(\nabla) = k \cdot \frac{(\nabla - \nabla_0)^{m+1}}{m+1}; \nabla = \left[ \frac{V(\nabla) \cdot (m+1)}{k} \right]^{1/(m+1)} + \nabla_0$$

$$V(h) = k \cdot \frac{h^{m+1}}{m+1}; h = \left[ \frac{V(h) \cdot (m+1)}{k} \right]^{1/(m+1)} \quad (2.3)$$

где:  $V(\nabla)$ ,  $V(h)$  - объем водохранилища на отметке  $\nabla$  и как функция глубины соответственно, м<sup>3</sup>.

Имея функциональные выражения для морфометрических зависимостей, мы получаем возможность для аналитического вычисления текущих значений потерь из водохранилища, определения мощности ГЭС и выработки электроэнергии в любой момент времени. Это имеет большое значение при выполнении водохозяйственных и водно-энергетических расчетов [129]. Вид функций для разных по масштабам объектов иллюстрируются рисунками 2.7 – 2.9.

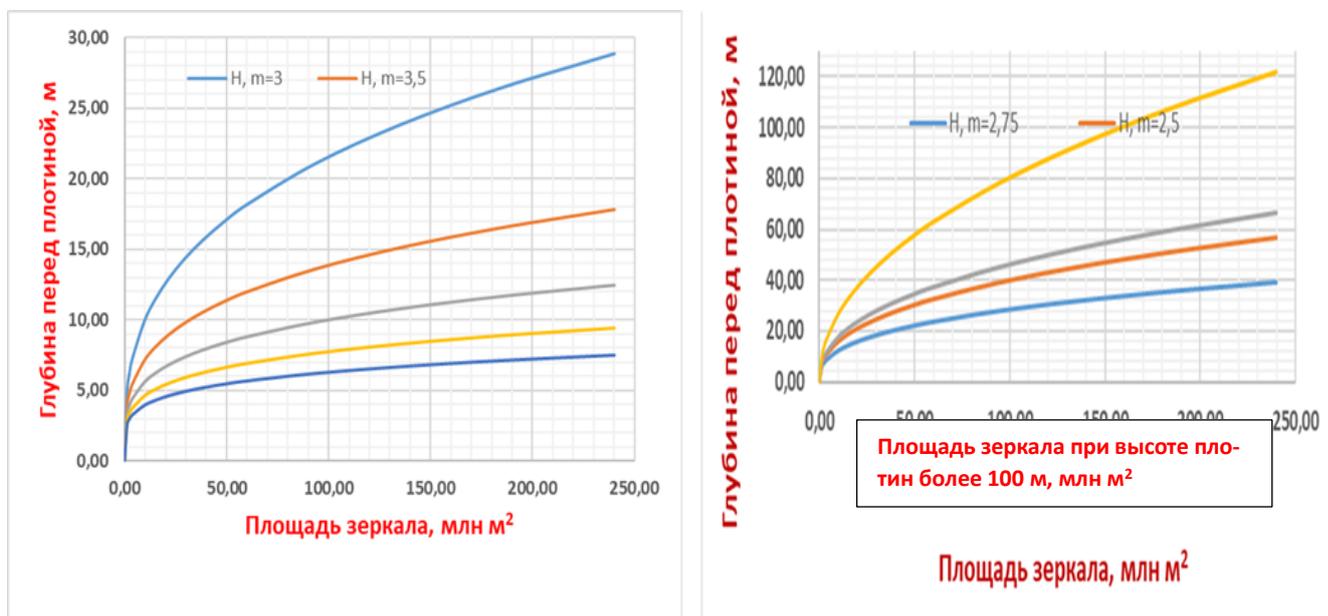


Рисунок 2.7 – Эскиз батиграфических зависимостей

В ходе мониторинга морфометрии мы имеем возможность пересматривать возможности водохранилищ (диспетчерские графики, проектные показатели гарантированной воды и энергоотдачи) на основании меняющихся батиграфических характеристик. Полученные формулы использованы в моделях водохозяйственно-

го баланса в главе 5. Гидрологические характеристики более инертны, тем не менее они также подвержены изменения вследствие разных причин, в том числе изменения климата.

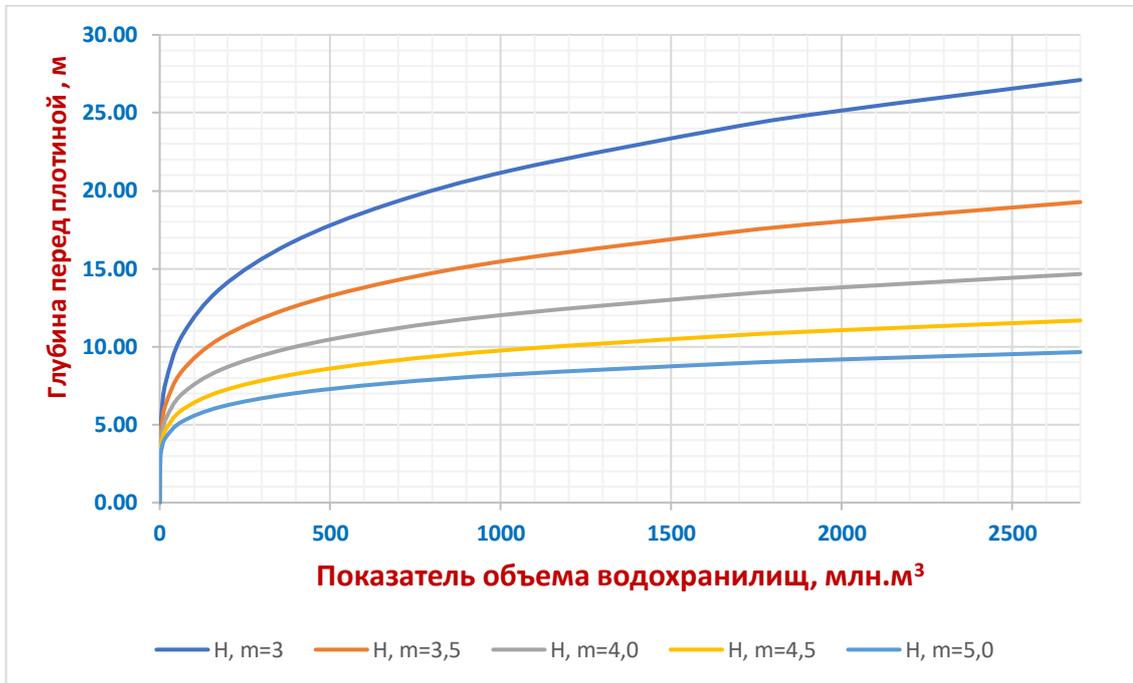


Рисунок 2.8 – Объемные кривые при разных значениях показателя степени и высотах до 30 метров

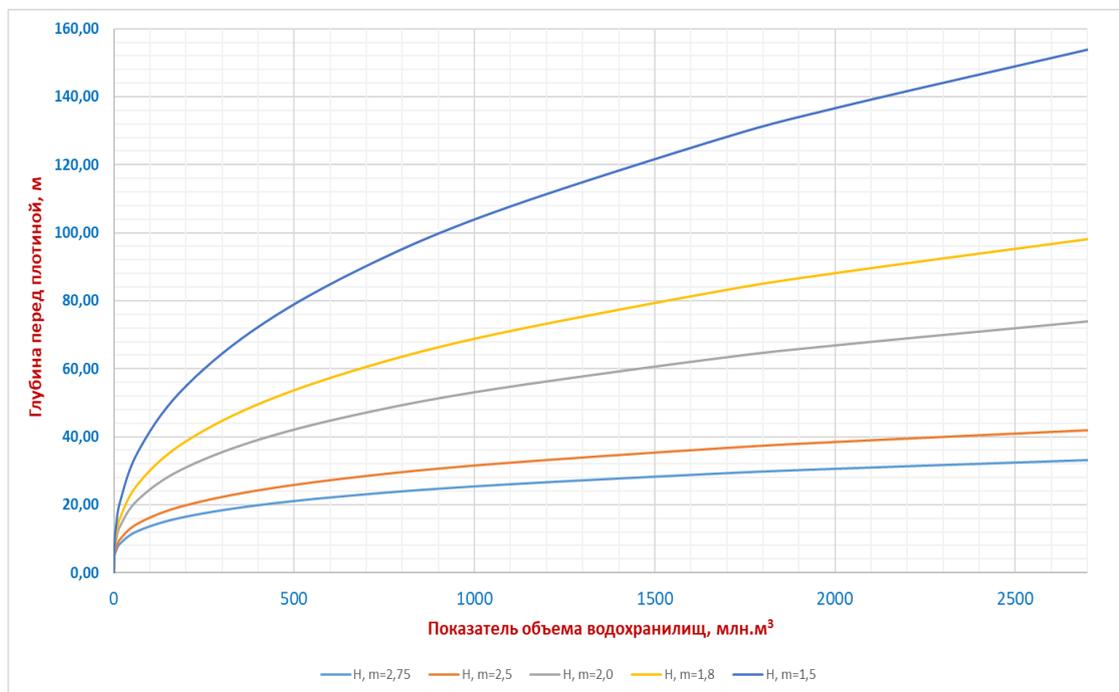


Рисунок 2.9 – Объемные кривые при разных значениях показателя степени и высотах до 160 метров

Полезным приложением подхода являются формулы для определения центра инерции, полученные соискателем для данного типа аппроксимации батиграфических функций.

$$h_c \cdot V = \int_0^H h \cdot \omega(h) \cdot dh = \int_0^H h \cdot k \cdot h^m \cdot dh = \int_0^H k \cdot h^{m+1} \cdot dh \quad (2.4)$$

$$\int_0^H k \cdot h^{m+1} \cdot dh = \frac{k \cdot H^{m+2}}{m+2} \quad (2.5)$$

$$h_c \cdot V = \frac{k \cdot H^{m+2}}{m+2} \quad (2.6)$$

$$h_c = \frac{k \cdot H^{m+2}}{V \cdot (m+2)} \quad (2.7)$$

где:  $h_c$  – центр инерции по вертикали;

$H$ – глубина водохранилища у плотины при отметке НПУ;

$V$  – объем водохранилища на отметке НПУ;

$k, m$  - параметры батиграфической функции.

## **Выводы по главе 2**

Одиночные водохранилища или созданные ими каскады являются обязательным элементом всех водохозяйственных систем, связанных с регулированием и перераспределением речного стока. Поэтому решаемые ими задачи всегда связаны как с теоретическими аспектами, так и с реальным проектным опытом гидротехнического и водохозяйственного строительства. Классификация водохранилищ обусловлена тем, что с одной стороны это, в основном искусственные водные объекты, а с другой - элементы природного ландшафта. Следовательно, решая проблемы отраслевой экономики, необходимо учитывать экологические требования, что само по себе является проблемой в каждом случае.

Выбор створов для размещения водохранилищных гидроузлов определяется множеством факторов, связанных с механикой грунтовой толщи, гидрогеологическими, гидрологическими и топографическими особенностями. Сопряженный анализ определяет вектор проектных решений. По теме диссертационных исследований, наиболее важный в этом плане вопрос моделирования морфометрических функций, в частности батиграфических зависимостей, что позволяет применение алгоритма оптимизации, применимого для непрерывных гладких функций.

Водоохранилища в развитых странах мира являются незаменимым элементом водо и энергообеспечения, поэтому гарантии функционирования определяются надежностью методов обоснования режима и параметров управления водными ресурсами.

Ошибки в определении режима и параметров регулирования стока в зависимости от масштабов объекта способны приводить к значительным экономическим и социальным ущербам. В связи с этим необходимо совершенствовать методы обоснования проектных решений в области управления водными ресурсами.

## **ГЛАВА 3. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Доступ к чистой воде является серьезной проблемой, стоящей сегодня перед миром. Хотя традиционные источники воды, такие как подземные и поверхностные воды, использовались на протяжении поколений, они становятся в ряде случаев недостаточно надежными в силу разных причин. Это могут быть антропогенные изменения речного стока, изменение климата и другие факторы. В связи с этим возрастает роль альтернативных источников водоснабжения, как дополнительный резерв для покрытия дефицитов. Далее коротко рассматриваются наиболее распространенные альтернативного водопользования [55].

### **3.1. Использование местных ресурсов водосборов**

Одним из подходов к альтернативному водоснабжению является использование местных ресурсов водосбора. Это аккумуляция разных форм осадков в естественных или искусственных резервуарах. Опираясь на местные ресурсы, бассейновые управления, либо сообщества в развивающихся странах могут уменьшить свою зависимость от импортируемых источников воды и продвигать более надежные системы управления водными ресурсами. Однако этот подход зависит от различных факторов, таких как наличие подходящих мест для хранения, надежность распределения осадков и способность местных экосистем поддерживать деятельность по сбору и хранению воды.

Строительство биоинженерных сооружений (пруды, запруды, дамбы) разных типов может представлять собой серьезный источник водоснабжения для сельских районов, особенно для фермерских хозяйств. Однако необходимым условием для данной технологии являются комплексные природоохранные мероприятия. Это обеспечивает снижение опасности загрязнения природных вод [30-32, 65]. В числе таких мероприятий следующие:

- Повышение эффективности использования удобрений и пестицидов благодаря заблаговременному (до выпадения осадков) и технологичному внесению удобрений и пестицидов с соблюдением установленной технологии их хранения и транспортировки.
- Задержание части поверхностного стока на полях посредством поперечной распашки склонов, устройства лесополос, водозадерживающих земляных валов и бессточных канав.
- Увеличение впитывающей способности почв в результате улучшения их водно-физических характеристик. Это достигается в результате рыхления, внесения органических удобрений, пескования тяжелых и глинования легких почв.
- Снижение интенсивности снеготаяния путем снегозадержания и уплотнения снега.
- Перехват части грунтового и поверхностного стока (создание ограждающей дренажной сети, устройство прудов накопителей дренажного стока, строительство водоохраных зон). Указанные мероприятия максимально эффективны при наличии биоинженерных сооружений разного типа для улучшения задержанного стока [30, 31].
- Снижение интенсивности инфильтрации воды в почвогрунтах путем регулирования водного режима (снижение влажности почвы до нижнего оптимального предела перед внесением пестицидов, регулирование положения УГВ).

На эффективность мероприятий влияют топография, преобладающая растительность, типы почв, мелиоративные технологии, включая технологию рыхление, и конечно, параметры сооружений для аккумуляции стока. Объем прудов накопителей определяется водопотребителями и объемом водопотребления (коммунально-бытовые нужды, водопой животных, орошения и т.п.), а также длительностью периода использования, в течение которого должна быть обеспечена доступность местного населения к источнику водоснабжения.

Для предотвращения размыва пруда в верховой части устраивается крепление из каменной наброски для предотвращения эрозионного смыва почвы. Предотвращение боковой эрозии откосов пруда достигается устройством направ-

ляющих и преграждающих валов. Напорная насыпь снабжена фильтрующей призмой из каменной наброски или сорбентов (рис. 3.1) [32]. Для предотвращения поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком возможно обустройство поглотителей поверхностных вод по границе территории с засыпкой сорбента. Количество поглотителей по границе загрязненной территории зависит от модуля поверхностного стока, определяемого для рассматриваемой части водосборной площади. Необходимое количество сорбента и периодичность его замены рассчитывается с учетом физико-химических показателей сорбентов и загрязняющей нагрузки [32].

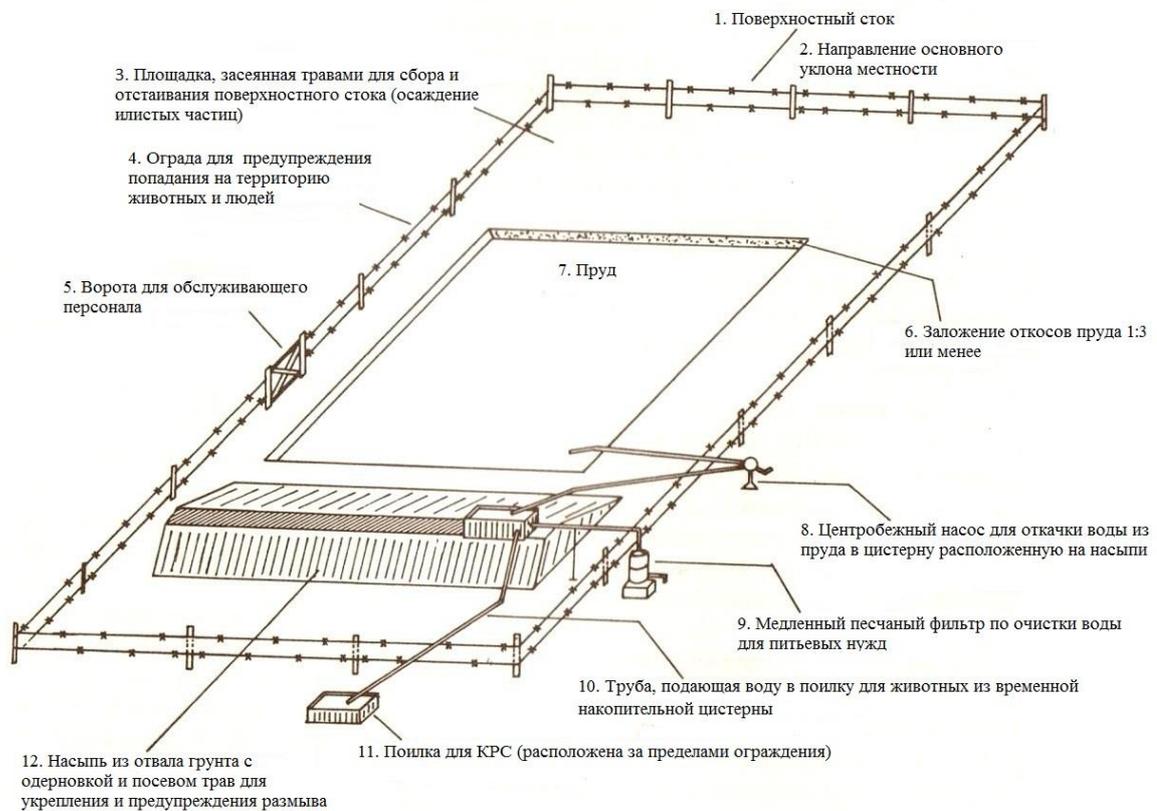


Рисунок 3.1 – Пруд-накопитель поверхностного стока.

### 3.2. Повторное использование сточных вод

Современным и перспективным альтернативным источником водоснабжения является повторное использование городских сточных вод для промышленности и энергетики, животноводческих стоков для орошения. Очищая и повторно

используя эти источники воды, хозяйства также могут уменьшить свою зависимость от источников пресной воды и продвигать более прогрессивные методы ведения сельского хозяйства. Однако с этим подходом связаны различные технические, экономические и социальные проблемы. Могут потребоваться передовые технологии очистки, чтобы гарантировать, что вода безопасна для повторного использования, и могут возникнуть опасения по поводу потенциальных рисков для здоровья человека и окружающей среды. Кроме того, необходимы эффективные стратегии взаимодействия с общественностью и коммуникации для обеспечения того, чтобы заинтересованные стороны были информированы и вовлечены в процессы принятия решений.

В Европе основным ограничительным документом является Европейский регламент 91/271. Нормативные требования к качеству воды, регенерированной для вторичного использования в различных областях деятельности, составлялись несколькими органами. Это, в первую очередь, основные направления, определяющие предельно допустимые параметры: регламенты WHO (всемирная организация здравоохранения), ЕЕА (европейское агентство по вопросам окружающей среды), ЕРА (агентство по охране окружающей среды). На вторичное использование могут направляться бытовые, городские и промышленные стоки. Вторичное использование разрешается при условии, если будет обеспечена полная экологическая безопасность (т. е. такое использование не должно наносить ущерб сложившейся экосистеме, почве и культурным растениям), а также исключен всякий риск для местного населения в санитарно-гигиеническом отношении. Должны тщательно соблюдаться требования действующих нормативных документов в части охраны здоровья и безопасности, а также действующие отраслевые нормы и правила для промышленности и сельского хозяйства [38, 70].

В большинстве случаев, чтобы воду можно было направить на вторичное использование, требуется ее предварительная очистка. Выбор степени такой очистки определяется установленными требованиями санитарно-гигиенической безопасности и стоимостными показателями. Для организации снабжения вто-

ричной регенерированной воды после очистки необходим выделенный распределительный трубопровод. В разных отраслях свои особенности:

– оросительные системы: полив культурных растений, предназначенных для производства пищевых продуктов человек и домашних животных, полива территорий различного назначения;

– водоснабжение сетей отопления и кондиционирования воздуха, вторичных водораспределительных сетей;

– промышленно-коммунальная сфера: пожаротушение, вспомогательная коммунальная сфера производственных учреждений, т.п..

Как уже отмечено ранее перед вторичным использованием регенерированной воды необходимо обеспечить норматив качества, в особенности в отношении санитарно-гигиенических требований. В настоящее время созданы альтернативные технологии очистки и дезинфекции для снижения уровня содержания микробов и токсинов при сравнительно малой стоимости. В нормативной документации представлены минимально допустимые параметры качества, которые должна иметь вода после регенерации, если предполагается направить ее на вторичное использование. Требования к восстановленным водам для вторичного использования приведены в постановлении 644/2013.

Повторное использование сточных вод коммунально-бытовой сферы (КБХ) на орошение и хозяйственные нужды, после доочистки, актуально для крупных промышленных центров. К примеру, в Москве городские стоки после очистки на Курьяновских станциях аэрации (рис. 3.2) с последующей доочисткой используются на промпредприятиях. Программа по исключению неприятных запахов от объектов водоотведения реализована к 2017 году путем сокращения эмиссии сероводорода. До этого в 2009 году достроили теплоэлектростанцию на биогазе. Значительную часть потребности в электроэнергии очистные сооружения получают фактически из сточных вод. В 2012 году внедрена система ультрафиолетового обеззараживания сточных вод.



Рисунок 3.2 – Курьяновские очистные сооружения

Эффективным методом экономии водных ресурсов являются земледельческие поля орошения (ЗПО) — мелиоративные системы, работающие на предварительно очищенных сточных водах, имеющие целью одновременно орошение и очистку воды. По существу, ЗПО это очистные сооружения, основанные на очищающих свойствах почвы и почвенной микрофлоры. Содержание органики в животноводческих стоках может способствовать повышению урожайности. Следует иметь в виду, что применение технологии может приводить к ухудшению структуры и свойств почвы. Кроме того, существует опасность загрязнения грунтовых вод. В любом случае без компенсационных мероприятий здесь не обойтись.

ЗПО размещаются на хорошо дренированных землях во избежание вторичного засоления и оборудуются ограждающей сетью для перехвата стоков с водосборной площади. Удаление их от населенных пунктов должно быть не менее 1000 м, от водных объектов—500 м. На ЗПО поступает большое количество органических и минеральных веществ, что делает такие поля источником повышенной

опасности для окружающей среды. Основным принцип использования сточных вод заключается в том, что подаваемые со сточными водами вещества в течение одного сезона должны перерабатываться почвенной биотой. Принципиальная схема ЗПО приведены на рисунке 3.3.

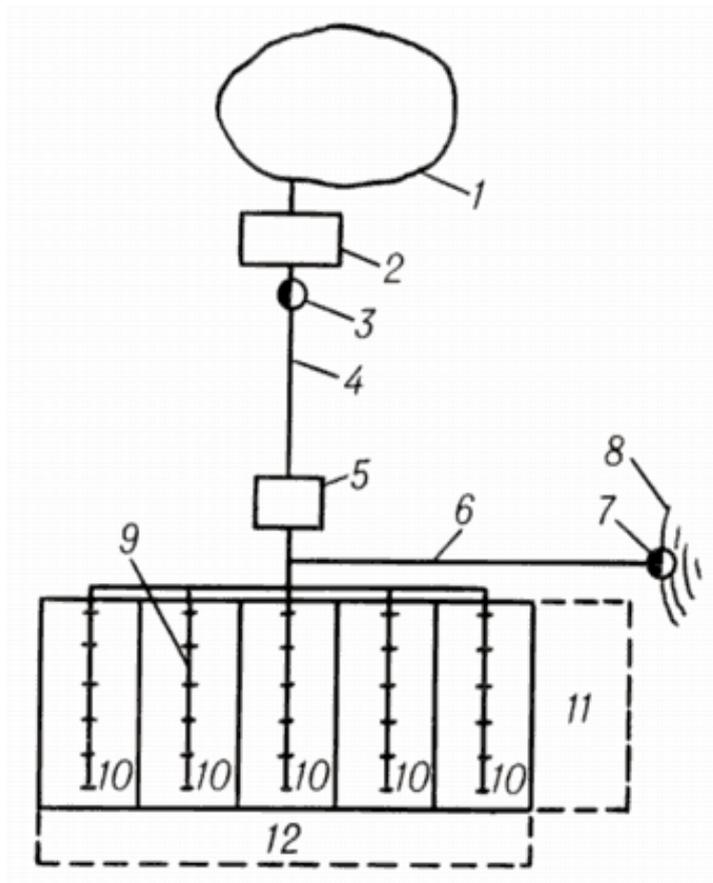


Рисунок 3.3 – Схема земледельческих полей орошения (БЭС):

- 1-Населённый пункт, сельскохозяйственное или агропромышленное предприятие;
- 2-Очистные сооружения; 3-Насосная станция подачи сточных вод;
- 4-Магистральный трубопровод; 5-Накопитель; 6-Трубопровод подачи чистой воды;
- 7-Насосная станция чистой воды; 8-Водоисточник; 9-Оросительная сеть;
- 10-Поле севооборота; 11-Резервная территория; 12-Буферная площадка.

Повторное использование муниципальных сточных вод и стоков от животноводства для орошения относится к практике использования очищенных сточных вод и стоков от животноводства в качестве источника поливной воды для сельскохозяйственных культур.

Муниципальные сточные воды образуются из бытовых, коммерческих и промышленных источников и обычно содержат большое количество питательных веществ и органических веществ. Сток скота, с другой стороны, содержит питательные вещества из отходов животноводства и корма, которые могут быть полезны для роста сельскохозяйственных культур.

Перед повторным использованием оба типа сточных вод необходимо очистить от любых вредных патогенов, химических веществ и избытка питательных веществ. Очистка может включать сочетание физических, химических и биологических процессов, чтобы обеспечить безопасность воды для использования в орошении [45].

После очистки сточные воды можно подавать на сельскохозяйственные культуры через системы орошения, такие как капельное орошение или разбрызгиватели. Питательные вещества и органические вещества в сточных водах могут служить источником питательных веществ для сельскохозяйственных культур, снижая потребность в синтетических удобрениях.

Интересными примерами в международной практике повторного использования сточных вод являются такие. В Испании очищенными стоками орошается около 20% земель, причем для этого служат более 900 очистных сооружений. В США по данным департамента водных ресурсов, около 60% очищенных сточных вод в Калифорнии используется для орошения.

В Мексике увеличивается использование очищенных сточных вод в сельском хозяйстве, особенно в городских районах, где нехватка воды является серьезной проблемой. По данным Национальной водной комиссии, в стране около 700 очистных сооружений, и около 70% очищенных сточных вод используется для орошения.

В Тунисе по данным министерства сельского хозяйства, около 40% очищенных сточных вод используется для орошения. В стране около 150 очистных сооружений, и большая часть очищенных сточных вод используется для орошения.

В Египте по данным министерства водных ресурсов и ирригации очищенные сточные воды используются для орошения около 15% сельскохозяйственных земель страны. Всего в стране около 146 очистных сооружений, и большая часть очищенных сточных вод используется для орошения.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), площадь земель, орошаемых очищенными бытовыми сточными водами, в России в 2017 г. оценивалась в 3800 га [21].

В целом использование муниципальных сточных вод для орошения становится все более распространенным явлением во многих частях мира, особенно в регионах с нехваткой воды. Хотя есть некоторые опасения по поводу потенциальных рисков для здоровья населения и окружающей среды, эта практика обычно рассматривается как экономически эффективный и надежный способ увеличения доступности воды для сельского хозяйства.

Однако будущие перспективы этой практики будут зависеть от нескольких факторов, включая наличие и качество сточных вод, экономическую жизнеспособность систем очистки и распределения, а также нормативно-правовую базу.

Согласно отчету Международного института управления водными ресурсами, глобальный потенциал использования муниципальных сточных вод для орошения оценивается примерно в 20 миллионов гектаров. Однако фактическая площадь орошения сточными водами в настоящее время составляет около 10 млн га, в основном в развивающихся странах.

С точки зрения выгод, использование муниципальных сточных вод для орошения может дать несколько преимуществ, таких как снижение водного стресса, повышение урожайности и снижение потребности в химических удобрениях. Однако существуют также потенциальные риски, связанные с этой практикой, такие как накопление тяжелых металлов, патогенов и других загрязняющих веществ в почве и сельскохозяйственных культурах. В целом, будущие перспективы использования муниципальных сточных вод для орошения будут зависеть от различных факторов, в том числе от разработки эффективных и рентабельных технологий очистки, наличия пригодных для орошения земель и внедрения эф-

фективной нормативно-правовой базы для обеспечения безопасности и надежности данной практики.

### 3.3. Использование дренажных вод

В число способов альтернативного водоснабжения входит использование дренажных вод путем обессоливания. Как и другие способы повторного использования вод он связан с комплексом проблем, которые возникают в связи с ухудшением качества почв. Достаточно перспективной является биоинженерная система для совместного использования животноводческих и дренажных стоков с ЗПО (так называемые, земледельческие поля орошения) (рис. 3.4). Здесь животноводческие стоки после механической очистки поступают в бассейн для разбавления и обеззараживания [23]. Далее осветленные воды поступают в накопитель, где смешиваются с дренажными стоками ЗПО. Ресурс накопителя затем используется для подачи на ЗПО.

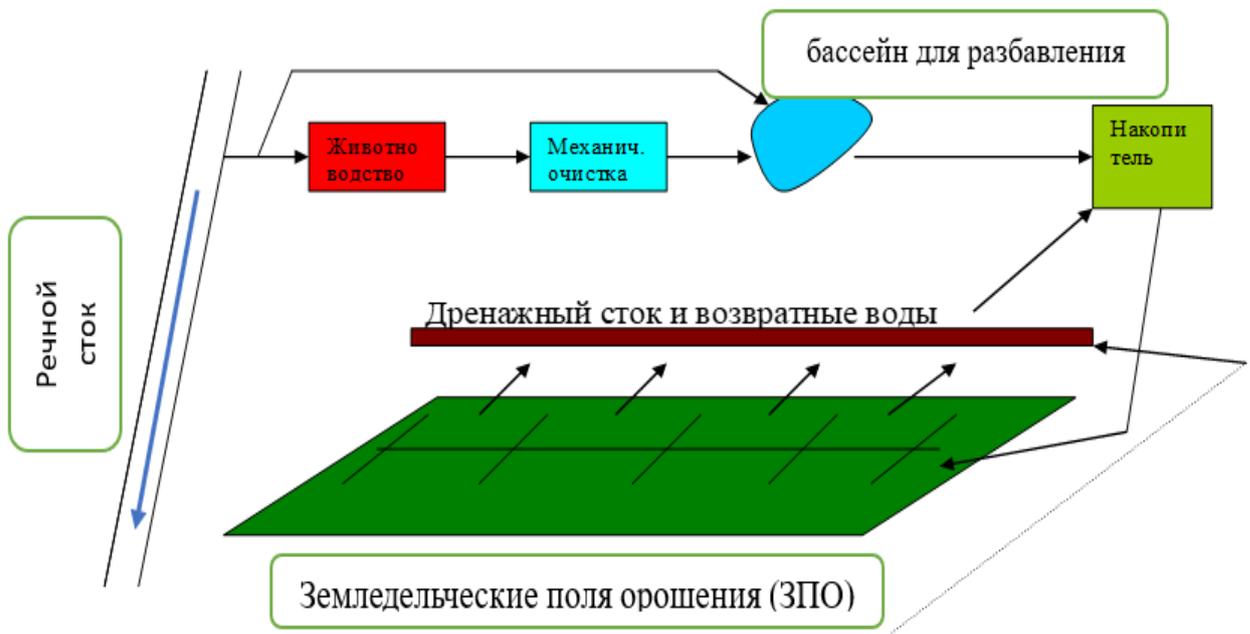


Рисунок 3.4 – Схема совместного использования животноводческих и дренажных стоков ЗПО

Дренажные стоки содержат растворенные минералы, отрицательно влияя на состояние почв. Деминерализация позволяет сделать воду пригодной для орошения. Кроме того, уменьшается количество загрязнений, поступающих в водные объекты. С одной стороны это экономия «чистых» водных ресурсов, с другой стороны сохранение экологии водного объекта. Следует отметить, что технология достаточно легко может быть внедрена в ирригационные системы, как в проектируемые, так и существующие, с учетом местных факторов. Использование деминерализованных вод не ограничено орошением, но и может применяться для пополнения ресурсов подземных вод в системах ИППВ (искусственное пополнение подземных вод). Деминерализация связана с существенными затратами электроэнергии, поэтому эффективность данного мероприятия для каждого объекта должна оцениваться с учетом его особенностей и энергоемкости.

### **3.4. Метод опреснение морских вод**

Процессы обратного осмоса и термической дистилляции это две основные технологии, используемые для опреснения морских вод. Технологии энергоемкие и дорогие, в ряде случаев связаны с необходимостью строительства атомных электростанций. Техничко-экономические показатели технологий опреснения представлены в таблице 3.1.

Одним из преимуществ опреснения является то, что оно обеспечивает надежный источник воды, который не подвержен такой же изменчивости и неопределенности, как поверхностные и подземные источники воды. Это может быть особенно важно в регионах, подверженных засухе или другим нехваткам воды, связанным с климатом.

Таблица 3.1 – Осредненные технико-экономические показатели разных технологий опреснения

Системы	Msf (multi-stage flash desalination) — метод термического опреснения, который использует мгновенное испарение для преобразования морской воды в пресную	Med (Multi-Effect Distillation) – «дистилляция многоэффектного действия)	Vcd (Vapor Compression Distillation) – «парокомпрессионная перегонка) электрические	Vcd тепловые	Ro обратный осмос	Ed электро-диализ
Капиталовложения, \$ на м <sup>3</sup> /день произведенной пресной воды	1000 – 1900	900 - 1500	1000 - 1200	900-1100	600-1200	400-700
Потребление электроэнергии (без учета водозабора из моря), кВт•час/м <sup>3</sup> пресной воды	4–6	2,5–4	8–12	1–3	4–8,5	0,7–40
Объем рабочего пара, кг/м <sup>3</sup> пресной воды	0,110–0,125	0,07–0,8	–	120–130	–	–
Максимальная производительность модуля (или системы), м <sup>3</sup> /сут	до 75000	до 35000	до 75000	до 4000	до 2500	15000

Однако существуют также потенциальные экологические и социальные последствия, связанные с опреснением. Одной из основных проблем является сброс рассола и других отходов обратно в океан, что может нанести ущерб морским экосистемам и нарушить местную рыбную промышленность. Кроме того, строительство и обслуживание опреснительных установок может быть дорогостоящим, что может ограничить доступ к этой технологии для сообществ с низким доходом. Наконец, прибрежные сообщества могут быть перемещены, чтобы освободить место для опреснительных установок или другой инфраструктуры.

Глобальные инвестиции в опреснение морской воды неуклонно росли. Согласно отчету Международной ассоциации опреснения (IDA), ожидается, что мировой рынок опреснения будет расти совокупными годовыми темпами роста 7,7% в период до 2025 год. В отчете также говорится, что совокупная глобальная установленная мощность опреснения составляет на современном этапе 90-100 млн. м<sup>3</sup>/день, что свидетельствует о значительном рост по сравнению с 2010 годом, когда глобальная установленная мощность составляла 62,4 млн. м<sup>3</sup>/день. При этом регион Ближнего Востока и Северной Африки является крупнейшим рынком опреснения.

В отчете прогнозируется, что установленная мощность систем опреснения морской воды будет продолжать расти и к 2030 году достигнет 145 млн.м<sup>3</sup>/день. Ожидается, что этот рост будет обусловлен увеличением спроса на пресную воду в районах с ее дефицитом, а также технологическими достижениями, которые сделали опреснение морской воды более энергоэффективным и рентабельным.

Что касается инвестиций, согласно отчету Global Water Intelligence за 2019 год, глобальные капитальные затраты на опреснительные установки составили около 8,2 миллиарда долларов, при этом Саудовская Аравия, Объединенные Арабские Эмираты и Кувейт являются крупнейшими инвесторами в регионе Ближнего Востока и Северной Африки. Кроме того, в отчете говорится, что участие частного сектора в проектах по опреснению воды увеличивается, при этом более 50% от общего объема инвестиций в опреснение приходится на частные компании. Инвестиции в опреснение морской воды в 2021 году росли, что было обусловлено растущим дефицитом воды во многих частях мира, особенно в засушливых и полузасушливых регионах. Экономическая целесообразность опреснения зависит от нескольких факторов, таких как стоимость энергии, стоимость технологии и наличие альтернативных источников пресной воды.

Одной из основных затрат, связанных с опреснением, является энергия, необходимая для запуска процесса. Самый распространенный метод опреснения – обратный осмос, для которого требуется значительное количество электроэнергии. Стоимость электроэнергии сильно различается в зависимости от местопо-

жения, но в районах с высокими затратами на электроэнергию опреснение может быть непомерно дорогим.

Еще одним фактором, влияющим на экономическую целесообразность опреснения, является стоимость самой технологии. Хотя стоимость технологии опреснения с годами снижается, она по-прежнему относительно дорогая по сравнению с другими методами очистки воды. Однако по мере развития технологий и достижения эффекта масштаба ожидается, что стоимость опреснения будет снижаться. В то же время наличие других альтернативных источников пресной воды может конкурировать с экономической и экологической целесообразностью опреснения. Если есть другие доступные источники пресной воды, такие как реки или подземные воды, опреснение может оказаться не самым рентабельным вариантом.

Несмотря на проблемы, опреснение соленой воды остается важным вариантом удовлетворения растущих потребностей в воде во многих частях мира. Поскольку технологии продолжают совершенствоваться, а затраты снижаться, вполне вероятно, что все больше стран будут инвестировать в опреснение воды, чтобы обеспечить более надежное водоснабжение своего населения.

Опреснение морской воды с использованием нанотехнологий может предоставить практические решения для решения проблемы нехватки воды в регионах, где ресурсы пресной воды ограничены. Методы, основанные на нанотехнологиях, могут использоваться для очистки морской воды с меньшими затратами и более высокой эффективностью, чем традиционные методы.

Нанотехнологии предлагают ряд потенциальных применений для опреснения морской воды. Один из подходов заключается в использовании нанопористых мембран, которые могут избирательно отфильтровывать соль и другие примеси из морской воды. Эти мембраны могут быть изготовлены из различных материалов, включая полимеры, керамику и металлы, и могут быть спроектированы таким образом, чтобы они обладали определенными свойствами, такими как высокая проницаемость или селективность.

Другой подход заключается в использовании наночастиц для адсорбции или катализа удаления примесей из морской воды. Например, наночастицы серебра можно использовать для дезинфекции морской воды, убивая бактерии и вирусы, а углеродные нанотрубки можно использовать для удаления органических загрязнений. Основанные на нанотехнологиях методы опреснения морской воды уже разработаны и испытаны в лабораторных масштабах, а некоторые из них успешно применяются в промышленности. Например, компания NanoH<sub>2</sub>O разработала нанокompозитную мембрану, которая используется на опреснительных установках в нескольких странах. Мембрана изготовлена из тонкой пленки полимера с внедренными наночастицами, что повышает ее селективность и проницаемость.

Одним из основных преимуществ методов опреснения на основе нанотехнологий является их способность работать с меньшими затратами и более высокой эффективностью, чем традиционные методы. Например, нанокompозитные мембраны могут работать при более низком давлении и поэтому требуют меньше энергии, чем традиционные мембраны обратного осмоса.

### **3.5. Перспективы использования альтернативных водисточников**

Резюмируя материал анализа рассмотренных источников альтернативного водоснабжения, мы можем сделать определенные обобщения.

Популярным и перспективным источником альтернативного водоснабжения становится СДВ (сбор дождевой воды). Этот способ аккумуляции водных ресурсов помимо хозяйственного имеет экологический эффект, уменьшая эрозию и увеличивая увлажнение почвогрунтов.

Перспективным в засушливых регионах является использование минерализованных подземных вод, когда опреснение базируется на использовании солнечной энергии. Очевидно, это требует высокого потенциала солнечной радиации.

Что касается опреснения морских вод, то это требует доступа к морской воде и наличия эффективных источников энергии для эксплуатации системы опреснения.

Искусственное пополнение подземных вод технология, широко используемая в мире. Реализуется посредством строительства инфильтрационных бассейнов и водопоглощающих скважин. Целесообразность этого метода связана с тем, что во многих регионах истощаются запасы подземных вод в связи с интенсивным водозабором на коммунальные и промышленные нужды.

Задача при использовании подземных вод: охарактеризовать гидрогеологические свойства водоносных горизонтов, включая пористость, проницаемость и скорость пополнения, посредством геологических исследований и гидрологического моделирования. Необходимо оценить скорость откачки на основе емкости водоносного горизонта и скорости пополнения, чтобы предотвратить чрезмерную эксплуатацию.

Для поверхностных вод следует оценить доступность поверхностных вод путем анализа исторических данных о стоке и проведения гидрологических оценок для оценки надежного урожая в различных климатических условиях. Оценить параметры качества воды, такие как мутность, уровень растворенного кислорода и питательных веществ, чтобы определить ее пригодность для различных целей.

Для подземных вод: требуется провести мониторинг уровня подземных вод и исследование характеристик водоносных горизонтов для оценки пространственного распределения и постоянного дебита подземных вод. Внедрить методы численного моделирования для моделирования потока подземных вод и прогнозирования долгосрочного воздействия откачки на уровни водоносных горизонтов и качество воды [5].

Для альтернативных источников необходимо провести анализ затрат и выгод для сравнения капитальных и эксплуатационных затрат альтернативных источников воды с традиционными. Учитываются такие факторы, как инвестиции в инфраструктуру, потребности в энергии и затраты на техническое обслуживание в течение жизненного цикла актива. Параллельно оценивается общественное признание и культурное восприятие альтернативных источников воды посредством опросов, интервью и общественных консультаций. Выявляются препятствия для принятия проектных решений, такие как недостаточная осведомленность, норма-

тивные ограничения или предполагаемые риски для здоровья, активизируется деятельность информационно-просветительских кампаний для устранения рисков. Определяются экологические преимущества альтернативных источников воды, такие как снижение давления на природные водоемы, экономия энергии за счет децентрализованных систем и сокращение выбросов углекислого газа в результате процессов очистки воды. При этом учитывается экономическая эффективность традиционных источников воды путем анализа общей стоимости водоснабжения, включая затраты на добычу, очистку, распределение и восстановление окружающей среды. Сравнение затрат традиционных с альтернативными источниками определяет экономически эффективные стратегии водоснабжения. Немаловажную роль играет социальное воздействие традиционных источников воды на местные сообщества, включая доступ к чистой воде, последствия для здоровья и социально-экономическое неравенство. Этот политический фактор должен решить проблему неравенства в доступе к качественной воде и всем формам водопользования [55].

С учетом вышеизложенного оцениваются количественные последствия для окружающей среды, связанные с традиционными источниками воды, такие как деградация среды обитания, загрязнение воды и выбросы парниковых газов. Необходимо реализовать меры по контролю загрязнения, экологической реабилитации водных объектов. На основании анализа собранной информации получены таблицы 3.2 и 3.3 производительности и стоимости воспроизводства кубометра воды по ряду стран. Данные таблиц могут быть использованы для сравнения вариантов совместного использования традиционных и альтернативных источников водоснабжения.

Таблица 3.2 – Производительность очистных сооружений поверхностного стока в зависимости от концентрации загрязнений ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ )/сут

Год внедрения	Типы очистных сооружений поверхностного стока	Производительность в зависимости от концентрации загрязнений ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ )/сут			Стоимость строительства квадратного метра, \$/ $\text{м}^2$
		Низкая	Умеренная	Высокая	
В середине 20-го века в Северной Америке	Ретенционные /детенционные водоемы	* 0.1-0.5	* 0.05-0.3	* 0.03-0.2	43.4-68.2 \$/ $\text{м}^3$ аккумулярованного объема
19 92г. Округ Принс-Джордж, Мэриленд, США	Биоретенционные котлованы	*** 0.1-0.5	*** 0.05-0.3	** 0.03-0.2	54-323
1978 г. город Арката, Калифорния, США.	Искусственные болота	*** 0.1-1	*** 0.05-0.5	*** 0.03-0.3	18.2
1975 г. Штутгарт, Германия.	Зеленые кровли	** 0.05-0.3	* 0.03-0.2	* 0.02-0.1	4.5-112
1972 г. Олимпия, Вашингтон, США.	Проницаемые покрытия	*** 0.1-0.5	** 0.05-0.3	*** 0.03-0.2	107-323
В конце 20-го века, США	Фильтрующие системы	* 0.1-0.5	*** 0.05-0.3	*** 0.03-0.2	50-200
В 1970-х и 1980-х годах, США	Траншеи/бассейны для инфильтрации	** 0.1-0.5	** 0.05-0.3	** 0.03-0.2	75 12.4-18.6 \$/ $\text{м}^3$ хранимого объема
В 1970-х и 1980-х годах, США	Борозды	** 0.1-0.5	** 0.05-0.3	** 0.03-0.2	15.5
В 1960-х и 1970-х годах, США	Стоковые водоемы	*** 0.1-0.5	*** 0.05-0.3	** 0.03-0.2	6.5-13.8
В 1970-х и 1980-х годах, США	Медиа-фильтры	*** 0.1-0.5	*** 0.05-0.3	*** 0.03-0.2	148.8 124-173.6 \$/ $\text{м}^3$ хранимого объема

Таблица 3.3 – Производительность очистных сооружений в зависимости от концентрации загрязнений ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ )/сут для подземных водозаборов

Год внедрения	Типы очистных сооружений подземных водозаборов		Производительность в зависимости от концентрации загрязнений $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{сут}$			Стоимость воспроизводства одного кубометра, $\$/\text{м}^3$
			Низкое загрязнение $e < 10 \text{ мг/л}$	Умеренное загрязнение (10-100) $\text{мг/л}$	Высокое загрязнение $> 100 \text{ мг/л}$	
1910 г. Марсель, Франция	ОбеззараживаниеУФ		$>100$	60 - 100	40 - 80	0.02 - 5
1872 г. Покипси, Нью-Йорк, США	Фильтрация	Быстрые песочные фильтры	120-480 Скорость фильтрации (5-20) $\text{м/ч}$			0.03 – 0.16
1804 г. Пейсли, Шотландия		Медленные песочные фильтры	$< 24$ Скорость фильтрации $< 1 \text{ м/ч}$			
1899 г. Англия		Напорные фильтры	До 1320 Скорость фильтрации до 55 $\text{м/ч}$			
1961 г. Кумамото, Япония	Мембранная фильтрация		50 - 150	40 - 120	30 - 100	0.11 – 4.8
1906 г. Цюрих, Швейцария	Адсорбция		100 - 150	80 - 120	60 - 100	$> 5$
1929 г. Шебойган, Висконсин, США	Ионный обмен и неорганическая адсорбция		10 - 20	5 – 15	2 - 10	0.4 - 2
1940 г. Лейк-Сити, Миннесота, США	Биологическая очистка		50 - 150	30 - 100	20 - 80	0.12 – 0.91
1897 г. Нью-Джерси, США	Химическая обработка		50 - 150	30 - 100	20 - 80	0.05 - 0.63
<b>Стоимость очистки в зависимости от степени загрязнения <math>\\$/\text{м}^3</math></b>			<b>0.1</b>	<b>1</b>	<b>2.5</b>	-

### **Выводы по главе 3**

Выполненные исследования показывают, что на современном этапе водопользования, в условиях нарастающего дефицита качественных водных ресурсов, использование альтернативных источников водоснабжения становится неизбежным. С другой стороны, доля «участия» альтернативных источников в каждом случае нуждается в обосновании. Причем обоснование связано не только с финансовой реализацией, но и с экологическими последствиями. Поскольку экологические особенности у каждого объекта индивидуальны, последствия также следует воспринимать с учетом масштаба конкретной водохозяйственной системы.

В главе рассмотрены применяемые в настоящее время альтернативные источники водоснабжения: использование местных ресурсов водосборов, повторное использование сточных вод, использование дренажных вод, опреснение соленых морских вод, проанализированы технологии их применения, целесообразность и экономическая эффективность, перспективы использования.

В районах с ограниченными водными ресурсами существует ряд других перспективных способов получения воды из альтернативных источников, вплоть до сбора и хранения дождевой воды и использования противотуманных сетей, позволяющих улавливать воду из воздуха. Постоянно разрабатываются новые технологии очистки и повторного использования воды. Успешная реализация этих подходов требует сочетания технических знаний, финансовых ресурсов и участия общественности.

Альтернативные источники водоснабжения приобретают все большее значение в решении проблем дефицита качественных водных ресурсов. Хотя традиционные источники воды по-прежнему доминируют в экономике стран, важна научная поддержка внедрения новых подходов в области альтернативного водоснабжения. Таким образом, мы можем обеспечить каждому доступ к чистой и безопасной воде, которая имеет решающее значение для благополучия как людей, так и планеты.

## **ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ГАРАНТИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Анализ водообеспеченности бассейнов, подбассейнов и отдельных водохозяйственных участков выполняется в соответствии со установленной схемой водохозяйственного районирования. Основы российской методики, как уже отмечено ранее, заложены во второй половине XX века, ведущими учеными СССР в области инженерной гидрологии, водохозяйственных и водно-энергетических расчетов. На этих основах развивалась водохозяйственная отрасль, развивались методы имитационного и стохастического моделирования. В настоящей главе рассматриваются методы оценки гарантированных водных ресурсов на основе обобщенных параметров стока и водопотребления, а также на основе многолетних гидрологических рядов. Рассматриваются случаи независимого и компенсированного сезонного и многолетнего регулирования стока. Анализируются критерии удовлетворения требований водопользователей и предлагается наиболее универсальная система критериев на основе метода «трех групп» [77, 129].

### **4.1. Водохозяйственные и водно-энергетические расчеты и балансы как основа анализа гарантированных водных ресурсов**

Центральное место в управлении водными ресурсами занимает концепция определения гарантированных ресурсов. Термин «гарантированные ресурсы» обычно относится к природным водным ресурсам, доступным в пределах водораздела или речного бассейна, которые не подвергаются значительным антропогенным изменениям. Одновременно это объем воды, доступный для распределения, к которым можно надежно получить доступ и использовать ресурсы в течение определенных периодов времени с учетом различных факторов, таких как гидрологическая изменчивость, нормативные ограничения и конкурирующий спрос. Возможны разные толкования понятия, однако в отечественной инженер-

ной практике РФ, ориентированной на вполне конкретные характеристики, «гарантированные» водные ресурсы подразумевают обеспеченные для потребителей объемы воды в расчетные маловодные годы с учетом многолетней изменчивости и закономерностей чередования маловодных и многоводных циклов.

Гидролого-водохозяйственный потенциал оценивается в рамках теории и практики водохозяйственных (включая водно-энергетические) расчетов (ВХР) [3, 7, 23, 77, 86, 89]. Иллюстрацией ВХР и ВЭР являются водохозяйственные балансы (ВХБ). Представление водохозяйственных балансов важный элемент водохозяйственного обоснования принимаемых решений относительно режима и параметров водохозяйственных систем и входящих в эти системы водохранилищ. Балансовый метод один из основных методов водохозяйственных расчетов, дающий оценку водообеспеченности в различных по водности условиях с учетом существующего или планируемого комплекса водохозяйственных и водоохраных мероприятий.

Основой для принятия решений являются главным образом перспективные водохозяйственные балансы, которые отражают не только разнообразие участников водохозяйственного комплекса, но и реализуемые водохозяйственные и водоохраные мероприятия. Существует разные версии представления водохозяйственных балансов в зависимости от их разновидности (постворные или транзитные; в створах гидроузлов; на водохозяйственных участках). Наиболее общую форму баланса водохозяйственного участка для принятого расчетного интервала времени можно представить в виде уравнения для оценки результата сопоставления ресурсов и требований водопользователей. Если результат баланса неотрицательный ( $Wb \geq 0$ ), то дефицит  $D=0$ , а резерв водных ресурсов  $Res = Wb$  и наоборот, при отрицательном балансе  $Wb < 0$  резерв  $Res=0$ , а дефицит  $D= - Wb$ . Ресурсную часть баланса формируют главным образом приток к входному створу водохозяйственного участка  $F_p$  (river flow) и боковая приточность на водохозяйственном участке  $LF_{in}$  (lateral inflow). Подземный водозабор  $W_{in-gw}$  (underground water intake) увеличивает ресурсы, но может сокращать расчетный приток по-

верхностных вод на величину ущерба речному стоку вследствие подземного водозабора  $L_{rf}$  (flow losses due to underground water intake). Следует отметить, что в расчетах водохозяйственного баланса в современных условиях должно учитываться антропогенное изменение речного стока  $\Delta F_{pa}$  (anthropogenic change in river flow), влияние которого и методы оценки рассмотрены в работах [22, 45, 54]. Приходная часть баланса может быть увеличена посредством дотации из внешних водных бассейнов или локальных внутрибассейновых перебросок, а также за счет альтернативных водоисточников  $\Delta Dot_{ext}$  (transfer from external sources, including subsidies from alternative sources of water supply). Расходная часть баланса содержит отраслевое водопотребление  $\sum_1^k Wr_i$  (total water requirements) и комплексные попуски  $Cr$  (comprehensive release) с учетом санитарно-экологических требований. Регулирование стока выражается в уравнении сработкой, либо аккумуляцией воды в водохранилище  $\Delta V$  (regulation of water volumes in reservoirs). Другие обозначения приведены под обобщенным уравнением водохозяйственного баланса (4.1). Размерность величин, входящих в уравнение в зависимости от решаемой задачи, может быть разной, либо кубометры ( $m^3$ , тыс.  $m^3$ , млн.  $m^3$ ), если оцениваются объемы воды, или  $m^3/c$ , если баланс ведется по величине расходов воды. Обозначения других элементов баланса приведены ниже уравнения.

$$Wb = F_p + LF_{in} + W_{in-gw} \pm \Delta F_{pa} \pm \Delta Dot_{ext} + \sum_1^k R w_i - \sum_1^k W r_i - Cr - L_{rf} \pm \Delta V - L_{sum} \quad (4.1)$$

где:  $\sum_1^k R w_i$  - total return waters – суммарные возвратные воды потребителей, суммированные по числу отраслей  $k$  ( $i=1, k$ );

$L_{sum} = L_{ev+ice+seep}$  (total losses from reservoirs) – суммарные потери из водохранилища, которые складываются из потерь на дополнительное испарение  $L_{ev}$ , льдообразование  $L_{ice}$  и фильтрацию  $L_{seep}$  через тело плотины, ложе и береговые примыкания.

Дефицит, определенный водохозяйственным балансом, складывается из отраслевого дефицита и дефицита санитарно-экологического попуска. Без разделения дефицита между отраслевым водопотреблением и специальными попусками, включая санитарно-экологический, нельзя определить величину транзитного стока. Разделение должно быть обусловлено диспетчерским графиком правил использования водных ресурсов водохранилища (ПИВР). Водохозяйственные ба-

лансы включают не менее трех характеристик – дефицит, резерв и транзитный сток, которые обычно не прописываются в уравнении водохозяйственного баланса. Общий дефицит складывается из отраслевого дефицита водопотребления и дефицита комплексного попуска:

$$D = D_{ind} + D_{cr} \quad (4.2)$$

где:  $D$  – суммарный дефицит;

$D_{ind}$  – дефицит водопотребления;

$D_{cr}$  – дефицит попуска.

Если вододеление выполнено, то транзитный сток  $F_{tr}$  определяется уравнениями (4.3, 4.4).

$$F_{tr} = Cr + Res \text{ при отсутствии дефицита} \quad (4.3)$$

$$F_{tr} = Cr - D_{cr} \text{ при наличии дефицита} \quad (4.4)$$

где:  $Cr$  – комплексные попуски;

$Res$  – резерв водохозяйственного баланса, то есть превышение приходной части баланса над расходной.

Иллюстрацией к ВХБ участка может служить рисунок (4.1).

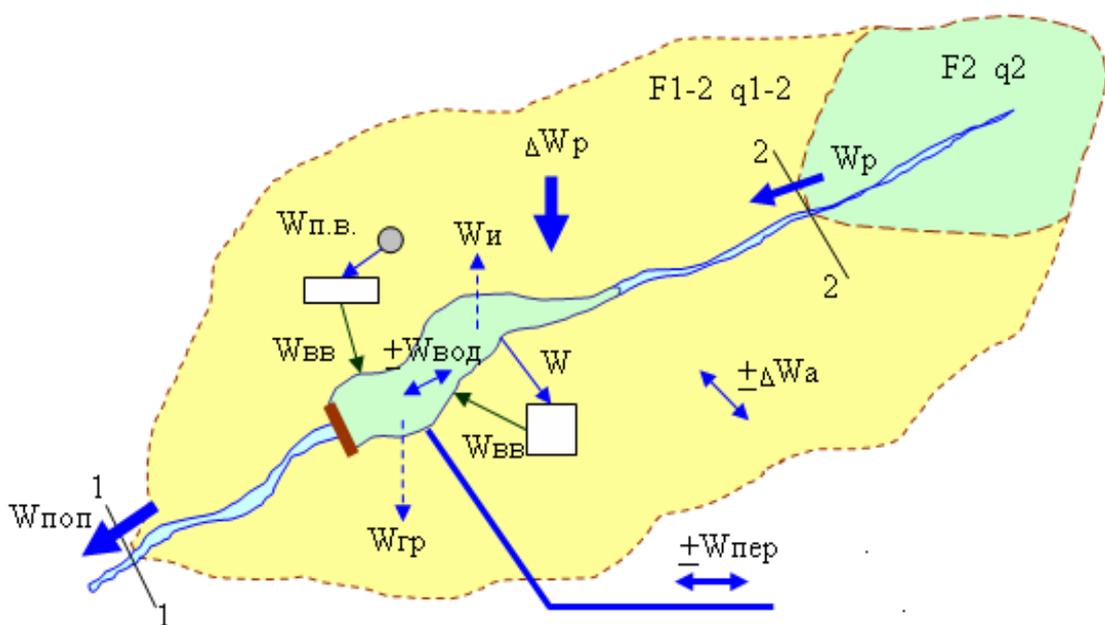


Рисунок 4.1 – Линейная схема баланса водохозяйственного участка

Приведенные уравнения не учитывают фактор времени для определения ресурсов нижерасположенного водохозяйственного участка. При значительных расстояниях существенное влияние оказывают русловое и пойменное регулирование, поэтому водные ресурсы участка в этом случае рассчитываются с учетом русловой трансформации стока и фактора времени по специальной методике (МПР РФ от 30.11.2007 № 314). Модель руслового водного баланса может быть стационарной и нестационарной. Стационарная модель, соответствующая вышеизложенному алгоритму, не учитывает русловое и береговое регулирование стока [17]. Нестационарная модель названные факторы учитывает. Необходимость применения нестационарной модели диктуется значением времени «добегания» расходов воды ( $\tau$ ), т.е. интервалом времени между характерными фазами гидрографа во входящем и замыкающем створах расчетного водохозяйственного участка (ВХУ) [67]. Если  $\tau$  в пределах ВХУ превышает 10% от продолжительности расчетного интервала баланса, рекомендуется использование нестационарной модели. В остальных случаях применяется стационарная модель руслового водного баланса.

В современных условиях гидроэнергетика – один из важнейших компонентов водохозяйственных комплексов. На гидроэнергетику приходится основную долю затрат по строительству гидротехнических сооружений. Полезный объем водохранилищ действующих гидроэлектростанций составляет 95% общего полезного объема всех водохранилищ. Доминантой обоснования ГЭС являются водно-энергетические расчеты, которые формально составляют часть водохозяйственных.

Цель водно-энергетических расчетов это обоснование энерго-экономических параметров и целесообразности гидроэлектростанций, как независимых, так и работающих в каскадном режиме энергетических систем. Главными результатами являются гарантированная и установленная мощность, размещение ГЭС или ГАЭС в графике нагрузки энергосистемы. Установленная мощность ( $N_{уст}$ ) складывается из гарантированной и резервной.

$$N_{уст} = N_{гар} + N_{рез} \quad (4.5)$$

При этом резерв мощности предназначен для компенсации дефицитов энергоснабжения, связанных со случайно возникающими пиками нагрузки (нагрузочный резерв), авариями и ремонтом оборудования (аварийно-ремонтный резерв), непредвиденным вводом дополнительных потребителей энергетической мощности (хозяйственный резерв). Современные энергетические комплексы могут включать в себя электростанции разного вида – ТЭС, ГЭС, АЭС, альтернативные источники энергии. Максимальная установленная мощность энергосистемы складывается из суммарных мощностей разных электростанций

$$N_{уст} = N_{уст}^{ТЭС} + N_{уст}^{ГЭС} + N_{уст}^{АЭС} \quad (4.6)$$

Результаты водно-энергетических расчетов определяют конструкцию и габариты здания ГЭС в соответствии с принятой компоновкой гидроузла, реализующей концепцию основного водохозяйственно-энергетического плана. Устанавливаются характерные отметки гидроузла – НПУ, УНПС (отметка нормальной предполоводной сработки), ФПУ, УМО. Отметки в свою очередь определяют величину расчетных напоров ГЭС, тип и размеры гидротехнических сооружений, полезный и мертвый объем водохранилища, размеры подтапливаемых и затопливаемых земель. Окончательным результатам предшествует водохозяйственный анализ, имеющий целью формирование водохозяйственного комплекса и распределение водных ресурсов между водопользователями, обоснование режима регулирования стока. Таким образом можно сформулировать последовательные задачи ВЭР:

- обоснование места ГЭС в графике нагрузки энергосистемы;
- обоснование режима регулирования мощности ГЭС;
- определение призмы сработки (диапазон изменения уровней воды в водохранилище, между которыми находится полезная емкость) и отметки мертвого объема водохранилища;
- определение гарантированной и установленной мощности гидроэлектростанций или каскада ГЭС;
- построение диспетчерских графиков работы водохранилища с учетом энергоотдачи;

- подбор гидросилового оборудования по результатам ВЭР, в том числе номенклатура и количество гидроагрегатов, габариты и компоновка зданий гидроэлектростанций;
- определение технико-экономических показателей энергетической составляющей водохозяйственного комплекса.

### **Исходные данные и последовательность водно-энергетических расчетов**

Последовательность расчетов регулирования стока при проектировании режима работы ГЭС определяется назначением гидроузла (энергетическое, ирригационно-энергетическое, комплексное), требованиями водопотребителей, наличием уже существующих ГЭС на реке, местными условиями и т.п. Формируется комплексная исходная информация.

1. Сведения о речном стоке в створе проектируемой ГЭС (гидрографы стока за период фактических наблюдений, параметры годового стока и его внутригодовое распределение, максимальный и минимальные расходы, характеристики зимнего режима, данные о твердом стоке, химическом составе и качестве воды). Полнота перечисленных гидрологических данных связана с режимом регулирования стока, состава и объема водохозяйственной и энергетической нагрузки, а также стадийностью проектирования.

2. Материалы топографических изысканий для составления плана местности в горизонталях, а также продольных и поперечных профилей. Эти материалы должны охватывать район, на который распространяется влияние проектируемого гидроузла. Эти же материалы служат для выбора створа ГЭС, проектных отметок уровней верхнего бьефа, определения размеров подтапливаемых и затапливаемых земель и угодий.

3. Материалы геологических и гидрогеологических изысканий, дающие полное представление о характере и свойствах грунтов в районе строительства и особенно в створах будущих сооружений ГЭС. Данные необходимы для правильного выбора типа и конструкции сооружений, обеспечения их прочности и устойчивости, мероприятий для сокращения потерь на фильтрацию воды через основа-

ние плотины, ложе и береговые примыкания, регулирования уровня грунтовых вод для контроля подтопления земель.

Методика ВХР и ВЭР хотя и описана в специальной литературе. В практическом плане, в особенности на уровне имитационно-оптимизационного обоснования проектных решений, требуются достаточно серьезные исследования.

Обе методики должны быть органично объединены. Однако в реальности их объединить не так просто осуществить. Водохозяйственные расчеты в чистом виде направлены либо на получение режима и параметров водохранилищ при фиксированной информации о водопотреблении, либо при имеющихся параметрах сооружений требуется найти максимальный объем гарантированной воды потребителей. Если же говорить о гидроэнергетике, то количество воды определяет объем выработки электроэнергии, а мощность определяется произведением напора на расход. Поэтому объединить оба вида водопотребления по объему используемой воды нельзя. Необходимо формировать универсальную систему критериев удовлетворения требований, и (или) использовать многокритериальную оптимизацию, несущую неизбежную субъективность при свертке критериев.

#### **4.2. Особенности расчета отдачи водохранилищ на основе обобщенных параметров стока и водопотребления**

В регионах с регулируемым режимом стока, например, в тех, которые управляются для производства гидроэлектроэнергии или орошения, точная оценка гарантированной водоотдачи воды имеет важное значение для оптимизации стратегий распределения и управления водой. В данном контексте различаются прямая и обратная задачи. Прямая задача сводится к определению объема водохранилища и режима его работы по заданной величине отдачи, которая включает полезное водопотребление, целевые попуски и различные потери. Обратная задача предполагает исходя по имеющейся информации о параметрах и режиме регулирования стока оценить достигаемую проектную водоотдачу [8]. Наиболее логичным и последовательным методическим подходом является двухэтапный ал-

горитм, с предварительной экспертной оценкой с отдельным определением сезонной и многолетней составляющих объема водохранилища [58, 59] и анализом зависимости «емкость водохранилища-гарантированная отдача» [23]. В соответствии с современными возможностями, окончательный расчет корректно выполнять только на основе имитационного моделирования. Следует отметить неоднозначность расчета, являющегося по сути научным исследованием, поскольку результат зависит от многих факторов со своими методическими нюансами и проблематикой. Теоретическая база расчета многолетнего регулирования, связанная с именами С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, основывается на стохастической модели годового стока. Существует не менее 5 моделей, различных модификаций простой цепи Маркова, что естественно вызывает некоторую разницу в результатах [85]. Поэтому на втором этапе должно использоваться имитационное моделирование с использованием многолетних гидрологических рядов. При этом ретроспективные естественные (или восстановленные) ряды, репрезентативные и однородные являются основой для имитационного моделирования.

И так, методика С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля для расчета объема водохранилищ многолетнего регулирования стока обобщенным методом заключается в отдельном определении сезонной ( $V_{сез}$ ) и многолетней ( $V_{мн}$ ) составляющих емкости. Формализация подхода которые устанавливаются на основании статистических параметров годового стока, объема суммарной гарантированной отдачи брутто за год  $A$  с учетом потерь  $L$  на дополнительное испарение, фильтрацию и ледообразование. Критериальным параметром расчета является обеспеченность гарантированной отдачи  $P$ . В формализованном виде в относительных величинах методика описывается следующими уравнениями:

$$A = \alpha * \bar{S} ; V = V_{мн} + V_{сез} \rightarrow V = \beta * \bar{S} = (\beta_{мн} + \beta_{сез}) * \bar{S} \quad (4.7)$$

где:  $\alpha$  – относительная отдача водохранилища;  $\beta$  – коэффициент емкости водохранилища

Методически задача решена несколько десятилетий назад. В классической методике многолетняя составляющая определяется по номограммам, разрешаю-

щим уравнение (4.6) при коэффициенте автокорреляции  $k_a = 0,3$ .

$$\beta_{mn} = f(A/\bar{S}, C_v, C_s/C_v, k_a, P) \quad (4.8)$$

Наиболее широко известны номограммы И.В. Гуглия (рисунок 4.2), последняя редакция которых приводится в работе [7]. Как отличаются результаты разных авторов - это зависит от принятой стохастической модели годового стока. Принимая тип модели – авторегрессию первого порядка между обеспеченностями стока смежных лет используются таблицы Ратковича Д.Я. [86]. Поскольку в данной постановке используется только один критерий, обеспеченность должна быть рассчитана с учетом многоцелевого водопользования (приведенная обеспеченность)

$$P_{пр} = \frac{\sum_1^n A_i \cdot P_i}{\sum_1^n A_i} \quad (4.9)$$

Здесь  $A_i$  – отдача  $i$  - го водопользователя;  $P_i$  - обеспеченность удовлетворения требований  $i$  – го водопользователя;  $P_{пр}$  – интегральная средневзвешенная характеристика покрытия водопотребления.

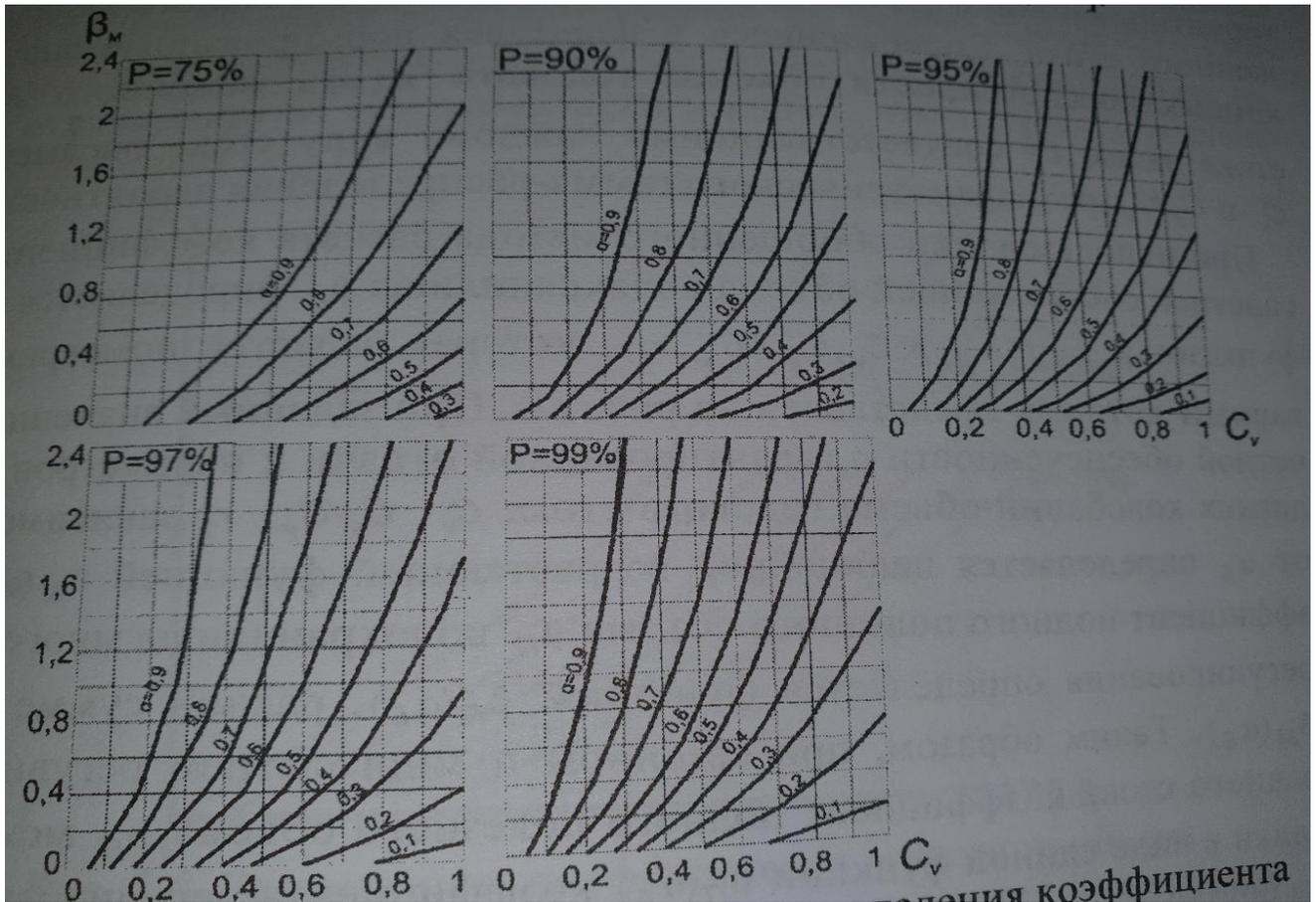


Рисунок 4.2 – Номограммы Гуглия

Для оценки сезонной емкости применяются упрощенные и более сложные формулы. В практике водохозяйственных расчетов распространена формула С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. При многолетнем регулировании максимальный (теоретический) объем требований к стоку не должен превышать среднемноголетнего стока реки  $F_{cp}$  ( $\alpha = 1$ ). Разумеется может быть и более высокая величина запроса, но с обеспеченностью (вероятностью покрытия) меньше 50 %.

Минимальная отдача равна стоку  $F_p$  расчетной обеспеченности  $P$  – это годовичное регулирование, предельный случай сезонного регулирования стока. Сезонная емкость определяется по разнице отдачи межени  $A_m$  и стока межени  $F_m$ , причем в первом случае сток увеличивается за счет многолетней сработки, а во втором приток к водохранилищу соответствует расчетной обеспеченности. В итоге путем формальной линейной интерполяции и делением членов уравнения на среднемноголетний сток выводится окончательное выражение:

$$V_{\text{сез}} = A_M - \bar{F}_M + \frac{\bar{F}_M - F_{\text{мп}}}{\bar{F} - F_p} \cdot (\bar{F} - A) \quad (4.10)$$

$$\beta_{\text{сез}} = \alpha \cdot d_{\text{АМ}} - d_{\text{СМ}} + d_{\text{СМ}} \cdot \frac{1 - K_{\text{мп}}}{1 - K_p} \cdot (1 - \alpha) \quad (4.11)$$

где  $d_{\text{АМ}} = A_M / A$  – доля отдачи межени в объеме годовой отдачи;

$d_{\text{СМ}} = \frac{\bar{F}_M}{\bar{F}}$  – отношение стока средней межени к среднему стоку;

$K_{\text{мп}} = \frac{F_{\text{мп}}}{\bar{F}_M}$  – отношение стока межени расчетной обеспеченности к сред-

нему стоку межени;

$K_p = \frac{F_p}{F}$  – отношение годового стока расчетной обеспеченности к норме годового стока (при известном распределении – модульный коэффициент при обеспеченности  $P$ ).

В большинстве случаев расчеты выполняются по многолетним гидрологическим рядам. Ретроспективные ряды наблюдений за стоком, принимаемые за прототип будущего режима, чтобы быть достаточно репрезентативными, должны, как минимум, отвечать условиям точности по длине рядов, исходя из значений статистических параметров, среднего и коэффициента вариации.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{ср}} &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+k_a}{1-k_a}} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ср}} \cdot C_v}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+k_a}{1-k_a}} \quad \rightarrow \\ 0,05 &= \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+k_a}{1-k_a}} \quad \rightarrow \quad \sqrt{n} \geq 20 \cdot C_v \cdot \sqrt{\frac{1+k_a}{1-k_a}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

То есть для среднестатистических значений коэффициентов вариации и автокорреляции  $C_v = 0,3$  и  $k_a = 0,3$  продолжительность рядов  $n$  должна быть не менее 67 лет. Увеличение коэффициента вариации до 0,4 увеличивает требуемую длину ряда до 119 лет. Этот факт иллюстрирует влияние многолетней естественной изменчивости стока на водохозяйственную эффективность регулирования стока. Для примера, оценим эффект влияния, используя номограммы Гуглия. Пусть норма стока реки в расчетном створе равна единице и  $C_v = 0,3$  и 0,4. Принимая приведенную обеспеченность удовлетворения требований  $P = 90\%$  (обычно

соответствует запросу по мощности), строим кривую зависимости «гарантированная отдача - многолетняя емкость водохранилища» (рис. 4.3). Расчетные координаты зависимости приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Координаты зависимости «емкость-отдача»

$\alpha$	$\beta_{-C_v=0,3}$	$\beta_{-C_v=0,4}$
0,50	0,00	0,00
0,60	0,00	0,15
0,70	0,06	0,37
0,75	0,15	0,50
0,80	0,30	0,65
0,85	0,55	1,00
0,90	0,80	1,50

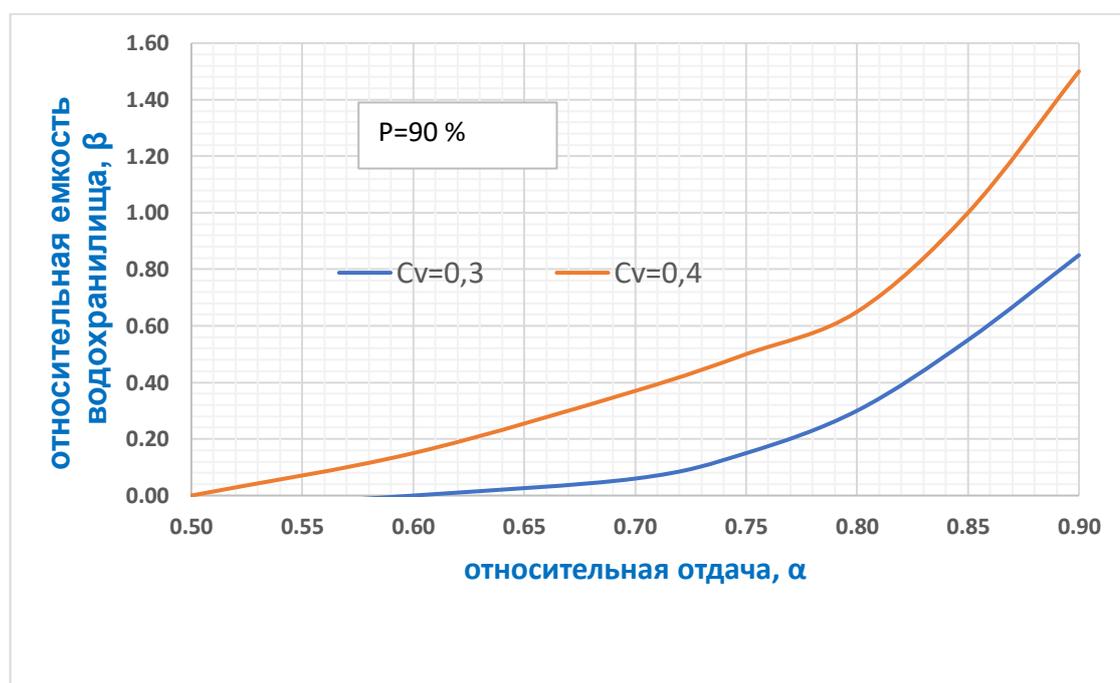


Рисунок 4.3 – Сравнительные кривые емкости водохранилища при разных значениях  $C_v$ .

Как видно из графика требуемые емкости при значении отдачи 0,8-0,9 (характерный диапазон для многолетнего регулирования) могут различаться в два и более раз. Другой параметр, который очень сильно влияет на результаты, это

обеспеченность, главный критерий проектирования. Проведем аналогичный эксперимент в диапазоне обеспеченностей от 75% до 95% (табл. 4.2, рис. 4.4). Как можно видеть, переход от одной обеспеченности к более высокой, вызывает очень значительное увеличение объема водохранилища.

Таблица 4.2 – Зависимость «емкость – отдача» при разной обеспеченности

$\alpha$	$P=75\%$	$P=90\%$	$P=95\%$
0,50	0,00	0,00	0,05
0,60	0,00	0,15	0,25
0,70	0,00	0,37	0,50
0,75	0,08	0,50	0,70
0,80	0,20	0,65	1,00
0,85	0,35	1,00	1,70
0,90	0,65	1,50	2,40

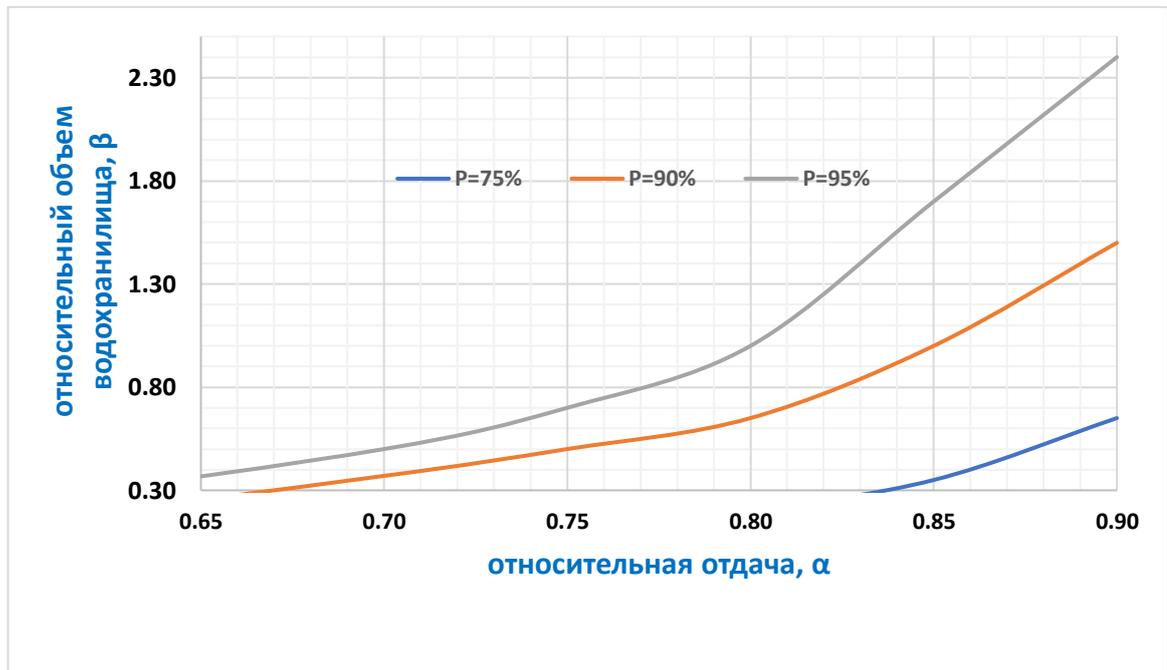


Рисунок 4.4 – Совмещенные кривые анализирующей зависимости при разной обеспеченности

Разница значений емкости при изменении обеспеченности очень большая и в отличие от коэффициента вариации, этот показатель определяется неоднозначно. Вопрос критериев удовлетворения требований имеет очень большое значение,

эта тема исследуется в работах [17, 77, 129]. В разделе 4.3 рассматривается вопрос о принятии объективной и обоснованной системы критериев.

#### **4.3. Метод «трех групп» в качестве универсальной системы критериев покрытия водопотребления**

Распределение воды является важнейшим аспектом управления водными ресурсами, особенно в регионах, испытывающих дефицит или конкурирующие потребности. Эффективные стратегии распределения воды необходимы для обеспечения справедливого распределения и удовлетворения разнообразных потребностей водопользователей. Корректная система критериев классифицирует водопользователей по приоритетным уровням в зависимости от их важности для общества, обеспечивая структурированный подход к решению задачи распределения располагаемых водных ресурсов. Используемая в РФ проектная практика опирается на расчетную обеспеченность и глубину перебоев в остро-маловодные годы. В имитационных моделях, используемых разными авторами [17, 77, 129], присутствует такое понятие как гарантия удовлетворения нормативных запросов, формальная фиксация суммы дефицитов, обеспеченность попуском, многокритериальная оптимизация и т.д.. Есть работы, связанные с обоснованием значения обеспеченности [17, 18, 90]. Однако стройной системы критериев формально нигде не прописано. Разнообеспеченные водопотребители, характерные для российской проектной практики, наиболее наглядно представлены в бассейне реки Дон в зоне влияния Цимлянского водохранилища, образованного одноименным гидроузлом (рис. 4.5). Как можно видеть на генплане гидроузла водохранилище решает глобальные задачи региона для целого комплекса потребителей.

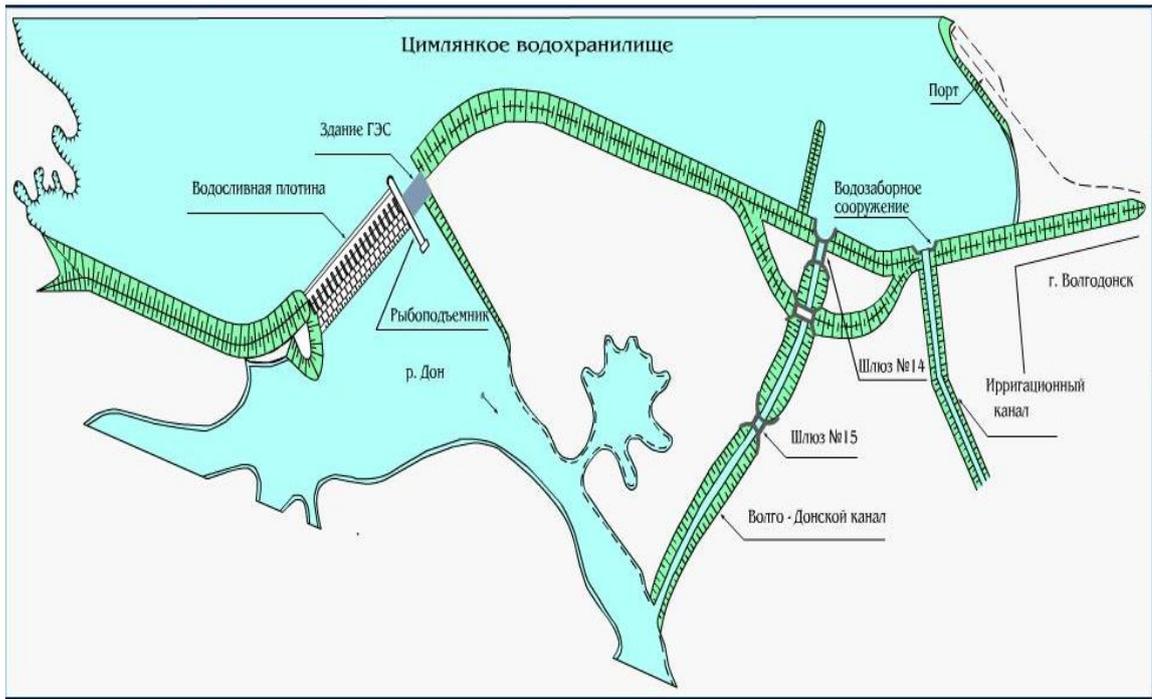


Рисунок 4.5 – Генплан Цимлянского гидроузла

Регулирование стока осуществляется для множества целей, особенности которых изложены ниже. Прежде всего хозяйственно питьевое водоснабжение для более, чем для 3 миллионов людей, орошение около 200 тысяч га земли, транспортное судоходство, рыбохозяйственные попуски большого объема. Таким образом, имеем:

- отраслевое водопотребление, водоподача в Волго-Донской канал (ВДСК), обводнение рек Сал и Маныч. Здесь самостоятельная проблема, когда эколого-водохозяйственная система бассейна реки Маныч подпитывается еще из Кубани в условиях многолетнего маловодья Дона;
- многочисленные пруды и малые водохранилища в бассейне, осложняющие водохозяйственный баланс, учитываются специальной опытной поправкой;
- режим многолетнего компенсированного регулирования стока в ЦГУ по отношению к створу «Раздорское» (устьевая часть) для обеспечения навигационных попусков в нижнем течении Дона. Параллельно делается попытка сниже-

ния навигационных попусков за счет создания низконапорных гидроузлов на нижнем Дону;

- необходимость поддержания высоких комплексных попусков (РБХ, транспортно-энергетических) разного объема и режима на основе прогноза половодья.

Укомплектованные попуски в створе гидроузла имеют форму ступенчатых гидрографов (Раткович Л.Д, 2021). Пять слоев попусков имеют обеспеченности от 35 % до минимального 95 % обеспеченности (рис. 4.6).

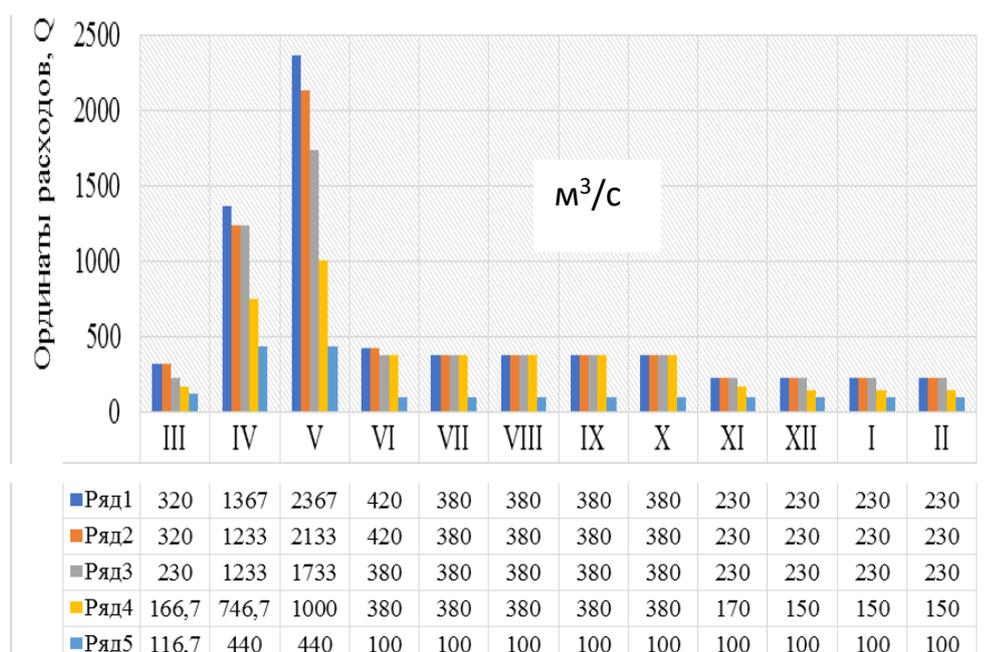


Рисунок 4.6 – Гидрографы попусков из Цимлянского водохранилища разной обеспеченности

Пример ЦГУ интересен множеством участников водохозяйственного комплекса масштабами водных потоков, измеряемых десятками кубокилометров. Стоит вопрос комплектации требований и приведения их к эквивалентной модели. Аналогичный вопрос стоит и для малого по масштабам объекта в бассейне реки Кариотис в республике Кипр. Эта маленькая река, длиной всего 27 км и объемом стока 18 млн. м<sup>3</sup>/год также несет на себе бремя комплексного водопотребле-

ния, причем в условиях многолетнего компенсированного регулирования. Схема проектируемой водохозяйственной системы показана на рисунке 4.7.

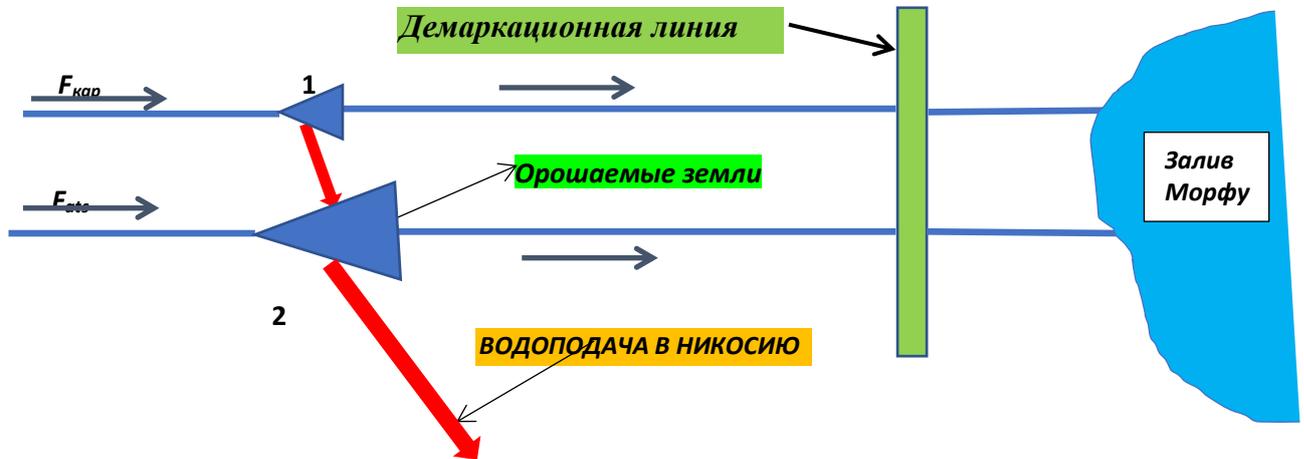


Рисунок 4.7 – Линейная балансовая схема ВХС «Кариотис»

1- водозаборный гидроузел на Кариотисе

2- водохранилище Аюс – Теодорос многолетнего регулирования

Проект водохозяйственной системы выполнялся группой советских специалистов в 90 – е годы прошлого столетия. В настоящее время река более известна как Клариос. В качестве критериев была принята английская система, оперирующая не обеспеченностями, а диапазонами значений, попадающих в зону ограничений. Для каждой из культур (зерновые, овощи, цитрусовые, ...), представляющих собой часть потребителей, закладывались критерии по максимальному снижению и по критерию «Reliability» - надежность – для всех потребителей, измеряемая количеством гарантированной воды в долях многолетней водоотдачи. Суть проекта заключалась в том, чтобы путем регулирования стока реки Кариотис гарантировать часть стока для подачи в столицу острова Никосию в 50 км от гидросистемы. Собственная топографическая емкость отсутствовала. Ее нашли у соседней реки Атсас, которая наоборот, практически не имела стока. Идея проекта заключалась в переброске стока Кариотиса туннелем в создаваемое водохранилище. При этом следовало обеспечить водой орошаемые земли в долине обеих рек. Как показали расчеты для реализации проекта с дотацией 6 млн.м<sup>3</sup> в Нико-

сию требовалось построить плотины на двух реках и создать водохранилище объемом 23 млн.м<sup>3</sup>. И эти цифры серьезно изменятся, если поменять систему или даже значения критериев удовлетворения требований. Объективная картина водохозяйственной эффективности проекта системы иллюстрируется графиками рисунка 4.8.

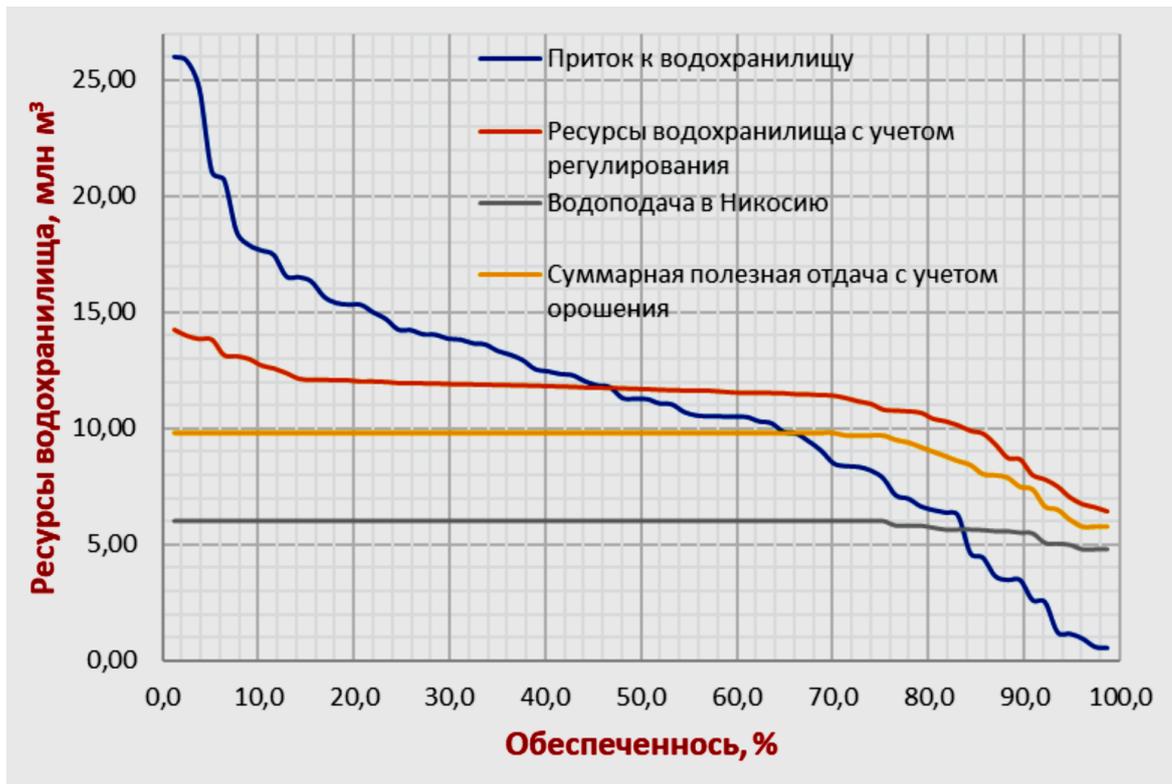


Рисунок 4.8 – Принятый на момент согласования вариант проектирования.

К сожалению, проект по политическим мотивам не был реализован. Это было связано с возможным нарушением экологического баланса в Турции за пределами демаркационной линии.

Как следует из вышеизложенного, фактор неоднозначности критериев является одинаково значимым для объектов с соотношением водных ресурсов 18млн.м<sup>3</sup> и 21млрд.м<sup>3</sup> с разным типом питания. По нашему представлению английская система критериев может быть принята за основу с дополнениями, присущими российской проектной практике. На примере ЦГУ и других объектов РФ очевидно, что весь набор водопользователей можно разделить на три группы по

значимости и приоритету. Дальнейшее деление только ухудшит надежность результата.

В первую группу  $P_1$  (приоритетные пользователи) входят пользователи, чьи потребности в воде считаются необходимыми для выживания человека и основных социальных функций. Приоритетными пользователями часто являются домохозяйства, поставщики питьевой воды, больницы и объекты основной инфраструктуры, приоритетные объекты промышленности и энергетики. Удовлетворение потребностей этой группы в воде имеет первостепенное значение и имеет приоритет перед другими пользователями.

Вторая группа  $P_2$  (промежуточные пользователи) состоит из пользователей, чьи потребности в воде важны для экономической деятельности и социального развития, но не так важны, как потребности в первой группе. Промежуточными пользователями могут быть сельское хозяйство (для производства продуктов питания), отдельные отрасли промышленности, коммерческие предприятия и места отдыха. Хотя их потребности в воде значительны, они не считаются такими же важными, как потребности первой группы.

В третью группу входят пользователи, чьи потребности в воде считаются менее важными для непосредственного благосостояния человека или экономического развития. Маргинальные пользователи могут включать такие виды деятельности, как ландшафтный дизайн, второстепенные промышленные процессы или некоммерческое рекреационное использование. Требования рыбного хозяйства, в том числе рыбохозяйственные нерестовые попуски, также могут быть отнесены к третьей группе.

Разделив водопользователей на эти три группы, управляющие водными ресурсами могут определить приоритетность распределения воды в периоды нехватки воды или конкуренции. Такой подход помогает гарантировать, что основные потребности будут удовлетворены в первую очередь, одновременно балансируя потребности различных секторов и сводя к минимуму конфликты по поводу использования воды. Однако важно отметить, что конкретные критерии классификации пользователей и приоритет, отдаваемый каждой группе, могут разли-

чаться в зависимости от местных правил, наличия воды и общественных ценностей.

Суммируя рассуждения, можно стоять системы критериев водопользования, основанные на принципах социальной безопасности, экономической и экологической эффективности. Метод ориентирован на концепцию комплексного управления водными ресурсами и принцип справедливого доступа к водным ресурсам. Математические формулировки могут отражать приоритеты и ограничения, связанные с каждой группой пользователей, облегчая количественный анализ и принятие решений.

В настоящее время благодаря развитию компьютерных технологий, появилась возможность объединять уравнения и ограничения вне зависимости от линейности или нелинейности анализируемых функций, а также переменные, имеющие стохастическую природу. Введение корректных функционалов оптимизации органически завершает постановку задачи. Ограничением по-прежнему является размерность задач. Но существуют возможности в рамках алгоритма «поиска решения» увеличения размерности до необходимых размеров, чтобы получить моделирующие алгоритмы для многолетних гидрологических рядов с числом внутригодовых интервалов от 12 до 18-20, то есть того масштаба, который является достаточным для надежного решения уравнений водохозяйственного баланса.

Математические модели могут формализовать метод «трех групп», позволяя проводить строгий анализ и оптимизацию решений по водораспределению. Тематические исследования демонстрируют практическое применение метода «трех групп» в различных контекстах. Присвоив числовые веса или уровни приоритета различным группам пользователей, лица, принимающие решения, могут эффективно распределять водные ресурсы с учетом таких факторов, как качество воды, инфраструктурные ограничения и предпочтения заинтересованных сторон.

Метод «трех групп» предлагает несколько преимуществ для управления водными ресурсами, включая повышение прозрачности, вовлечение заинтересованных сторон и защищенность в условиях крайнего маловодья. Включая соци-

ально-экономические критерии в решения о распределении, метод способствует социальной справедливости и экологической устойчивости. Однако такие проблемы, как ограничения данных, конфликты заинтересованных сторон и динамичные условия окружающей среды, требуют тщательного анализа. Метод обеспечивает строгую и систематическую основу для определения приоритетности решений о водораспределении на основе требований пользователей. Путем интеграции математического моделирования с принципами управления водными ресурсами этот подход дает представление об оптимальных стратегиях управления ресурсами. Продолжающиеся исследования и практическое применение необходимы для совершенствования методологии и решения возникающих проблем в управлении водными ресурсами.

Таким образом, предлагаемая универсальная система критериев с учетом отечественного и зарубежного опыта ориентируется на суммарное значение гарантированного ресурса за многолетие. В качестве такого показателя используется критерий надежности  $R$  (Reliability). В формуле (4.11), где  $A_{np}$  – суммарная проектная отдача водохранилища, показано, что величина  $R$  легко выражается через среднемноголетнее значение дефицита  $D_{cp}$ .

$$R = \frac{\sum_1^N (A_{np} - D_i)}{A_{np} \cdot N} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{D_{cp}}{A_{np}}\right) \cdot 100\% \quad (4.13)$$

В общем случае показатель  $R$  должен быть дифференцирован для каждого участника водохозяйственного комплекса. В такой постановке, наиболее корректным является нормирование обеспеченности не конкретной величины гарантированного ресурса, а нескольких диапазонов значений водоотдачи.

$P(D \leq D_{max}^i) = P_i$ , где  $P_i$  – вероятность того, что дефицит  $i$  – ой группы водопользователей не превысит максимального значения  $D_{max}$ . Параметр  $P_i$  устанавливается с учетом опыта проектирования гидротехнических и мелиоративных объектов. Как отмечено выше *трех групп* вполне достаточно для анализа обстановки по водообеспеченности.

#### **Выводы по главе 4**

Водохозяйственные и инженерно-гидрологические расчеты направлены на оценку водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала водных объектов, обоснование водного режима на объекте, определение параметров сооружений и водохранилища. Ни одна из названных позиций не может быть нормально выполнена без установления надежных критериев удовлетворения требований к водным ресурсам.

Разница в назначенных значениях критериев может давать результаты по оценке параметров отдачи и объема водохранилищ в 1,5-2,0 раза в зависимости от параметров притока, таких как коэффициенты вариации и автокорреляции.

В качестве относительно универсальной системы критериев предложен метод «трех групп», закрепляющей обеспеченность диапазона значения водоотдачи, а не конкретного значения. При этом в группу водопользователей включаются близкие по приоритету участники. Предложенный метод мы считаем наиболее обоснованным с точки зрения определения параметров водохозяйственной системы.

## **ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА С ОЦЕНКОЙ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА**

Имитационное моделирование широко используемый в настоящее время математический инструмент, позволяющий с помощью разных математических и программных средств воспроизводить функционирование некоей системы, в нашем случае водохозяйственной. Используемый набор средств называется имитационной моделью. Достаточно часто алгоритм имитационной модели включает в себя элементы оптимизации. Кроме того, возможно совмещение имитационных моделей с входящими в них стохастическими под моделями. В частности, моделью гидрологического ряда (рядов) стока, испарения или осадков. Моделирование процессов, формирующих элементы водного баланса в настоящее время не редкость. С другой стороны, применение искусственных рядов ЭВБ в проектной практике достаточно редкое явление. Как правило, используются ретроспективные гидрологические ряды, которые принимаются за прототип будущего гидрологического режима реки или системы водотоков.

### **5.1. Имитационное моделирование водохозяйственного баланса с оптимизацией гарантированной водоотдачи**

В диссертации ставится конкретная задача реализации разных балансовых форм и алгоритмов, свойственных тем или другим водохозяйственным объектам. При этом основное внимание уделяется совмещению критериальной части задачи с моделирующим алгоритмом поиска оптимального решения. Поскольку настоящие исследования носят в большей части методический характер, рассматривается вариант с одним водохранилищем для случаев независимого и компенсированного регулирования стока. Технология перехода к каскадам гидроузлов изложена в указанных работах [2, 7, 56, 59].

Инструментом водохозяйственного обоснования проектных решений в области водного хозяйства и гидротехнического строительства уже несколько деся-

тилетий являются комплексные водохозяйственные и водно-энергетические расчеты. С годами развивалась теория и методы выполнения таких расчетов, но целевая установка практически не изменилась. Полностью изменился подход к методике множественных гидролого-водохозяйственных задач, подлежащих решению в процессе проектного обоснования.

Состав и параметры сооружений должны не только обеспечивать намеченные показатели, обусловленные водохозяйственными планами, но и гарантировать оптимальную реализацию начального замысла. Подобный подход стал возможен благодаря активному применению всевозможных имитационных математических моделей, достоверно отражающих физическую сущность процессов наряду с элементами управления водохозяйственными системами, в частности водохранилищами. Применительно к системе с одним водохранилищем предлагается следующая система общего вида, сочетающая балансовые соотношения с элементами оптимизации. Балансовая составляющая системы, разумеется, предусматривает более детальное описание, касающееся отраслевых и комплексных попусков, потери на дополнительное испарение и ледообразование и специфические особенности, свойственные модели каждого конкретного объекта. Запись в системе (5.1) представлена в обобщенной форме моделирующего алгоритма. Система ориентирована на определение водохозяйственного потенциала в некотором створе. Выражение  $P_k(D \leq D_{max}^k) \geq P_{k,req}$  – означает вероятность того, что дефициты *k*-ой группы водопользователей не превысят заданных максимальных ограничений. Принципиальная разница в подходах традиционной методики заключается в том, что затребована обеспеченность не конкретной величины, а диапазона значений, что следует считать более корректным подходом.

Алгоритм реализован в среде Excel с использованием макросов, пакета «анализа» и процедуры поиска решения «solver», опирающейся на алгоритм обобщенного понижающего градиента (ОПГ) для гладких нелинейных задач.

$$\left\{ \begin{array}{l} Wb_{j,i} = F_{j,i} \pm \Delta V_{j,i} - Wr_j ; \\ V_{j,i} = V_{(j-1),i} + \Delta V_{j,i} ; \\ 0 < V_{j,i} < V_{max} ; \text{диапазон возможных значений наполнения} \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m \Delta V_{j,i} = 0 ; \text{сумма значений "сработка – наполнение" за многолетие} \\ P_k(D \leq D_{max}^k) \geq P_{k,req}, k = 1, 3 \\ R \geq R_{req} ; \\ \alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m A_{j,i}}{F_{cp}} \rightarrow \max - \text{функционал} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

$B_j$  – водохозяйственный баланс расчетного  $j$  – го интервала времени;

$V_j$  – наполнение условного водохранилища в  $j$ – ом;  $V_0, V_N$  – наполнение условного водохранилища на начало и конец многолетнего гидрологического ряда;  $P_{i,req}$  – расчетная обеспеченность  $i$ – ой группы водопользователей ;

$k$  – установленные группы водопользователей

$A$  – суммарная гарантированная водоотдача за год, включая санитарно-экологические требования;  $\alpha$  – относительная отдача в долях среднего стока;

$S_{cp}$  – среднемноголетний ресурс стока

В годовых объемах стока и водопотребления система реализованы в программном модуле «**Reachable water**», где решается задача отыскания 100 летней последовательности  $\Delta V_j$ , приводящей к искомому максимальному значению  $\alpha$ . Расчетный листинг выглядит следующим образом (рис. 5.1). Максимальная гарантированная водоотдача (водохозяйственный потенциал) оценена в 83 млн. м<sup>3</sup>. Для имитационного моделирования режим притока должен быть представлен многолетним гидрологическим рядом, который принимается за прототип будущего водного режима. Рассмотренный пример использует средние статистические параметры ( $S_{cp} = 100$ ;  $C_v = 0,4$ ), по которым смоделирован 100 летний гидрологический ряд годового стока. Техника моделирования стока в диссертации не рассматривается. Важно, чтобы длина ряда, обеспечивала его репрезентативность.

		MODEL "REACHABLE WATER", mcm (million cubic meters)																	
V	250.00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		Ne	P, % probability of exceeding natural flow volumes	P, the same in fractions of one		S, inflow to the reservoir	Filling of the reservoir at the beginning of the year	Flow regulation, +actuation -filling	Filling of the reservoir at the end of the year	Disposable resources, IP	Annual request, Req	Deficit	Deficit	Deficit years	Excess river flow	The rank values of the sequence of deficits	rank deficiency corresponding to the cell B11	rank deficiency corresponding to the cell B12	rank deficiency corresponding to the cell B10
		1	32.40	0.32		113.531	19.390	-20.258	39.648	93.273	83.46	0.000	0.000	0	9.809	47	0.000	0.000	0.000
Z - max α	83.46	2	96.34	0.96		41.185	39.648	12.401	27.247	53.586	83.46	29.878	29.878	1	0.000	3	0.000	0.000	0.000
d-1 max def for P1	8.35	3	86.61	0.87		58.037	27.247	12.401	14.847	70.437	83.46	13.027	13.027	1	0.000	11	0.000	0.000	0.000
d-2 max def for P2	41.73	4	74.59	0.75		71.357	14.847	10.015	4.832	81.371	83.46	2.093	2.093	1	0.000	34	0.000	0.000	0.000
d-3 max def for P3	58.42	5	69.18	0.69		76.623	4.832	4.832	0.000	81.455	83.46	2.009	2.009	1	0.000	35	0.000	0.000	0.000
probability P3, %	99.01	6	55.13	0.55		89.811	0.000	-5.339	5.339	84.471	83.46	0.000	0.000	0	1.007	47	0.000	0.000	0.000
probability P2, %	95.00	7	2.30	0.02		194.511	5.339	-5.339	10.678	189.172	83.46	0.000	0.000	0	105.708	47	0.000	0.000	0.000
probability P1, %	80.00	8	53.05	0.53		91.789	10.678	-5.339	16.018	86.450	83.46	0.000	0.000	0	2.986	47	0.000	0.000	0.000
reliability, R, %	95.00	9	51.93	0.52		92.854	16.018	-5.339	21.357	87.515	83.46	0.000	0.000	0	4.051	47	0.000	0.000	0.000
α -relative yield	0.83	10	68.25	0.68		77.500	21.357	-2.946	24.303	74.554	83.46	8.910	8.910	1	0.000	15	0.000	0.000	0.000
d-1 the relative scarcity	0.10	11	31.27	0.31		114.923	24.303	-5.339	29.642	109.584	83.46	0.000	0.000	0	26.120	47	0.000	0.000	0.000
d-2 the relative scarcity	0.50	12	3.51	0.04		183.299	29.642	-5.339	34.981	177.960	83.46	0.000	0.000	0	94.495	47	0.000	0.000	0.000
d-3 the relative scarcity	0.70	13	61.28	0.61		84.049	34.981	-2.953	37.934	81.096	83.46	2.368	2.368	1	0.000	32	0.000	0.000	0.000
V <sub>max</sub>	104.39	14	39.47	0.39		105.454	37.934	-5.339	43.274	100.115	83.46	0.000	0.000	0	16.651	47	0.000	0.000	0.000
V <sub>min</sub>	0.00	15	75.56	0.76		70.377	43.274	12.401	30.873	82.778	83.46	0.686	0.686	1	0.000	40	0.000	0.000	0.000
V <sub>тп</sub>	104.39	16	29.86	0.30		116.704	30.873	-5.339	36.212	111.365	83.46	0.000	0.000	0	27.901	47	0.000	0.000	0.000
P%-deficit-free perio	53.47	17	5.52	0.06		170.788	36.212	-5.339	41.551	165.449	83.46	0.000	0.000	0	81.985	47	0.000	0.000	0.000
real R, %	95.00	18	33.91	0.34		111.724	41.551	-5.339	46.891	106.385	83.46	0.000	0.000	0	22.921	47	0.000	0.000	0.000
		19	19.48	0.19		132.096	46.891	-5.339	52.230	126.757	83.46	0.000	0.000	0	43.293	47	0.000	0.000	0.000
d-1 real	8.35	20	89.97	0.90		53.408	52.230	12.401	39.829	65.809	83.46	17.655	17.655	1	0.000	9	0.000	0.000	0.000
d-2 real	27.04	21	28.67	0.29		118.252	39.829	-5.339	45.168	112.913	83.46	0.000	0.000	0	29.448	47	0.000	0.000	0.000
d-3 real	32.25	22	16.70	0.17		137.265	45.168	-5.339	50.508	131.926	83.46	0.000	0.000	0	48.462	47	0.000	0.000	0.000
		23	9.92	0.09		166.277	47.827	-5.339	53.166	151.178	83.46	0.000	0.000	0	68.859	47	0.000	0.000	0.000
		24	7.76	0.08		160.995	15.588	-5.339	20.928	155.656	83.46	0.000	0.000	0	72.192	47	0.000	0.000	0.000
		25	35.71	0.36		109.627	20.928	-5.339	26.267	104.288	83.46	0.000	0.000	0	20.824	47	0.000	0.000	0.000
		26	7.54	0.08		161.870	26.267	-5.339	31.606	156.531	83.46	0.000	0.000	0	73.067	47	0.000	0.000	0.000
		27	88.31	0.88		55.782	31.606	12.401	19.205	68.182	83.46	15.282	15.282	1	0.000	10	0.000	0.000	0.000
		28	17.55	0.18		135.608	19.205	-5.339	24.545	130.269	83.46	0.000	0.000	0	46.805	47	0.000	0.000	0.000
		29	84.21	0.84		61.000	24.545	12.401	12.144	73.401	83.46	10.063	10.063	1	0.000	14	0.000	0.000	0.000
		30	63.81	0.64		81.682	12.144	-2.953	15.097	78.729	83.46	4.735	4.735	1	0.000	25	0.000	0.000	0.000
		31	8.15	0.08		159.586	15.097	-5.339	20.436	154.246	83.46	0.000	0.000	0	70.782	47	0.000	0.000	0.000
		32	10.22	0.10		152.803	20.436	-5.339	25.775	147.464	83.46	0.000	0.000	0	63.999	47	0.000	0.000	0.000
		33	95.19	0.95		44.022	25.775	12.403	13.372	56.425	83.46	27.039	27.039	1	0.000	5	27.039	0.000	0.000
		34	27.41	0.27		119.940	13.372	-5.339	18.712	114.600	83.46	0.000	0.000	0	31.136	47	0.000	0.000	0.000
		35	37.27	0.37		107.871	18.712	-5.339	24.051	102.532	83.46	0.000	0.000	0	19.068	47	0.000	0.000	0.000
		36	34.41	0.34		111.139	24.051	-5.339	29.390	105.800	83.46	0.000	0.000	0	22.336	47	0.000	0.000	0.000
		37	74.13	0.74		71.815	29.390	9.999	19.390	81.815	83.46	1.649	1.649	1	0.000	37	0.000	0.000	0.000
cp			49.89	0.50		100.52			19.39	100.52	83.46	4.17	4.17		21.23				
sum								0.00						46.00					
max			97.15	0.97		215.92	104.39	12.40	104.39	210.58	83.46	32.25	32.25		127.12		27.04	8.35	32.25
min			0.99	0.01		38.81	0.00	-20.26	0.00										
st			28.73	0.29		39.30													
Cv						0.391													

Рисунок 5.1 – Листинг расчета модели

## 5.2. Пример применения оптимизационной модели

Работу алгоритмов оптимизации можно проследить по балансам реальных объектов. Характерным примером для анализа водоотдачи является Пензенское водохранилище, образованное Сурским гидроузлом (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Генплан Сурского гидроузла

Назначение системы объекта - решение проблемы комплексного водоснабжения городов Пензы и Заречного (город спутник), многих промышленных предприятий, таких как Дизельный завод, Пензтекстильмаш, Химмаш, Пензенский арматурный завод, завод медицинской техники. Очевидно, что значение перечисленных отраслевых объектов это важнейшая государственная задача. В разных планах развития региона рост водопотребления связан как с развитием регулярного орошения на площади от 8 до 40 тысяч гектар, так и с перспективой размещения в составе гидроузла микро-ГЭС мощностью 500 КВт (не реализовано до настоящего времени). Таким образом некоторая неопределенность в темпах и структуре развития водопотребления свидетельствуют о целесообразности водохозяйственно-энергетического потенциала объекта.



Рисунок 5.3 – Компоновка водохозяйственного комплекса акватории Пензенского водохранилища

Поскольку водохранилище сезонного регулирования, мы использовали версии модели следующего вида, ориентированные на годы расчетной обеспеченности покрытия водопотребления:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 B_j = S_j \pm \Delta V_j - W_{req,j}, \text{ где } j \text{ расчетный интервал, ВХБ;} \\
 W_{req,j} = W_{кбх,j} + W_{пром,j} + W_{ор,j} + W_{кп,j} + W_{пот,j} - \text{отраслевое} \\
 \text{водопотребление, комплексный попуск,} \\
 \text{потери на доп. испарение, фильтрацию, льдообразование} \\
 B_j \geq 0 \text{ обнуление дефицитов;} \\
 W_{кп,j} = \max\{W_{сан,j}, W_{рх,j}, W_{эн,j}\}; \\
 \nabla_j \geq \nabla_{взб,j}; \text{ условия нормальной работы водозаборов} \\
 V_j = V_{j-1} + \Delta V_j \text{ наполнение в } - \text{ща на конец расчетного интервала;} \\
 V_{мо} \leq V_j \leq V_{полн} \text{ регулирование в пределах емкости в } - \text{ща;} \\
 \sum_{j=1}^N \Delta V_j = 0 \text{ условие сезонного регулирования;} \\
 N_j = 9,81 \cdot Q_j \cdot H_j \text{ мощность в } j - \text{ом интервале;} \\
 \mathcal{E}_j = N_j \cdot T_j; \text{ объем выработки энергии за интервал} \\
 \text{for var } \{\Delta V_j, \nabla_{мо}\}, \quad N_{гар} \geq N_{min} \rightarrow V_{плн} \rightarrow \min
 \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Алгоритм системы 5.2 реализован в форме расчетного модуля «Оптимизационной водно-балансовой модели «WEPRIVERSITE», копия листинга которой приведена в приложении 1. Смысл приведенной выше системы (5.2) состоит в том, чтобы варьируя переменными регулирования  $\Delta V_j$ , и отметкой мертвого объема  $V_{MO}$  найти такие их значения, при которых отсутствуют дефициты водопотребления, объем водохранилища  $V_{полн}$  достигает минимальной значения, а минимальная среднемесячная гарантированная мощность  $N_{гар}$ , будет не менее заданной. Серия расчетов позволяет построить анализирующие зависимости  $V_{полн} = \varphi(N_{гар})$  для технико-экономического сравнения вариантов. Дело в том, что отметка УМО при одной и той же полной емкости водохранилища определяет и мощность ГЭС, и объем гарантированной отдачи. Если мы хотим получить решение с максимальной энергоотдачей, фиксируем  $V_{плн}$  и заменяя в алгоритме системы последнюю функциональную строку, получаем:

$$for\ var\ \{\Delta V_j, V_{MO}\}, \quad N_{гар} \rightarrow max \quad (5.3)$$

В том случае, если мы хотим добиться максимального развития орошения в соответствии с упомянутым планом, снова меняем алгоритм в последней строки (5.4).

$$\left\{ \begin{array}{l} B_j = S_j \pm \Delta V_j - W_{req,j}, \text{ где } j \text{ расчетный интервал, ВХБ;} \\ W_{req,j} = W_{кбх,j} + W_{пром,j} + W_{ор,j} + W_{кп,j} + W_{пот,j} - \text{отраслевое водопотребление,} \\ \text{комплексный попуск, потери на доп. испарение, фильтрацию, льдообразование} \\ B_j \geq 0 \text{ обнуление дефицитов; } W_{кп,j} = \max\{W_{сан,j}, W_{рх,j}, W_{эн,j}\}; \\ V_j \geq V_{взб,j}; \text{ условия нормальной работы водозаборов} \\ V_j = V_{j-1} + \Delta V_j \text{ наполнение в } - \text{ ща на конец расчетного интервала;} \\ V_{MO} \leq V_j \leq V_{полн} \text{ регулирование в пределах емкости в } - \text{ ща;} \\ \sum_{j=1}^N \Delta V_j = 0 \text{ условие сезонного регулирования;} \\ N_j = 9,81 \cdot Q_j \cdot H_j \text{ мощность в } j - \text{ ом интервале;} \\ \mathcal{E}_j = N_j \cdot T_j; \text{ объем выработки энергии за интервал} \\ for\ var\ \{\Delta V_j, V_{MO}, W_{ор}\}, \quad N_{гар} \geq N_{min} \rightarrow W_{ор-год} \rightarrow max \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Использование алгоритма с использованием ОПГ требует аппроксимированных батиграфической и объемной функций. Подобранные функции имеют вид:

$$\omega = 0,189 \cdot (\nabla - \nabla_{\text{дна}})^{2,243} \quad (5.5)$$

$$V(h) = \int_0^{\nabla - \nabla_{\text{дна}}} \omega(h) dh; V = \frac{0,189 \cdot (\nabla - \nabla_{\text{дна}})^{3,24}}{3,24}; \quad (5.6)$$

$$\nabla = 2,399 \cdot V^{0,308} + 133,24; Q_{\text{нб}} = 24,16 \cdot (\nabla - \nabla_{\text{дна}})^{2,32}; \nabla = \left(\frac{Q}{24,16}\right)^{1/2,32} + \nabla_{\text{дна}}. \quad (5.7)$$

Результаты имитационных расчетов приводят к таблице для выбора варианта по энергетическим показателям водохозяйственного баланса (табл. 5.1). Для варианта максимально возможной с точки зрения бездефицитного баланса отметки мертвого объема получена зависимость гарантированной среднемесячной мощности ГЭС от объема водохранилища (рис. 5.4).

Реализация водохозяйственного баланса иллюстрируется таблицей 5.2. Окончательный результат исследований связан с оценкой гарантированной мощности с учетом суточного регулирования мощности ГЭС (рис. 5.5).

Таблица 5.1 – Влияние отметки мертвого объема на водно-энергетические показатели

Отметка УМО, м	$V_{\text{мо}}$	$N_{90}$	$V_{\text{полн}}$	$\mathcal{E}_{\text{ср-год}}$
	млн. м <sup>3</sup>	КВт	млн. м <sup>3</sup>	КВт*час
143,00	56,7	1580	208,29	1137,6
144,48	100	1840	270,43	1324,8
145,68	150	2050	342,94	1476,0
146,60	200	2200	405,52	1584,0
147,34	250	2320	464,31	1670,4
147,98	300	2420	519,93	1742,4

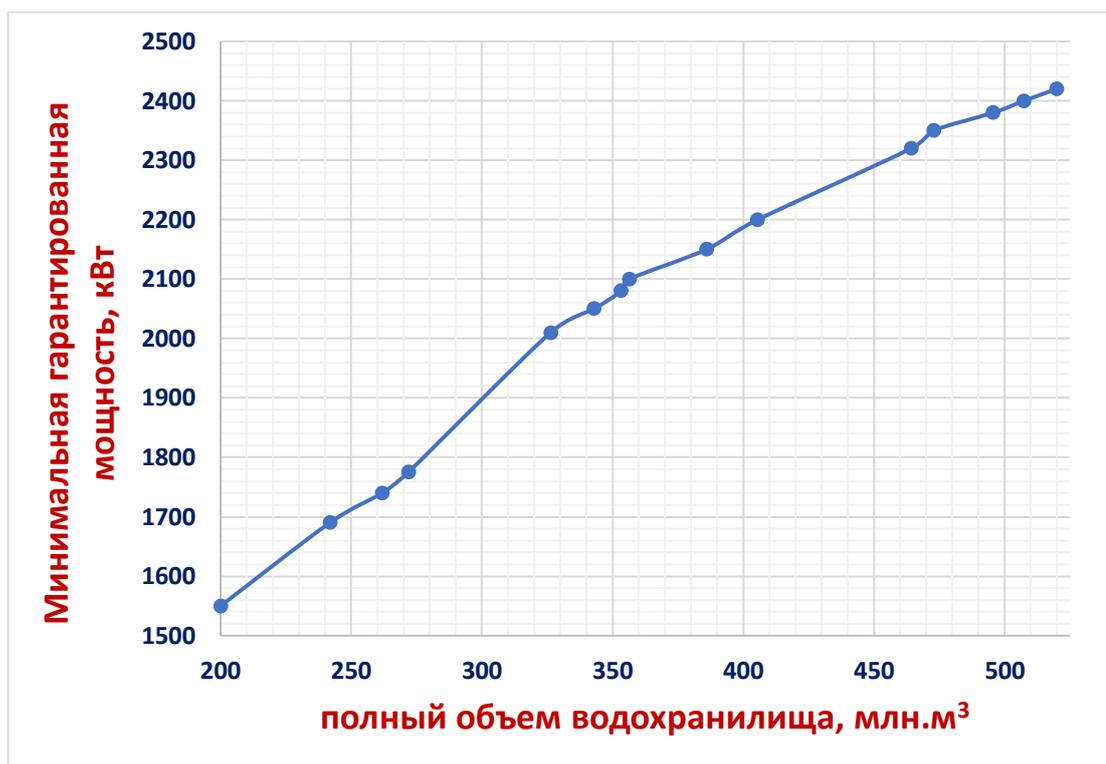


Рисунок 5.4 – Зависимость мощности ГЭС от объема водохранилища

Предварительные исследования показывают, что существующий режим управления водными ресурсами Пензенского водохранилища не соответствует его возможностям. Целесообразно повышение отметки мертвого объема для увеличения энергоотдачи ГЭС, что не сокращает суммарной водоотдачи водохранилища. Интересен и другой вывод: ресурсов Пензенского водохранилища достаточно для удовлетворения перспективных (прогноз ВКР) требований КБХ, промышленности, орошения и рыбохозяйственного попуска. Потенциальная энергоотдача малой ГЭС несопоставима с потребностями области, тем не менее реально выдавать до 5 МВт мощности суточного пика и более 20 ГВт\*час в год гарантированной выработки электроэнергии. Причем возможно освоение до 40 тыс. га ирригационного фонда без ущерба для гидроэнергетики.

Использование алгоритма с использованием ОПГ требует аппроксимированных батиграфической и объемной функций. Реализация водохозяйственного баланса иллюстрируется таблицей (5.2). Окончательный результат исследований связан с оценкой гарантированной мощности с учетом суточного регулирования мощности ГЭС (рис. 5.5).

Таблица 5.2 – ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС В СТОРЕ СУРСКОГО ГИДРОУЗЛА (рекомендуемого варианта)

Календарные месяцы ВХГ	ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА						РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА					РЕЗУЛЬТАТ ВХБ		ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ							
	Приток к створу	ПЗВ	ВВ	Регулирован ие стока	Текущее наполнение на конец	Располагаемые ВР	W	W <sub>n</sub>	U	L	Рачетные требования к водным ресурсам	Дефицит	Резерв	отметка ВБ, м	отметка НБ, м	Напор, м	Средний напор, м	Q <sub>гЭС</sub> , м <sup>3</sup> /с	N, кВт	Э, МВт*час	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
III	73,45	0,00	0,00	-2,60	302,60	70,85	15,59	52,68	0,00	2,58	70,85	0,00	0,00	148,01	134,16	13,85	13,85	19,66	2456,63	1768,78	
IV	433,62	0,00	0,00	-217,96	520,56	215,65	15,59	195,00	0,00	5,06	215,65	0,00	0,00	150,00	134,87	15,12	14,49	75,29	9844,84	7088,29	
V	87,54	0,00	0,00	14,83	505,73	102,37	33,98	62,80	0,00	5,59	102,37	0,00	0,00	149,89	134,23	15,66	15,39	23,43	3255,10	2343,67	
VI	57,87	0,00	0,00	40,50	465,24	98,36	45,21	48,43	0,00	4,72	98,36	0,00	0,00	149,57	134,14	15,44	15,55	18,70	2624,24	1889,45	
VII	52,44	0,00	0,00	35,24	429,99	87,68	33,98	50,12	0,00	3,58	87,68	0,00	0,00	149,28	134,14	15,15	15,29	18,70	2580,88	1858,24	
VIII	48,76	0,00	0,00	37,63	392,37	86,38	33,98	50,12	0,00	2,29	86,38	0,00	0,00	148,94	134,14	14,81	14,98	18,70	2527,71	1819,95	
IX	47,69	0,00	0,00	23,20	369,17	70,88	21,51	48,43	0,00	0,94	70,88	0,00	0,00	148,72	134,14	14,59	14,70	18,70	2480,46	1785,93	
X	57,86	0,00	0,00	8,98	360,18	66,84	15,59	50,12	0,00	1,13	66,84	0,00	0,00	148,63	134,14	14,50	14,54	18,70	2454,13	1766,97	
XI	61,91	0,00	0,00	2,31	357,87	64,23	15,59	48,43	0,00	0,21	64,23	0,00	0,00	148,61	134,14	14,47	14,48	18,70	2444,61	1760,12	
XII	50,98	0,00	0,00	14,94	342,93	65,91	15,59	50,12	0,00	0,21	65,91	0,00	0,00	148,45	134,14	14,32	14,40	18,70	2429,64	1749,34	
I	48,04	0,00	0,00	18,07	324,86	66,12	15,59	50,12	0,00	0,41	66,12	0,00	0,00	148,26	134,14	14,12	14,22	18,70	2400,26	1728,18	
II	44,86	0,00	0,00	24,86	300,00	69,72	15,59	45,25	0,00	1,23	62,08	0,00	7,64	147,98	134,14	13,84	13,98	18,70	2360,00	1699,20	
ГОД	1065,00	0,00	0,00	0,00	300,00	1065,00	277,80	751,61	0,00	27,95	1057,36	0,00	7,64	148,86	134,21	14,66	14,66	23,89	3154,88	2271,51	
																			Нмин	2360,00	1699,20
					Контроль невязки баланса:	7,64					Агар	1029,41							Эсут-об	56,64	МВт*час
						7,64														20674	мвт*час



Рисунок 5.5 – Суточное регулирование мощности микро ГЭС в составе Пензенского гидроузла

Модель баланса с оптимизацией может строиться для объекта любого масштаба. К примеру, упоминавшаяся ранее Новосибирская ГЭС в этом смысле не отличается от Сурского гидроузла, поскольку все водохранилища комплексного использования характеризуются похожими свойствами водохозяйственных комплексов, которые ими обеспечиваются.

Алтайские реки Бия и Катунь, сливаясь образуют знаменитую Обь, которая, пересекая всю территорию Западной Сибири с юга на север впадает в Карское море, образуя в дельте Обскую Губу (рис. 5.6). Северного ледовитого океана. На территории Новосибирской области, в южной части города Новосибирска река перегорожена плотиной. Гидроузел введен в эксплуатацию в 1959 году. Плотина образует Новосибирское водохранилище объемом  $8,8 \text{ км}^3$  (полезный объем  $4,4 \text{ км}^3$ ) - "Обское море". Норма стока в створе Новосибирской ГЭС составляет около  $53 \text{ км}^3$ . Целевая функция водохранилища протяженностью 220 км – один из главных источников питьевой воды в Новосибирской области, причем с перманентно растущим запросом (гг. Бердск, Искитим, Новосибирск). Длина водохранилища от города Камень-на-Оби до города Новосибирска - 220 км. Проектная мощность ГЭС 455 МВт, а средняя выработка электроэнергии 1900 ГВт\*час, которые обеспечиваются восемью гидротурбинами. Следует отметить множество экологических и водохозяйственных проблем, анализ которых выходит за рамки исследования. Тем не менее считаем необходимым регулярную оценку водно-энергетического потенциала этого объекта в соответствии с рекомендуемой нами методикой. В алгоритме заменен  $\max$ -функционал на добавку  $dQ$  к зимнему гарантированному расходу ГЭС, который достигается при условии бездефицитного баланса и фиксированных параметров водохранилища. Результаты оптимизационного моделирования показаны на рисунке 5.7. Водохозяйственный баланс, объединенный с водно-энергетическим расчетом, представлен в таблице 5.3, где получено решение, отвечающее максимальной энергетической мощности.



Рисунок 5.6 – Схема бассейна реки Обь

$V_{M0}$	$V_{Плн}$	$dQ, \text{м}^3/\text{с}$ итерация	$dQ, \text{м}^3/\text{с}$ решение
4400,00	8800,00	10	39,9

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До:  Максимум  Минимум  Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

\$ABS5 >= 0

\$F\$5:\$F\$16 <= \$Z\$5

\$F\$17 = 0

\$G\$5:\$G\$16 <= \$Z\$5

\$H\$5:\$H\$16 >= \$M\$5:\$M\$16

\$G\$5:\$G\$16 >= \$V\$5

\$G\$5:\$G\$16 >= 0

\$F\$5:\$F\$16 >= -\$Z\$5

\$U\$5:\$U\$16 >= 0

\$Z\$5 = 8800

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения:

Метод решения  
Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

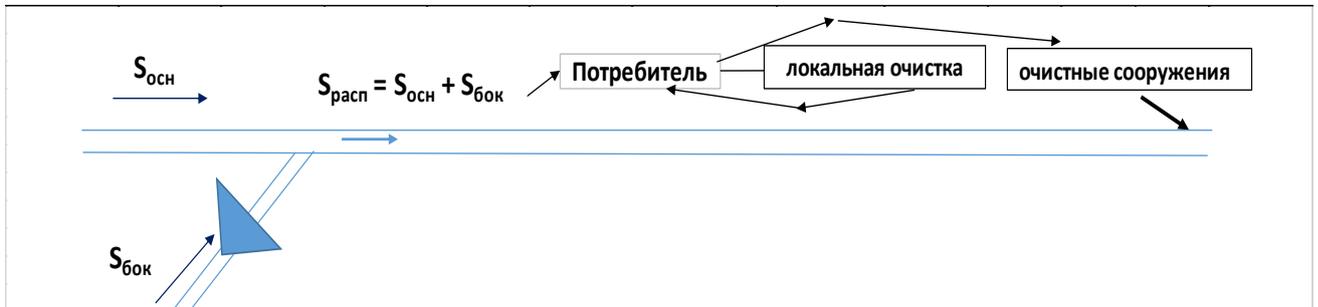
Справка

Рисунок 5.7 – Фрагмент «solver» для расчета оптимального баланса

Таблица 5.3 – Водохозяйственный баланс Оби в створе Новосибирской ГЭС для года 90 % обеспеченности

Календарные месяцы ВХГ	ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА						РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА					РЕЗУЛЬТАТ ВХБ		ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ								
	Приток к створу	ПЗВ, подземный водозабор	ВВ, возвратные воды	Регулирован ие стока	Текущее наполнение на конец	Располагаемые ВР	W, суммарное водопотреб ление	W <sub>п</sub> , комплексн ый пуск	U, ущерб	L	Рачетные требования к водным ресурсам	Дефицит	Резерв	отметка ВБ, м	отметка НБ, м	Напор, м	Средний напор, м	Q <sub>гэс</sub> м <sup>3</sup> /с	N, МВт	Э, ГВт*час		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
IV	5263	27,50	49,00	0,00	4400,00	5339,57	26,34	1943	13,75	-25,00	1957,59	0,00	3381,98	108,46	91,31	17,15	17,15	750,00	116,11	83,60		
V	11603	27,50	49,00	-1076,54	5476,54	10602,53	26,34	5360	13,75	85,00	5485,09	0,00	5117,44	109,90	91,31	18,59	17,87	2000,00	322,55	232,24		
VI	5814	27,50	49,00	-2074,99	7551,53	3815,01	37,87	3367	13,75	96,00	3514,62	0,00	300,39	112,23	91,31	20,92	19,75	1300,00	231,75	166,86		
VII	4765	27,50	49,00	-1203,83	8755,36	3637,38	43,63	3484	13,75	96,00	3637,38	0,00	0,00	113,41	91,31	22,10	21,51	1300,00	252,34	181,69		
VIII	3472	27,50	49,00	-44,64	8800,00	3503,38	43,63	3350	13,75	96,00	3503,38	0,00	0,00	113,45	91,31	22,14	22,12	1250,00	249,51	179,64		
IX	1947	27,50	49,00	1095,93	7704,07	3119,12	37,87	2979	13,75	89,00	3119,12	0,00	0,00	112,38	91,31	21,07	21,61	1150,00	224,25	161,46		
X	1765	27,50	49,00	956,61	6747,46	2798,09	26,34	2680	13,75	78,00	2798,09	0,00	0,00	111,38	91,31	20,07	20,57	1000,00	185,66	133,68		
XI	1124	27,50	49,00	134,36	6613,11	1335,09	26,34	1295	13,75	0,00	1335,09	0,00	0,00	111,23	91,31	19,92	19,99	500,00	90,23	64,96		
XII	656	27,50	49,00	492,39	6120,72	1224,51	26,34	1177	13,75	7,00	1224,51	0,00	0,00	110,67	91,31	19,36	19,64	439,34	77,88	56,07		
I	576	27,50	49,00	577,08	5543,64	1229,51	26,34	1177	13,75	12,00	1229,51	0,00	0,00	109,98	91,31	18,67	19,01	439,34	75,40	54,29		
II	517	27,50	49,00	525,30	5018,34	1119,29	26,34	1063	13,75	16,00	1119,29	0,00	0,00	109,31	91,31	18,00	18,33	439,34	72,70	52,34		
III	538	27,50	49,00	618,34	4400,00	1232,51	26,34	1177	13,75	15,00	1232,51	0,00	0,00	108,46	91,31	17,15	17,58	439,34	69,69	50,18		
<b>ГОД</b>	<b>38038,00</b>	<b>330,00</b>	<b>588,00</b>	<b>0,00</b>	<b>4400,00</b>	<b>38956,00</b>	<b>373,72</b>	<b>29052</b>	<b>165,00</b>	<b>565,00</b>	<b>30156</b>	<b>0,00</b>	<b>8799,81</b>	<b>110,90</b>	<b>91,31</b>	<b>19,59</b>	<b>19,59</b>	<b>917,28</b>	<b>164</b>	<b>1417</b>		
																			N <sub>гэс</sub> -год	69,69		
																				Эсут-об	1,67	МВт*час
																				N <sub>гэс</sub> -зим	69,69	

Безусловный интерес представляют схемы компенсированного регулирования и соответствующие им водохозяйственные балансы. Рассмотрим одну из возможных схем «solver» модели для компенсированного регулирования стока (рис. 5.8).



Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До:  Максимум  Минимум  Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

```
$ABS5 >= 0
$F55:$F516 <= $Z55
$F517 = 0
$G55:$G516 >= $Y55
$G55:$G516 <= $Z55
$H55:$H516 >= $M55:$M516
$G55:$G516 >= 0
$F55:$F516 >= -$Z55
$U55:$U516 >= 0
$Z55 = 8800
```

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения:

Метод решения  
Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Найти решение

Рисунок 5.8 – Оптимизация в постановке компенсированного регулирования

Соответствующий листинг баланса представлен в таблице 5.4. В качестве компенсатора может быть не только незарегулированная боковая приточность, но и подземные воды в режиме совместного использования, либо альтернативный источник водоснабжения. В случае использования альтернативного источника, необходимо устанавливать факторы зависимости между источниками водоснабжения. Это дополнительные специальные гидрогеологические исследования.

Таблица 5.4 – Форма сведенного водохозяйственного баланса для схемы компенсированного регулирования.

Календарные месяцы ВХГ	ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА						БАЛАНС НЕЗАРЕГУЛИРОВАННОЙ ЗОНЫ						РЕЗУЛЬТАТ ВХБ			
	Естеств. приток S в водохрани- лище	Требования к водохрани- лищу	Возвратные воды	Регулирова- ние стока	Текущее наполнение на конец	Располагаемые ВР водохранилища	Незарегулиро- ванный приток, S <sub>н</sub>	W, водопотре- бление	W <sub>п</sub> , комплекс- ный попуск	U, ущерб поверхн остному стоку	L, потери из водохра- нилища	Рачетные требования к водным ресурсам	ВХБ нерегулируе- мой приточности	Требуемый компенсир- ованный попуск из в- ща	Нерегули- руемый транзит	Итоговый водохозяй- ственный баланс
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
III	100,00	1,03	1,25	-32,18	32,18	70,10	80,00	30,00	35,00	0,72	0,02	65,74	14,26	0,00	49,26	70,10
IV	203,03	1,03	1,25	-205,31	237,48	0,00	180,00	30,00	140,00	0,72	0,11	170,83	9,17	0,00	149,17	0,00
V	35,82	1,03	1,25	8,72	228,76	46,82	60,00	50,00	55,00	0,72	1,10	106,82	-46,82	46,82	8,18	0,00
VI	34,62	1,03	1,25	14,92	213,84	51,82	20,00	40,00	30,00	0,72	1,10	71,82	-51,82	51,82	0,00	0,00
VII	27,11	1,03	1,25	17,62	196,22	47,01	16,00	40,00	22,00	0,72	0,29	63,01	-47,01	47,01	0,00	0,00
VIII	26,14	1,03	1,25	21,85	174,37	50,27	13,00	40,00	22,00	0,72	0,55	63,27	-50,27	50,27	0,00	0,00
IX	21,99	1,03	1,25	24,56	149,80	48,83	12,00	40,00	20,00	0,72	0,11	60,83	-48,83	48,83	0,00	0,00
X	22,75	1,03	1,25	29,71	120,09	54,74	6,00	40,00	20,00	0,72	0,02	60,74	-54,74	54,74	0,00	0,00
XI	23,39	1,03	1,25	28,05	92,04	53,72	7,00	40,00	20,00	0,72	0,00	60,72	-53,72	53,72	0,00	0,00
XII	22,27	1,03	1,25	31,17	60,86	55,72	5,00	40,00	20,00	0,72	0,00	60,72	-55,72	55,72	0,00	0,00
I	19,85	1,03	1,25	33,59	27,27	55,72	5,00	40,00	20,00	0,72	0,00	60,72	-55,72	55,72	0,00	0,00
II	16,17	1,03	1,25	27,27	0,00	45,72	5,00	30,00	20,00	0,72	0,00	50,72	-45,72	45,72	0,00	0,00
<b>ГОД</b>	<b>553,13</b>	<b>12,34</b>	<b>15,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>580,47</b>	<b>409,00</b>	<b>460,00</b>	<b>424,00</b>	<b>8,64</b>	<b>3,30</b>	<b>895,94</b>	<b>-486,94</b>	<b>510,37</b>	<b>206,61</b>	<b>70,10</b>

## **Выводы по главе 5**

В главе описан алгоритм модели для анализа водно-энергетического и водохозяйственного потенциала и методика его реализации в компьютерной оболочке Excel. Показано, что в рамках оптимизации режима регулирования стока возможно разыгрывать различные сценарии, ориентированные на получение наилучших результатов по параметрам водохранилищ, либо по мощности и выработке энергии ГЭС. Возможна также постановка задачи многокритериальной оптимизации, однако режим свертки критериев в большинстве случаев очень субъективен.

Уточнение сценариев моделирования определяется центральной задачей проекта. Используя описанную методику, можно строить модель с учетом специфики конкретного объекта, как это показано на примере Пензенского гидроузла. Выполнены также аналогичные расчеты по Новосибирскому водохранилищу. Таким образом подход является достаточно гибким для вариации сценариев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация ориентирована на решение задач, связанных с оценкой гидроэнергетического потенциала водохранилищ с учетом альтернативных источников водоснабжения. Благодаря всестороннему обзору существующих методологий, разработке инновационных подходов и практическому применению в реальных системах водохранилищ, это исследование вносит определенный вклад в развитие знаний и практики в области управления водными ресурсами, развития возобновляемых источников энергии и достижения целей рационального использования водных ресурсов.

Учитывая растущий дефицит водных ресурсов нужного уровня качества во многих странах мирового сообщества в последние десятилетия, усиливается интерес к новым источникам чистой воды, как традиционным, так и альтернативным. Приоритет тех или иных технологий в каждой стране свой и здесь общие рецепты не работают. Влияющими факторами являются природно-климатические условия, наличие природных водных ресурсов, энергетические и финансовые возможности. Так в РФ огромный потенциал пресных вод существует наряду с регионами напряженного водохозяйственного баланса. В этой реальности большое значение играет оптимизация проектных и эксплуатационных решений на основе объективно выстроенных критериев удовлетворения требований водопользователей. Достаточно остро стоит проблема качества воды. Поэтому экономия и бережное отношение к водным ресурсам лежит в основе государственной водной политики, базирующейся на государственной водной стратегии и программе развития водохозяйственного комплекса.

По результатам диссертационных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. При создании водохозяйственных систем - водохранилищ, их каскадов, сопутствующих сооружений: каналов, трубопроводов, туннелей, насосных станций, водозаборных сооружений, станций водоподготовки и очистных сооружений сточных вод и биоинженерных сооружений для дренажных стоков – должна быть

подготовлена приемлемая фоновая ситуация, то есть проведены комплексные водохозяйственные и водоохранные мероприятия в понимании рационального водопользования.

2. Эффективность регулирования стока и достижение необходимых значений водоотдачи водохранилищ и мощности гидроэлектростанций во многом зависят от морфометрических (батиграфических) характеристик створа, которые необходимы для пересчета объемов и площадей зеркала в абсолютные отметки и используются при расчете потерь из водохранилищ. Предложенный в работе способ моделирование гладких непрерывных батиграфических функций в диапазоне влияющих отметок позволяет использовать удобные алгоритмы оптимизации целевых показателей.

3. В условиях нарастающего дефицита качественных водных ресурсов, использование альтернативных источников водоснабжения становится неизбежным. Доля «участия» альтернативных источников в каждом случае нуждается в обосновании, которое связано как с финансовой реализацией, так и с экологическими последствиями. Широкое внедрение альтернативных вариантов водоснабжения, таких как повторное использование воды, очистка сточных вод, опреснение и управляемое пополнение водоносных горизонтов в период эксплуатации водохозяйственных систем повышает водообеспеченность, снижает социальные и экономические риски.

Альтернативные источники водоснабжения безусловно представляют собой перспективный источник водных ресурсов. В то же время их социально-экономическая эффективность носит сугубо региональный характер, причем для каждого из таких источников она неодинакова. В частности, можно отметить следующие моменты, от которых зависит проектная эффективность водохозяйственных систем:

- подземные воды – глубина залегания, минерализация, гидравлическая связь с поверхностным стоком, обусловленная местоположением водоносного горизонта относительно гидрографической сети;

- системы сбора дождевой воды – если говорить о Египте, Сирии и других странах ближнего востока либо использование местных ресурсов водосбора применительно к РФ, когда эффективность обусловлена сокращением запроса непосредственно к водохранилищу;

- повторное использование городских и животноводческих стоков для орошения технических культур связано с одной стороны с затратами на подготовку этой воды к использованию (механическая очистка, обеззараживание) с другой стороны ограничено условиями залегания грунтовых вод, которые подвержены загрязнению и опасности транзита загрязнений в водные артерии.

4. Комплексный подход к управлению водохранилищами предусматривает многоцелевое использование водных ресурсов, включая промышленно-коммунальное водоснабжение, ирригацию, выработку гидроэлектроэнергии, защиту от затопления паводкоопасных территорий при условии сохранения приемлемого состояния природной среды. Разработанные в диссертации подходы подчеркивают важность баланса конкурирующих целей и оптимизации в рамках корректной системы критериев. Ошибки в определении режима и параметров регулирования стока в зависимости от масштабов объекта способны приводить к значительным экономическим и социальным ущербам. В этой связи необходимо совершенствовать методы обоснования проектных решений в области управления водными ресурсами. В качестве универсальной системы критериев покрытия количественных требований к водным ресурсам (в условиях регулирования стока) рекомендуется изложенный в диссертации «метод трех групп», встраиваемый в алгоритм имитационного и оптимизационного моделирования в системах регулирования стока.

5. Обоснование современных водохозяйственных систем, базирующихся на одиночных водохранилищах или каскадах водохранилищ, невозможно без имитационного моделирования. В соответствии с материалами диссертации практически для каждой водохозяйственной системы может быть разработан имитационный алгоритм с элементами оптимизации, опирающийся на корректную систему критериев удовлетворения водопользователей. В диссертации рассматриваются

альтернативные водно-балансовые модели. В частности, предложен расчетный программный модуль «WEPRIVERSITE» в Excel, позволяющий проводить варианты исследования водохозяйственного и водно-энергетического потенциала при регулировании стока в речном створе. В качестве функционала в данном модуле принимается объем водохранилища с учетом вариации мертвого и полезного объема.

6. Незначительное изменение алгоритма в модуле «WEPRIVERSITE» заменяет целевую функцию с объема водохранилища на среднемесячную гарантированную мощность гидроэлектростанции, либо выработку электроэнергии, либо комбинированный критерий с учетом значимости целевых показателей. В этом случае формируется многокритериальная оптимизацией.

По нашему мнению, нужно стремиться к оптимизации главного функционала, закрепляя другие переменные для последующего построения анализирующих зависимостей. В условиях многоцелевого водопользования, когда присутствуют в водохозяйственном комплексе гидроэнергетика, промышленно – коммунальное водоснабжение, ирригация и противопаводковая защита – приоритетным подходом является безусловно имитационное моделирование, а фактор оптимизации является скорее корректирующим.

### **Рекомендации и инструменты поддержки принятия решений**

Результаты диссертационных исследований могут предоставлять интерес для инженеров по водному хозяйству, гидротехников, научных работников, занимающихся проблемами водообеспечения и управления водными ресурсами с целью поддержки принятия обоснованных решений в области проектирования и управления водохранилищами. Инструменты, разработанные в диссертации, могут помочь заинтересованным сторонам в оценке компромиссов, рисков и определении оптимальных стратегий для достижения водно-энергетического баланса.

Разработка и совершенствование методов оценки водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала водохранилищ с учетом альтернативных вариантов водоснабжения представляют собой, на наш взгляд, важный шаг к достижению устойчивого управления водными и энергетическими ресурсами. Рассматри-

вая сложные проблемы, стоящие перед водохозяйственными системами, диссертационные исследования должны способствовать развитию междисциплинарных связей и продвижению комплексных подходов к решению проблем управления водными ресурсами и развития возобновляемых источников энергии в 21 веке.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский, А.Ю. Гидроэнергетические установки [Текст]: учебное пособие / А.Ю. Александровский, Б.Е. Силаев // Москва: изд-во МЭИ. – 2004. 78 с.
2. Александровский, А.Ю. Управление режимами работы водохранилищ гидроэлектростанций в соответствии с требованиями по обеспечению безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений / А.Ю. Александровский, С.В. Хасянов // Труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого гидролога, профессора А.В. Рождественского. –2012. С. 219–226.
3. Алексеев, Г. А. Перспективы и резервы усовершенствования гидрологических расчетов и прогнозов для водохозяйственного проектирования / Г.А. Алексеев // Тр. V ВГС, т.6, теория и методы гидрологических расчетов, Л., Гидрометеиздат, 1989, с.15-21.
4. Алексеевский, Н. И. Климатические аспекты изменения опасных гидрологических процессов в районе расположения водохранилищ / Н. И. Алексеевский, В. А. Жук, Н. Л. Фролова // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды Международной научно-практической конференции. В 3-х томах, Пермь, 28 мая – 01 2007 года. Том I. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2007. – С. 3-7. – EDN HURTWQ.
5. Алексеевский, Н.И. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования [Текст] / Н.И. Алексеевский, Н.Л. Фролова, А.В. Христофоров // М.: Изд-во МГУ, 2011. – 367 с.
6. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия: Монография / Н. И. Коронкевич, И. С. Зайцева, Г. М. Черногаева; Ответственные редакторы: Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева; Институт географии РАН. – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2003. – 367 с. – ISBN 5-02-033054-X. – EDN QKMNUJ.

7. Асарин, А.Е. Водохозяйственные расчеты: учебное пособие / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева, А.В. Христофоров // Географический факультет МГУ Москва. 2012 г., 144 с. ISBN: 978-5-89575-199-2

8. Болгов, М. В. Нестационарность речного стока и проблемы управления водохранилищами (на примере системы водоснабжения Г. Москвы) / М. В. Болгов, Е. А. Коробкина, И. А. Филиппова // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3 т., Барнаул, 29 августа – 03 2022 года. Том 1. – Барнаул: ООО "Пять плюс", 2022. – С. 83-89. – EDN SLBWRA.

9. Болгов, М. В. Управление водохранилищами системы водообеспечения г. Москвы: есть ли необходимость адаптации к современным условиям? / М. В. Болгов, Е. А. Коробкина, И. А. Филиппова // Вопросы географии. – 2023. – № 157. – С. 167-181. – DOI 10.2405 7/probl.geogr.157.8. – EDN CLPJYX.

10. Борисова, Г. Г. Геоэкологические основы управления диффузным стоком с сельскохозяйственных водосборов: специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Борисова Галина Григорьевна. – Екатеринбург, 2002. – 319 с. – EDN STMFZF.11. Бояркина О.А. Водный фактор в турецко-сирийских отношениях // Мировая политика. – 2017. – № 4. – С. 56-63.

12. Брезгунов, В.С. Гидрохимический режим на водосборах с полями орошения животноводческими стоками / В.С. Брезгунов В.С., А.Л. Жуховицкая, И.К. Талерчик И.К. // В кн. Мелиорация переувлажненных земель. Вып. XXXIII/В.С. Брезгунов и др. – Минск: Ураджай, 1985. – С.80-89

13. Бубер, А.Л. Имитационное моделирование ВХС в режиме оптимизации диспетчерских правил управления на примере уникального природно-технического комплекса «Озеро Байкал-Иркутское водохранилище» [Текст] / А.Л. Бубер, Л.Д. Раткович, А.И. Рябиков // Природообустройство. – 2018. – № 3. – С. 31-39.

14. Бубер, А.Л. Научно методический подход к формированию компромиссных решений работы водохранилищ Волжско-Камского каскада / А. Л. Бубер, А.

А. Бубер, Е. Л. Раткович // Научные подходы к современному развитию мелиорации земель: Сборник научных трудов / Рассмотрено и одобрено на Ученом Совете ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2023. – С. 190-197. – DOI 10.37738/VNIIGIM.2023.23.64.019. – EDN FWPUNY.

15. Бубер, А.А. Сценарии управления водоподачей гидроузлов для оптимизации водообеспечения и водопользования на гидромелиоративных системах на примере водохозяйственного комплекса Нижней Кубани / А. А. Бубер, Ю. П. Добрачев, Е. В. Федотова // Основные результаты научных исследований института за 2018 год: Сборник научных трудов. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2019. – С. 29-36. – EDN OQNMVT.

16. Велиев, И.Г. Стохастическая модель притока к водохранилищу для среднесрочных гидрологических прогнозов при регулировании стока / И.Г. Велиев // Природообустройство. 2021. № 2. С. 124-131.

17. Великанов, А.Л. Составление перспективных водохозяйственных балансов с учетом управления водными ресурсами / А.Л. Великанов, Ю.С. Озиранский // Водные ресурсы. 1985. Т. 17. № 1. С. 5.

18. Великанов А.Л. Математические модели обоснования гарантированной отдачи водохозяйственных систем. I. Задачи функционирования / А.Л. Великанов, И.Л. Хранович // Водные ресурсы. – 1990. – Т. 17. – № 1. – С. 12-27.

19. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование в гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова // М.: Academia, 2010. - 304 с.

20. Владимиров А.М. Принцип оценки экологического стока рек [Текст] / А.М. Владимиров, Ф.А. Имамов // Вопросы экологии и гидрологические расчеты. –1994. – Вып 116. – С. 4–7.

21. Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием: Коллективная монография / А. М. Черняев, М. П. Дальков, Н. Б. Прохорова; Российский научно-исследовательский институт комплексного использова-

ния и охраны водных ресурсов. – Екатеринбург: Издательство "АКВА-ПРЕСС", 2001. – 520 с. – ISBN 5-901078-07-1. – EDN TIKYAA.

22. Водогрецкий, В.Е. Антропогенное изменение стока малых рек [Text]: монография / В. Е. Водогрецкий // Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 176 с..

23. Водохозяйственные системы и водопользование. Учебник для направлений подготовки 20.03.02 и 20.04.02 "Природообустройство и водопользование" / Под общей редакцией Л.Д. Ратковича и В.Н. Маркина // Москва, научно-издательский центр ИНФРА-М, Москва, 2019, 452 с.

24. Водный кодекс Российской Федерации" от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 24.04.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 14.06.2020). Режим доступа:[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/)

25. Гагарина, О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы [Текст]: учебно-метод. пособие / сост. О.В. Гагарина. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 197 с.

26. Галямина И.Г. Управление водохозяйственными системами: учебное пособие / И.Г. Галямина и др. // – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, –2015. –145 с., 10 п.л., ISBN 978-5-9675-1287-2.

27. Гельфан, А. Н. Динамико-стохастические модели со случайными входами в приложении к задачам гидрологии речных бассейнов / А. Н. Гельфан // Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967-2017 : В 2-х томах / Институт водных проблем РАН. Том 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство "КУРС", 2017. – С. 71-100. – EDN ZSEGJH.

28. Георгиади, А. Г. Особенности долговременных фаз повышенной и пониженной водности рек бассейнов Дона и Днепра / А. Г. Георгиади // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах : материалы X Международной научной конференции, Белгород, 24–27 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – С. 42-46. – EDN BPDXRQ.

29. Григорьев, В. Ю. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России / В. Ю. Григорьев, Н. Л. Фролова, Р. Г. Джамалов //

Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 4. – С. 36-47. – EDN YLETGX.

30. Глазунова, И.В. Методология использования биоинженерных сооружений в России и за рубежом [Текст] / И.В. Глазунова, Л.Д. Раткович // ВодаMagazine. – 2011. – № 12 (52). – С. 38-43, ISSN 2020-3532.

31. Глазунова, И.В. Проектирование биоинженерных сооружений в составе схем комплексного использования водных ресурсов [Текст]: учеб. пособие/ И.В. Глазунова, Л.Д. Раткович, С.А. Соколова // М.: Изд-во МГУП, 2007.– 63 с.

32. Глазунова, И.В. Применение локальных инженерных сооружений для более полного использования местных ресурсов водосбора [Текст] / И.В. Глазунова, Л.Д. Раткович // ВодаMagazine. – 2012. – № 8 (60). – С. 34-36, ISSN 2020-3532.

33. Государственный доклад «о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы). Национальное информационное агентство «Природные ресурсы». Издательско-полиграфический комплекс НИА–Природа. 2019.

34. Григорьев, Е.Г. Водные ресурсы России: проблемы и методы государственного регулирования [Текст] / Е.Г. Григорьев. – М.: Науч. мир, 2007. – 237 с.

35. Данилов-Данильян, В.И. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования [Текст] / В.И. Данилов-Данильян, И.Л. Хранович // М.: Научный мир, 2010. – 232 с.

36. Добрачев, Ю.П. Методические подходы к обоснованию развития и размещения водных мелиораций с учетом требований комплексного использования и охраны водных объектов / Ю.П. Добрачев // Мелиорация и проблемы восстановления сельского хозяйства в России: материалы международной конференции. – М.: ВНИИГиМ, 2013.

37. Добровольский, С. Г. Климатические изменения в системе "гидросфера-атмосфера" / С. Г. Добровольский. – Москва : Издательство ГЕОС, 2002. – 232 с. – ISBN 5-89118-275-0. – EDN YKBASB.

38. Дубинина, В. Г. Экологические последствия предлагаемых вариантов строительства второй нитки Волго-Донского водного пути и канала Евразия / В. Г. Дубинина // Рыбное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 65-68. – EDN KXYSAT.

39. Жабин, В.Ф. Формирование гетерогенной среды и регулирование режима грунтовых вод в задачах природообустройства [Текст] / В.Ф. Жабин, Н.П. Карпенко, И.М. Ломакин // М.: Изд-во ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 208 с.

40. Жабин, В. Ф. Фильтрационная расчетная схематизация тонкослоистых сред и надежность инженерных решений / В. Ф. Жабин, Н. П. Карпенко, И. М. Ломакин // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 65-71. – EDN OLKXLA.

41. Железняков, Г.В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока: учебник для вузов / Г. В. Железняков, Т.А.Неговская, Е. Е. Овчаров // М.: Колос, – 1984. – 432 с.

42. Заслоновский, В. Н. О повышении эффективности российско-китайского мониторинга качества вод реки Аргунь (Хайлар) / В. Н. Заслоновский, Н. М. Шарпов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2012. – № 6. – С. 35-48. – EDN PIMGUD.

43. Закономерности гидрологических процессов. / Н.И. Алексеевский и др. // Московский гос. ин-т им. М. В. Ломоносова, Географический фак., Российский фонд фундаментальных исслед. – Москва: ГЕОС, 2012. - 733, [1] с. : ил.; 25 см.; ISBN 978-5-89118-593-7

44. Иванов, А.Н. Гидрология и регулирование стока / А.Н. Иванов, Т.А. Неговская // Издательство: М.: Колос, 1970. – 287 С.

45. Изменчивость гидрохимических характеристик рек Сал и Западный Маныч в условиях современного антропогенного воздействия и климатических изменений (а пределах Ростовской области) / А.Д. Сазонов, О.С Решетняк, В.Е. Закруткин // Наука Юга России. – 2021. – Т.17, № 1 С. 24 – 36.

46. Интегрированное управление водными ресурсами в Восточной Европе, на Кавказе и в Центральной Азии. Национальные диалоги по водной политике Водной инициативы Европейского Союза. Отчет о прогрессе 2013. Европейская

экономическая комиссия организации объединенных наций организация экономического сотрудничества и развития. Нью-Йорк и Женева, 2014 год

47. Инновационные технологии в системах водоснабжения и водоотведения. / Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции (г. Чебоксары, 24-25 октября 2019). ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет. // Чебоксары, издательский дом «Среда», 2019. – 152 с.

48. Иофин З.К. Математические и физические признаки коэффициента регрессии в зависимостях слоя стока от слоя атмосферных осадков / З. К. Иофин // Природообустройство. – 2018. – № 2. – С. 6-10. – DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-6-10. – EDN OSIEXH.

49. Исмайылов, Г. Х. Вопросы методологии управления режимом работы системы водохранилищ на примере Московского региона / Г.Х. Исмайылов // Природообустройство, № 3, 2013, с. 60-64, ISSN 1997-6011

50. Исмайылов, Г.Х. Методология управления большими водохозяйственными системами на примере Волжско-Камского каскада водохранилищ [Текст] / Г.Х. Исмайылов, И.В. Прошляков, Л.Д. Раткович // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 4. – С. 17–22.

51. Исмайылов, Г.Х. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги. - //Водные ресурсы, 2008. Т.35. №3. – С. 259 – 276.

52. Исмайылов, Г.Х. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна / Г.Х. Исмайылов // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2020, №5. – с. 88-95.

53. Ковалевский, В.С. Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод / В.С. Ковалевский // М. : Научный мир, 2001. - 322 с.

54. Коронкевич, Н.И. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России / Н.И. Коронкевич // Вестн. РАН. 2019. № 6. С 603–614.

55. Конухин, В.П. и др. Результаты исследований альтернативных источников водоснабжения населения / В.П. Конухин // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 5. – №. 12. – С. 174-182.

56. Косолапов А.Е. Модель управления бассейном реки в условиях трансграничного водопользования [Текст] / А.Е. Косолапов, Т.А. Калиманов // Проблемы водопользования на оросительных системах юга России. Материалы конференции. – 2005. – С. 19–24.

57. Косолапов А.Е. Схемы комплексного использования и охраны водных объектов в системе регулирования межотраслевого взаимодействия при управлении водными ресурсами [Текст] / А.Е. Косолапов, Т.А. Калиманов, М.В. Капустин // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 9. – С. 68–73.

58. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель // М.: наука, 1981, 255 с.

59. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель // М., Наука, 1982. С 271.

60. Кучмент, Л.С. Динамика-стохастические модели формирования речного стока /Л.С. Кучмент // М.: Наука, 1993. – 103 с.

61. Малые реки России / Под ред. Черняева А.М. // Свердловск: Среднеуральское книжное издательство, 1988. - С.316

62. Манукьян, Д.А. Гидрогеоэкологические проблемы в задачах природообустройства / Д.А. Манукьян // М. МГУП, 2006. С. 194. ISBN 5-89231-199-6.

63. Марголина, Е.В. Обоснование экономической эффективности инвестиционных проектов [Текст]: учеб. пособие. / Е.В. Марголина // М.: Изд-во МГУП, 2002. – 118 с.

64. Маркин, В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки / В.Н. Маркин // Мелиорация и водное хозяйство. №4 М., 2005. С. 8-11.

65. Маркин, В.Н. Разработка мероприятий по комплексному использованию и охране водных объектов в бассейне реки [Текст]: учебное пособие / В.Н. Маркин, Л.Д. Раткович, С.А. Федоров // М.: МГУП, – 2011.– 102 с., 6.5 п.л., ISBN 978-5-89231-342-1.

66. Маркин, В.Н. Особенности методологии комплексного водопользования [Текст]: монография / В.Н. Маркин, Л.Д. Раткович, И.В. Глазунова. // М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 116 с.

67. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов: утверждена МПР РФ от 30.11.2007 №314. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-30112007-n-314/metodika-rascheta-vodokhoziaistvennykh-balansov-vodnykh/>

68. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ: утв. приказом Минприроды России от 26.01.2011 № 17; постановление Правительства Российской Федерации от 22.04.2009 № 349. [Электронный ресурс].

69. Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Федеральное агентство по рыболовству приказ от 4 августа 2009 года № 695.

70. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Приказ МПР РФ от 12 декабря 2007 г. N 328.

71. Методические указания по разработке нормативов предельно допустимых вредных воздействий на поверхностные водные объекты. Министерство природных ресурсов РФ. N 328 от 26 февраля 1999 г.

72. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. Приказ МПР №333 от 2007-12-17.

73. Метод оценки качества вод и состояния водных экосистем в схемах КИОВР / Шабанов В.В., Маркин В.Н. // МГУП - Москва 2007 – 81с. Деп. в ВИНТИ 06.11.07

74. Михайлов, С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: Аналит. обзор / С.А. Михайлов // СО РАН. ГПНТБ, Ин-т водных и экологич. проблем. – Барнаул: День, 2000. – 130 с.

75. Моделирование водохозяйственных систем (эколого-экономические аспекты): монография / под ред. В.Г. Пряжинской // М.: Изд-во ИВП РАН, 1992. – 350 с.
76. Мотовилов, Ю.Г. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Ю.Г. Мотовилов, Гельфан А.Н. // М.: Изд. Российской академии наук. 2019. – 300 с. ISBN 978-5-907036-22-2
77. Муалла, М. Оценка водообеспеченности в речном бассейне на основе обобщённых критериев покрытия водопотребления / М. Муалла, Л. Д. Раткович // Гидротехническое строительство. – 2023. – № 10. – С. 42-47. – EDN EJLIRP.
78. Музылев, С.В. Стохастические модели в инженерной гидрологии [Текст] / С.В. Музылев, В.Е. Привальский, Д.Я. Раткович // М.: Наука, 1982. - 184 с.
79. Мумладзе, Р.Г. Управление водохозяйственными системами [Текст]: учебник / Р.Г. Мумладзе [и др.] // М.: КноРус, 2010. – 208 с.
80. Охрана подземных вод [Текст]: учеб. пособие / В.Ф. Жабин, Д.В. Козлов, Л. Д. Раткович / СПб.: Изд-во ФГОУ ВПО МГУП, 2010. – 94 с.
81. Оценка влияния изменений климата на водный режим и ресурсы поверхностных и подземных вод бассейна Волги / Н. И. Алексеевский, Р. Г. Джама-лов, Н. Л. Фролова // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : Труды Международной научно-практической конференции. В 4-х томах, Пермь, 17–20 мая 2011 года. Том III. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2011. – С. 3-9. – EDN OPNNST.
82. Постановление правительства РФ от 19.04.2012 n 350 «О федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса российской федерации в 2012 – 2020 годах». URL: <https://www.referent.ru/1/197667>.
83. Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2009 г. № 1235-р.об утверждении Водной стратегии РФ на период до 2020 года. URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/201522/>.
84. Прохорова, Н.Б. Характеристика водных ресурсов России. Водное богатство России / Н.Б. Прохорова, Н.А. Могилевских, Ю.В. Туленина // Екатеринбург: Издательство РосНИИВХ. – 2006. – 110 с.

85. Раткович, Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения [Текст]: монография / Д.Я. Раткович // М.: Наука, 2003. – С. 352.

86. Раткович, Л.Д. Методические особенности водохозяйственных расчетов в современных условиях / Л.Д. Раткович // Труды конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии» в институте Водных проблем РАН, Москва, РАН, 2001, 245 с., с.166-170

87. Раткович, Л.Д. Водохозяйственные аспекты проекта Кариотис в республике КИПР [Текст]: научное издание / Л.Д. Раткович, А.П. Гурьев, В.А. Чугунков // Мелиорация и водное хозяйство – 2001.–№ 6.– С.40-42, ISSN 0235-2524.

88. Раткович, Л.Д. Использование водных ресурсов в условиях современного развития водохозяйственного комплекса / Л.Д. Раткович, Э.С. Беглярова, Д.В. Козлов // Мелиорация и водное хозяйство, 2005, № 5, с. 53-58, ISSN 0235-2524.

89. Раткович, Л.Д. Аспекты развития теории и практики водохозяйственных расчетов / Л.Д. Раткович // Труды VI – го Всероссийского гидрологического съезда в Санкт –Петербурге, Росгидромет, М. 2006, доклады сек.5, с. 188-192.

90. Раткович, Л.Д. Методология обосновывающих водохозяйственных расчетов / Л.Д. Раткович / Мелиорация и водное хозяйство, № 6, 2007, с.32-35, ISSN 0235-2524

91. Раткович, Л.Д. Водохозяйственные проблемы трансграничных бассейнов / Л.Д. Раткович // Природообустройство, № 4, 2008, с. 41-47, ISSN 1997-6011

92. Раткович, Л.Д. Вопросы рационального использования водных ресурсов и проектного обоснования водохозяйственных систем [Текст]: монография / Л.Д. Раткович, В.Н. Маркин, И.В. Глазунова // М.: ФГБОУ ВПО МГУП – 2013.– 258 с., ISBN 978-5-89231-415-2.

93. Раткович, Л.Д. Трансграничное водопользование в бассейне реки Иртыш / Л. Д. Раткович, Ю. А. Бовина, Ю. В. Владимирова // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 3. – С. 81-87. – EDN YZBZDB.

94. Раткович, Л.Д. Аспекты управления водными ресурсами в условиях комплексного водопользования / Л.Д Раткович // Евразийский союз ученых. 2016. № 3-3 (24). С. 52-56.

95. Раткович, Л.Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / В.Н. Маркин, И.В. Глазунова, С.А. Соколова // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 3. С. 64.

96. Раткович, Л.Д. Трансграничное водопользование в бассейне реки Иртыш / Л.Д. Раткович, Ю.А. Бовина, Ю.В. Владимирова // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 3. – С. 81-87. – EDN YZBZDB.

97. Раткович, Л.Д. Особенности отечественного водопользования и необходимость реализации водной стратегии РФ / Л.Д. Раткович, Т.И. Матвеева // Доклады ТСХА Сборник статей. 2019. С. 162-166.

98. Раткович, Л. Д. Повышение водообеспеченности комплексного водопотребления в условиях многолетнего регулирования речного стока / Л. Д. Раткович, Н.В. Сафонова, Д.В. Агеев // Природообустройство. – 2019. – № 2. – С. 126-134. – DOI 10.34677/1997-6011/2019-2-126-131. – EDN WZUFND.

99. Раткович, Л.Д. Аспекты распределения водных ресурсов трансграничных рек / Л.Д. Раткович, Муалла М., Сафонова Н.В. // Природообустройство. 2021. № 2. С. 92-101.

100. Раткович, Л. Д. Оптимизационный алгоритм управления водными ресурсами водохранилищ для обоснования диспетчерских графиков / Л. Д. Раткович, С.А. Соколова, М. Муалла // Природообустройство. – 2024. – № 4. – С. 99-107. – DOI 10.26897/1997-6011-2024-4-99-107. – EDN PXGZGP.

101. Реймерс, Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. / Н.Ф. Реймерс // М.: «Мысль», 1990. — 639 с.

102. Рождественский, А.В. Современная проблема инженерных гидрологических расчетов по обобщению гидрологической информации в России / А.В. Рождественский, А.Г. Лобанова // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 7. – С. 81–95.

103. Рысбеков, Ю.Х. Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / доклад в сборнике под ред. В.А. Духовного / Ташкент: Научно-информационный центр межгосударственной координации водохозяйственной комиссии (НИЦ МКВК), 2009. – 203 с.

104. Соколовский, Д.Л. Речной сток [Текст]: Методы исследований и расчетов): [Учеб. пособие для гидрометеорол. ин-тов и гос. ун-тов] / Д. Л. Соколовский/ Ленинград: Гидрометеиздат, 1952. - 492 с
105. Угроватова Е.Г. Обоснование комбинированных типов переброски стока на примере реки западный Маньч. / Е.Г. Угроватова // Природообустройство. - 2013. - № 4. - С. 70-75.
106. Фролов А.В. Дискретная динамико-стохастическая модель многолетних колебаний речного стока / А.В. Фролов // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 538-547.
107. Фролов А.В. Моделирование негауссова векторного процесса в приложении к гидрологии / А. В. Фролов, Т. Ю. Выручалкина, И. В. Соломонова // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41, № 6. – С. 559-564.
108. Хрисанов Н.И. Экологическое обоснование гидроэнергетического строительства: Учеб. пособие / Н. И. Хрисанов, Н. В. Арефьев // Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т. - СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1992. - 167с. ISBN 5-288-00854-X
109. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии / А.В. Христофоров // М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
110. Шабанов, В. В. Оценка качества воды и экологического состояния водных объектов / В. В. Шабанов, В. Н. Маркин // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 10(10). – С. 28-37. – EDN JYBDOD.
111. Шабанов В.В. Методика эколога - водохозяйственной оценки водных объектов: монография. – М.: РГАУ МСХА, 2014. -162с.
112. Шикломанов, И.А. Антропогенные изменения водности рек / И.А. Шикломанов // Л.: Гидрометеиздат, 1979, 302 с.
113. Шикломанов, И. А. Научно-методические основы современного государственного мониторинга водных объектов (на примере бассейна р. Кубань) / И. А. Шикломанов, В. Ю. Георгиевский, З. Д. Копалиани // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 12. – С. 76-90. – EDN KUHPBL.

114. Штанько, А. С. Обобщение и анализ нормативных документов, определяющих режим использования водных ресурсов Пролетарского, Весёловского и Усть-Маньчского водохранилищ / А. С. Штанько, А. В. Акопян, Н. И. Сафарова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – № 1(5). – С. 180-189. – EDN OSKLHT.

115. Фащевский, Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока [Текст] / Б.В. Фащевский // – Минск: Изд-во БелНИИ-ИНТИ, 1989. – 51 с.

116. Andrew, R. Estimation of GRACE water storage components by temporal decomposition / R. Andrew // Journal of Hydrology. 2017. Vol. 552. Pp. 341-350. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.016>.

117. Bai, P. Improving hydrological simulations by incorporating GRACE data for model calibration / P. Bai // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 557. Pp. 291-304. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.025>.

118. Bolgov, M.V. The Markov stochastic models in engineering hydrology / M.V. Bolgov // >In Advances in Hydro-Science and Engineering, 1993, Vol. I, USA Co-author: Sarmanov I.O.

119. Budagovsky, A.I. Influence of the specific water consumption structure on the environment under the largescale irrigation development / A.I. Budagovsky // Environmental and socio-economic consequences of water resources development and management: Proc, of the Moscow symp. (15-20 May, 1995). P.: UNESCO, 1996. P. 28-31 (Technical Doc. in Hydrol.; N 3).

120. Daniel, P. Sustainability Criteria for Water Resource Systems / P. Daniel // Cambridge University Press, 2008. 156 с.

121. Dile, Y.T. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the Blue Nile river basin / Y.T. Dile, R. Srinivasan // J. Am. Water Resour. Assoc. - 2014. - Т. 50, № 5. - P. 1226–1241.

122. Gigon, F. Wastewater Management Outside Urban Areas: A Conceptual Approach to Integrate Economical, Practical and Ecological Constraints with Legal and

Social Aspects / F. Gigon // Environmental Research Forum. 1996. Vol. 5–6 // Ibid. – P. 261–265. Ibid.

123. Hooke, R. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems / R. Hooke // Journal of the ACM, Vol. 8, No. 2, 1961, pp. 212-229. doi:10.1145/321062.321069

124. Ismailov, G.Kh. Application of the composition method for the evaluation of natural water supply of the main agricultural regions of steppe and forest- steppe zones of Russia / G.Kh. Ismailov // Stochastic models of hydrological processes and their applications of environmental preservation. Moscow, 1998. P. 300-303.

125. Horne, A.J. Lake Ecology overview/ A.J. Horne // Chapter 1, 1994. Limnology. 2nd edition. McGraw-Hill Co., New York, USA

126. Kalnay, E. et al. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E Kalnay // Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77,437-471.

127. Kireycheva, L.V. Prevention of water bodies' pollution with drainage flow / L.V. Kireycheva // 21st European regional Conference “Integrated land and water resources management: towards sustainable rural development”. 15–19 May 2005, Frankfurt (Oder), Germany and Slubice, Poland. (in English).

128. Kovar, K. 1996: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management / K. Kovar // IAHS Publication, 1996, No. 235. Wallingford, IAHS Press, Institute of Hydrology, 711 pp

129. Manhal M. Assessment Of Water Availability In A River Basin Based On Generalized Water Consumption Coverage Criteria / M. Manhal, L. D. Ratkovich // Power Technology and Engineering, 2024, Vol. 57, No. 6, March, p. 882-886/

130. Ratkovich, L.D. Aspects of Multi-Year Flow Control In Relation To Trans-boundary Rivers / Lev D. Ratkovich, Alexander M. Bakshtanin, Irina V. Glazunova, Natalya E. Plokhikh // 2418 - 2439 2020-06-05. International Journal of Advanced Science and Technology. Australia.

131. Robert, G. Lake and river ecosystems. Third edition. / G. Robert // New York: academic press. An imprinted of elsevier, 2001. – p.1006

132. Frolova N.L. Runoff fluctuations in the Selenga river basin / N.L. Frolova // Regional Environmental Change. 2017 a. Vol. 17 № 7. Pp. 1965-1976. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1199-0>.

133. Slobodan P. Methods and Tools for a Systems Approach Ebook / P. Slobodan // Publication Date. Managing Water Resources: 2012 May.

134. Vollenweider, R.A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors of eutrophication. / R.A. Vollenweider // OECD, Paris, 1971. – p.159

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### *Расчетный модуль «Оптимизационная воднобалансовая модель WEPRIVERSITE»*

Назначение модели – исследование, получение и накопление информации о водохозяйственном и гидроэнергетическом потенциале речного створа, где существует или планируется создание гидроузла, образующего водохранилище комплексного использования. Модель позволяет выполнять обосновывающие водохозяйственные расчеты в имитационно-оптимизационном режиме для установленного макета водохозяйственного баланса, включающего определение среднемесячных значений энергетической мощности и выработки ГЭС в составе гидроузла. Предложенная модель ориентирована на сезонный режим регулирования стока и апробирована на примере Пензенского гидроузла на реке Суре. В данной версии модели решается задача обоснования параметров водохранилища, соответствующих минимальному значению полной емкости при изменении отметки мертвого объема и принятых ограничений по минимальной среднемесячной гарантированной мощности. В процессе расчета на модели используются классическая теория регулирования стока и водно-энергетических расчетов, традиционная структура водохозяйственного баланса, а также алгоритм оптимизации, заложенный в программе Solver применительно к методу ОПГ (обобщенного понижающего градиента). С учетом специфики ОПГ, использующего гладкие функции, батиграфическая и объемная кривые, а также кривая расходов в нижнем бьефе гидроузла заранее аппроксимируются степенными функциями в зоне влияющих отметок. Модель реализована в форме расчетного модуля Excel. Объединенный листинг исходной информации и расчетного модуля приводится на рисунке 1. Многокритериальная оптимизация предусматривается в дальнейшем наряду с включением режима многолетнего регулирования.

# КОПИЯ РАСЧЕТНОГО МОДУЛЯ МОДЕЛИ «WEPRIVERSITE»

Модель для Манхала-база1st.m - Excel

Получить и преобразовать данные | Запросы и подключения | Сортировка и фильтр | Работа с данными | Прогноз | Структура | Анализ

ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА							РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ БАЛАНСА				РЕЗУЛЬТАТ ВХЕ		ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ					Слой истощения, мм		метровой объем, млн.м³				полный объем, млн.м³		повышенный объем, млн.м³		
Календарные месяцы ВХТ	Приток к створу	ПВП	ВВ	Регулирование стока + сбросы в наваление	Текущее наполнение на начало интервала	Текущее наполнение на конец интервала	Расходные мые ВР	W	W <sub>с</sub>	U	L	Дефицит	Резерв	средний термальный отток ПБ, м	отметка ПБ, м	Средний напор с ограничением, м	Q ст. м³/с	N, кВт	Э, МВт*час	H <sub>с</sub>	H <sub>г</sub>	V <sub>ср</sub>	V <sub>полн</sub>	V <sub>повыш</sub>	dQ			
IV	668,091	1,00	4,00	-114,79	200,00	314,79	358,30	15,59	335,20	0,70	1,97	353,46	0,00	4,84	146,54	135,30	11,24	11,24	129,42	13125	9450,02	33,00	3,60	200,00	328,75	128,75	0,51	
V	114,895	1,00	4,00	-13,96	314,79	326,75	105,93	15,59	83,37	0,70	4,51	104,17	0,00	1,76	107,80	134,36	13,13	13,13	316,20	2654,12	70,00	3,60	56,70				0,53	
VI	361,92	1,00	4,00	6,75	326,75	324,00	67,94	15,57	42,04	0,70	5,03	67,94	0,00	0,00	107,35	130,09	13,46	13,46	16,86	2000,00	1440,00	80,00	3,60				0,44	
VII	52,379	1,00	4,00	14,04	324,00	309,95	71,42	22,00	44,56	0,70	4,16	71,42	0,00	0,00	107,82	130,09	13,33	13,33	16,43	2000,00	1440,00	80,00	3,60				2,69	
VIII	48,703	1,00	4,00	14,90	309,95	295,06	68,60	19,57	45,27	0,70	3,06	68,60	0,00	0,00	107,22	134,30	13,12	13,12	16,99	2000,00	1440,00	80,00	3,60				3,93	
IX	47,633	1,00	4,00	14,00	295,06	281,05	66,64	19,57	44,40	0,70	3,89	66,64	0,00	0,00	107,03	134,10	12,90	12,90	17,17	2000,00	1440,00	80,00	3,60				4,06	
X	57,793	1,00	4,00	2,01	281,05	279,05	64,80	16,87	46,67	0,70	0,76	64,80	0,00	0,00	106,99	134,11	12,70	12,70	17,54	2000,00	1440,00	80,00	3,60				1,96	
XI	61,848	1,00	4,00	-4,80	279,05	283,85	62,94	15,59	44,83	0,70	0,92	62,94	0,00	0,00	106,61	134,11	12,80	12,80	17,21	2000,00	1440,00	80,00	3,60				0,28	
XII	42,554	1,00	4,00	15,60	283,85	268,25	63,15	15,59	46,70	0,70	0,16																	6,10
I	31,915	1,00	4,00	27,54	268,25	240,72	64,45	15,59	40,00	0,70	0,16																	9,42
II	26,096	1,00	4,00	30,15	240,72	210,57	61,74	15,59	45,17	0,70	0,29																	10,82
III	53,192	1,00	4,00	10,57	210,57	200,00	68,77	15,59	51,67	0,70	0,81																	5,12
ГОД	1063,79	12,00	48,00	0,00	210,57	200,00	1123,79	206,71	878,36	8,40	23,72																	

Контроль невязки баланса: 6,60

Параметры батиграфической и объемной функций створа

отм-дне у впадины	133,24	м	alfa	13,72
k	0,1892	-	beta	115,182
m	2,2433	-		
n	24,16	м³/с		
q	2,3218			
отм-дне в паводки	133,24	м		

$\omega = k \cdot (V - V_{\text{дня}})^m$   
 $V = \int_0^{V - V_{\text{дня}}} \omega(h) dh$ , где  $h = V - V_{\text{дня}}$   
 $V = \frac{k(V - V_{\text{дня}})^{m+1}}{m+1}$   
 $V_{\text{вс}} = \left[ \frac{V \cdot (m+1)}{k} \right]^{1/(m+1)} + V_{\text{дня-вс}}$

Расходная характеристика в НБ

Q <sub>гид</sub>	= n · (V - V <sub>дня-вс</sub> ) <sup>q</sup>
V <sub>вс</sub>	= [Q/n] <sup>1/q</sup> + V <sub>дня-вс</sub>

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию: \$AA55

До:  Максимум  Минимум  Значения: 0

Изменяемые ячейки переменных: \$F\$55:\$F\$16;\$A\$C\$5:\$A\$C\$16;\$A\$A\$55

В соответствии с ограничениями:

- \$Z\$55 <= \$A\$A\$55
- \$H\$55:\$H\$16 >= \$N\$55:\$N\$16
- \$V\$55:\$V\$16 >= \$V\$Z\$22
- \$H\$55:\$H\$16 >= \$Z\$255
- \$A\$C\$5:\$A\$C\$16 >= 0
- \$A\$A\$55 >= 0
- \$F\$F\$17 = 0
- \$F\$55:\$F\$16 <= \$A\$B\$55
- \$F\$55:\$F\$16 >= \$A\$B\$55
- \$H\$55:\$H\$16 <= \$A\$A\$55

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Метод решения: Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Найти решение

Модуль предназначен для проектного обоснования режима и параметров водохранилищ водохозяйственных систем. Позволяет хранить информацию о водохозяйственном и водно-энергетическом потенциале водохранилищ. Функциональные возможности: многократные имитационные прогоны модели с меняющейся информационной основой.

Гидрограф расчетного года моделируется с использованием гамма-распределения (гамма-обратное) на основании следующих параметров:

- *среднегодовой сток (F29)*
- *коэффициент вариации G29*
- *обеспеченность расчетного года (H43)*
- *типовое внутригодовое распределение (G31:G42)*

Водопотребление задается гидрографом требований (I31:I42);

возвратные воды (K31:K42);

комплексный попуск (L31:L42);

слой испарения с водной поверхности (X5:X16)

слой испарения с суши (Y5:Y16)

минимальная среднемесячная мощность (V22)

Коэффициенты для моделирования батиграфической и объемной функций (C25), (C26)

Коэффициенты для моделирования кривой расходов в нижнем бьефе (C27), (C28)

Отметка дна у плотины (C24)

Отметка дна в нижнем бьефе (C24)

Увеличение расходов ГЭС сверх установленных в комплексном попуске (AC5:AC16) – *в первом приближении лучше задать в равномерном режиме*

Мертвый объем (Z5)

Минимальный мертвый объем, установленный из условий заиления, нормальной работы водозаборных сооружений, с учетом санитарно-экологических требований (Z6)

Полный объем (AA5) – *в первом приближении задается по опыту проектирования, не меньше мертвого объема.*

Регулирование стока: (+) сработка (-) аккумуляция (*F5:F16*) - в первом приближении задается по опыту проектирования или равным 0.

Расчет выполняется при обращении к процедуре поиска решения:

Данные → поиск решения

Результаты решения (если оно найдено):

*(F5:F16)* – режим регулирования

Соответствующие значения составляющих сведенного водохозяйственного баланса, водно-энергетических показателей ГЭС (мощность и выработка электроэнергии)

*(AC5:AC16)* – увеличение попуска

*AA5* – значение целевой функции.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты апробации научно-квалифицированной работы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022620799

## «Особенности коммунально-бытового хозяйства как участника водохозяйственного комплекса»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Раткович Лев Данилович (RU), Муалла Манхаль (SY)*

Заявка № 2022620633

Дата поступления 31 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 15 апреля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



# СЕРТИФИКАТ

за участие

в VI Всероссийском научно-практическом семинаре  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРАВЛИКИ  
И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА»,  
посвященном 120-летию со дня рождения  
Андрея Васильевича Михайлова, 24 мая 2023 г.

с докладом «Оценка водообеспеченности в речном  
бассейне на основе обобщенных критериев покрытия  
водопотребления»

Авторы: Муалла Манхаль,  
Раткович Лев Данилович

Директор ИГЭС НИУ МГСУ  Н.А. Анискин





НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



**МОСВОДОКАНАЛ**

Конкурс научно-исследовательских работ обучающихся в  
области водоснабжения и водоотведения

# ДИПЛОМ

за

## II Место

В НОМИНАЦИИ

*Подготовка питьевой воды*

Тема НИР: **Разработка технологии очистки артезианской воды  
с целью снижения коррозии трубопроводов и оборудования**

Автор: **Муалла Манхаль**

Проректор  
НИУ МГСУ



**Е.С Гогина**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

## СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

*Всероссийской с международным участием научной конференции  
молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня  
рождения Н.Н. Худякова*

*Выдан*

**Муалла Манхаль -**

*за доклад на тему*

Технологические схемы очистки гальванической  
промышленной воды в замкнутых циклах

*на секции*

Актуальные вопросы природообустройства и  
водопользования

Ректор, Академик РАН, д.с.-х.н. *Грухачев* В.И. Грухачев  
профессор, д.э.н., профессор,  
председатель ассоциации  
«Агрообразование»



Москва, 7-9 июня 2021 г.