

МУАЛЛА МАНХАЛЬ

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

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена на кафедре гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Раткович Лев Данилович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры гидравлики, гидрологии и управления
водными ресурсами ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА
имени К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты **Фролова Наталья Леонидовна**,
доктор географических наук, профессор, заведу-
ющая кафедрой гидрологии суши географическо-
го факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

Ильинич Виталий Витальевич,
кандидат технических наук, профессор, старший
научный сотрудник отдела мелиоративно-
водохозяйственного комплекса ФГБНУ «ФНЦ
ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ)

Защита состоится 25 февраля 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, учебный корпус №28, аудитория 201, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета <http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Мартынова Наталья Борисовна

Общая характеристика работы

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 водо и энергоотдачи водохранилищ – одна из наиболее актуальных задач проектного обоснования водохозяйственных проектов. Настоящие исследования направлены на формализацию задач, связанных с оценкой водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала водохранилищ и разработку имитационных моделей водохозяйственного баланса применительно к различным схемам водохозяйственных систем.

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 Блохиным 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), Асариным 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). В то же время ряд вопросов остаются не до конца разработанными, либо не имели ранее достаточных инструментов для более обоснованных решений. 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.

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

п. 7. Водоохранилища 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 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 и моделирования батиграфических функций, исследуется система критериев покрытия водопотребления.

Объект исследований – водохранилища в составе водохозяйственных систем территориально - временно́го 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 функций 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 водоотдачи 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.

Методология и методы 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 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) функций в створе гидроузла и их влияние на величину водно-энергетического потенциала водохранилищ

- необходимость использования альтернативных источников водоснабжения 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 водоотведение, 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, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы исследований, цель и задачи диссертации, методика исследований, позиции научной новизны, теоретической ценности и практической значимости результатов, описана структура и указан объем диссертационной работы.

В первой главе анализируются проблемы водообеспечения в современном мире и в обозримой перспективе. Рассматриваются проблемы дефицита водных ресурсов, качества вод и методы водоподготовки. Анализируются мероприятия по рациональному водопотреблению, существующие классификации водохранилищ и их роль в решении водохозяйственных проблем.

Россия благодаря потенциалу природных ресурсов является одним из лидеров 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. Анализ и оценка изменений речного стока последних десятилетий исследованы в работах В.Ю. Георгиевского, Н.И. Коронкевича, Г.Х. Исмайлова, А.В. Фролова, Н.Л. Фроловой, Р.Г. Джамалова, С.А. Журавлевой, других ученых.

Водораспределение внутри водохозяйственного комплекса осуществляется с учетом приоритетности и критериев удовлетворения требований между различными отраслями, при условии сохранения экологических требований водных и околородных экосистем. Одновременно повышается необходимость разработки методов надежного определения гарантированных ресурсов. В диссертации анализируются методы водоподготовки и влияние хозяйственной деятельности на экологию речного бассейна. Рассматриваются принципы и мероприятия рационального водопользования как необходимый фон для проектирования водохозяйственных систем, связанных с регулированием и территориальным перераспределением стока.

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. Водо-

хранилища являются важнейшим звеном практически любого водохозяйственного комплекса и связаны с множеством факторов, определяющих их функционирование: водный режим и режим управления водными ресурсами, морфометрические характеристики, русловые процессы, влияние водохранилищ на окружающую среду, социально-экономические условия. При многоцелевом использовании водохранилищ удовлетворение в полном объеме требований всех компонентов водохозяйственных комплексов практически невозможно. Поэтому режимы использования таких водохранилищ представляют собой, как правило, компромиссные решения вследствие межотраслевых противоречий в запросах на водные ресурсы.

Нередко в XX – XXI веках строительство водохранилищ, особенно крупных, создают новые международные проблемы. Характерным примером является река Евфрат с площадью водосбора более 650 тыс. км² с неполной определенностью в оценке водных ресурсов. Тигр и Евфрат (рис. 1) приходят из Турции и являются основным источником водоснабжения десятков миллионов человек.

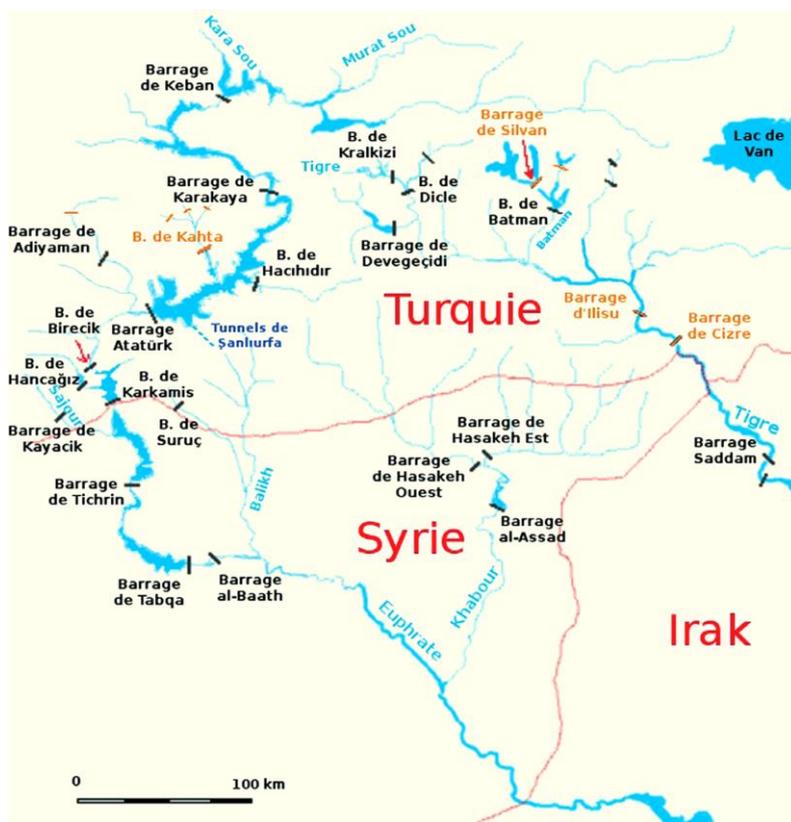


Рисунок 1. Существующие (выделено черным цветом) и проектируемые, либо строящиеся, гидроузлы (выделено желтым цветом).

Ситуационный план на рисунке 1 отражает существующий уровень зарегулированности стока Евфрата и его влияние на трансграничные проблемы, связанные с совместным использованием водных ресурсов региона. 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. Главная водная проблема Сирии заключается в дефиците воды, усугубляемом периодами засухи и, конечно, последствиями гражданской войны. Сложность использования комплексных водохранилищ обусловлена межотраслевыми противоречиями и несовпадением требований к водным ресурсам. В 1989 г. подписано соглашение о совместном водопользовании, подтверждающем транзит Евфрата на границе Турции с Сирией в размере $500 \text{ м}^3/\text{с}$, из которых $210 \text{ м}^3/\text{с}$ резервируется для Ирака.

Опираясь на доступную информацию, мы сделали оценку реальной величины водных ресурсов Евфрата на границе с Сирией, используя данные о стоке международной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии. Экспертная оценка ситуации выполнена в соответствии с методикой многолетнего регулирования стока (п. 4.2 диссертации). Синяя кривая (аналитическая) соответствует естественному стоку, наложенная серая кривая показывает зарегулированный сток в трансграничном створе (рис. 2). Как следует из графика, при оптимистичном сценарии транзит в Сирию составляет в среднем $20\text{-}22 \text{ км}^3$ в год. В остро-маловодные годы цифры транзита снижаются до $12\text{-}16 \text{ км}^3$. В этом случае, обязательства Турции в расчетные маловодные периоды, напрямую зависят от водопотребления на территории Турции. Для детального анализа необходима дополнительная информация о водопотреблении и потерях из водохранилищ на дополнительное испарение.

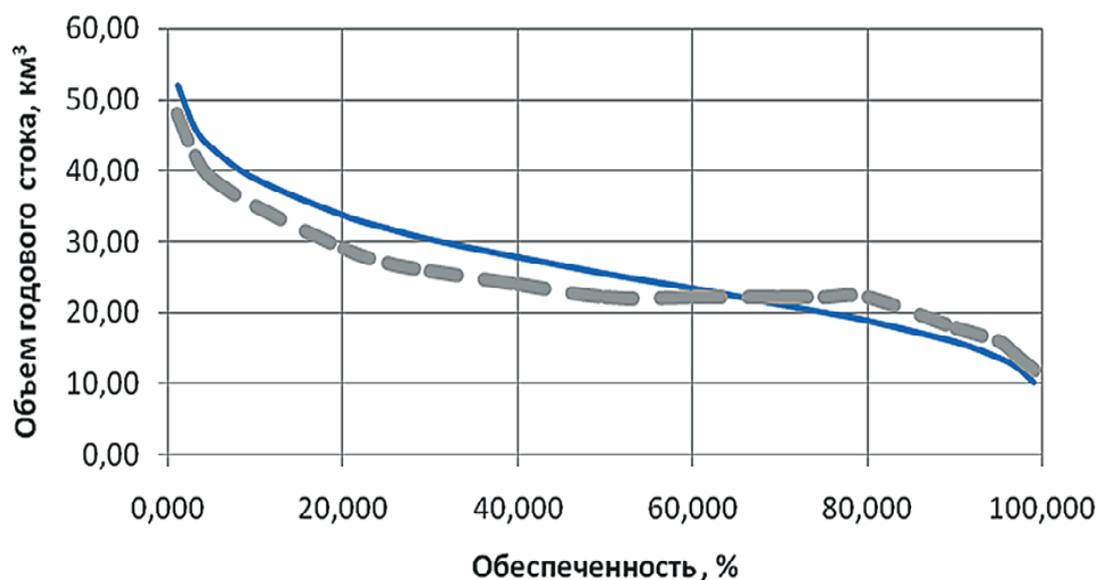


Рисунок 2. Совмещенные кривые обеспеченности стока Евфрата

Необходимая для инженерно-гидрологических расчетов информация о по-

терях на дополнительное испарение с зеркала водохранилища и фильтрацию оказывают значительное влияние на результаты водохозяйственных расчетов. Зависят названные потери в значительной степени от характера морфометрических функций. Батиграфическая $\omega(\nabla)$ и объемная $V(\nabla)$ кривые в области влияния на эффективность регулирования стока достаточно хорошо аппроксимируются степенными функциями отметок и глубин. Приведенные ниже зависимости позволяют пересчитывать объемы и площади в отметки (глубины) и обратно (1). Благодаря этому подсчет значений водохозяйственных и водно-энергетических показателей выполняется в форме гладких функций для имитационных и оптимизационных экспериментов.

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

где: $\omega(\nabla)$ – площадь зеркала водохранилища на отметке ∇ , м² ;

∇ – абсолютная отметка наполнения, м;

∇_0 – отметка дна

где: k и m – параметры функции, подбираемые по имеющейся характеристике рельефа методом среднеквадратического сглаживания в диапазоне влияющих отметок.

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

$$V(\nabla) = k \cdot \frac{(\nabla - \nabla_0)^{m+1}}{m+1} ; \nabla = \left[\frac{V(\nabla) \cdot (m+1)}{k} \right]^{1/(m+1)} + \nabla_0 \quad (2)$$

где: $V(\nabla)$ – объем водохранилища на отметке ∇ , м³.

Имея функциональные выражения для морфометрических функций, 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. Вид функций для разных по масштабам объектов иллюстрируются в диссертации.

В третьей главе рассматриваются альтернативные источники водоснабжения, анализируются особенности и технологии их применения. 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 дополнительного резерва для покрытия дефицитов в условиях маловодья. Рассмотрены наиболее распространенные альтернативные источники водоснабжения: местные ресурсы водосбора, повторное использование сточных вод, деминерализация дренажных стоков, опреснение соленых морских вод, некоторые другие.

Использование местных ресурсов водосбора (ИМРВ) - технология аккумуляции разных форм осадков в естественных или искусственных резервуарах. Опираясь на местные ресурсы, можно снизить зависимость от импортируемых источников воды и продвигать более надежные методы управления водными ресурсами. На эффективность мероприятий влияют характеристики ландшафта, технология рыхления, параметры сооружений для аккумуляции стока. При определении территориальных показателей поверхностного стока требуется надежная оценка всех составляющих водного баланса, что в свою очередь зависит от размеров и формы водосбора и инженерно-физических характеристик.

Актуальным и перспективным альтернативным источником водоснабжения является повторное водопользование, в частности, повторное использование городских сточных вод для промышленности и энергетики, животноводческих стоков для орошения. С этим подходом связаны различные технические, экономические и социальные проблемы. В настоящее время созданы альтернативные технологии очистки и дезинфекции для снижения уровня содержания микробов и токсинов при сравнительно малой стоимости. Суммарный объем муниципальных сточных вод, которые повторно используются для орошения, варьируется в зависимости от региона и страны. Около 10% мировых сельскохозяйственных земель орошаются сточными водами. В таких регионах, как Ближний Восток и Северная Африка, сточные воды могут покрывать до 50% потребности сельскохозяйственных угодий.

Альтернативное водоснабжение включает использование дренажных вод путем обессоливания. Удаление солей и других минералов для орошения или других целей, предоставляет дополнительный источник пресной воды. Подход осуществляется посредством ионного обмена, обратного осмоса или дистилляции. Деминерализованную воду можно использовать для орошения или других целей, сокращая воздействие сельскохозяйственной деятельности на природные воды и подземные водоносные горизонты. Технологии очистки, используемые для обессоливания, могут требовать значительных инвестиций в инфраструктуру и техническое обслуживание, поэтому важно обеспечить эффективность процесса деминерализации и контроля качества.

Опреснение соленых морских вод включает в себя удаление соли и других минералов из морской воды с использованием различных технологий очистки, в том числе обратного осмоса и термической дистилляции. Технология представляется надежным альтернативным источником водоснабжения.

Экономическая эффективность традиционных источников воды оценивается путем анализа общей стоимости проекта водоснабжения, включая затраты на добычу водных ресурсов, очистные мероприятия и сооружения, распределение финансовых средств. Сравнение затрат традиционных с альтернативными источ-

никами в каждом конкретном проекте определяет экономически эффективные стратегии водообеспечения. Необходимо реализовать меры по контролю загрязнения, экологической реабилитации водных объектов. На основании анализа собранной информации в диссертации получены таблицы производительности и стоимости воспроизводства кубометра воды по ряду стран для сравнения вариантов совместного использования традиционных и альтернативных источников водоснабжения. Хотя традиционные источники воды по-прежнему доминируют в экономике стран, важна научная поддержка внедрения новых подходов в области альтернативного водоснабжения.

Четвертая глава посвящена методам оценки гарантированных водных ресурсов. Рассматриваются случаи независимого и компенсированного регулирования стока. Анализируются критерии удовлетворения требований водопользователей и предлагается наиболее универсальная система критериев на основе метода «трех групп».

Гидролого-водохозяйственный гидроэнергетический потенциал реки оценивается в соответствии с теорией и практикой водохозяйственных (ВХР) и водно-энергетических (ВЭР) расчетов, иллюстрацией к которым являются водохозяйственные балансы. Основой для принятия решений являются главным образом перспективные водохозяйственные балансы, которые отражают реализуемые водохозяйственные и водоохраные мероприятия. Наиболее общую форму баланса водохозяйственного участка для принятого расчетного интервала времени можно представить в виде уравнения (3) для оценки результата баланса W_B .

$$W_B = F_p + L_{inf} + W_{in-gw} \pm \Delta F_{pa} \pm \Delta Dot_{ext} + \sum_1^k R w_i - \sum_1^k W r_i - Cr - L_{rf} \pm \Delta V - L_{sum} \quad (3)$$

где: F_p - приток к входному створу водохозяйственного участка;

L_{inf} - боковая приточность на участке; W_{in-gw} - подземный водозабор;

L_{rf} - сокращение речного стока вследствие изъятия подземных вод;

ΔF_{pa} - антропогенное изменение речного стока; ΔDot_{ext} - дотация воды из внешних бассейнов, локальных внутрибассейновых перебросок, а также за счет альтернативных водоисточников водоснабжения;

$\sum_1^k W r_i$ - отраслевое водопотребление; Cr - комплексные попуски с учетом санитарно-экологических требований;

$\sum_1^k R w_i$ – суммарные возвратные воды на участке; ΔV - регулирование стока выражается в уравнении сработкой (+), либо аккумуляцией воды в водохранилище (-);

L_{sum} - суммарные потери из водохранилища на дополнительное испарение L_{ev} , ледообразование L_{ice} и фильтрацию L_{seep} .

Если результат баланса неотрицательный ($W_B \geq 0$), то дефицит $D=0$, а резерв водных ресурсов $Res = W_B$ и наоборот. Размерность величин, входящих в уравнение в зависимости от решаемой задачи, может быть разной, либо кубомет-

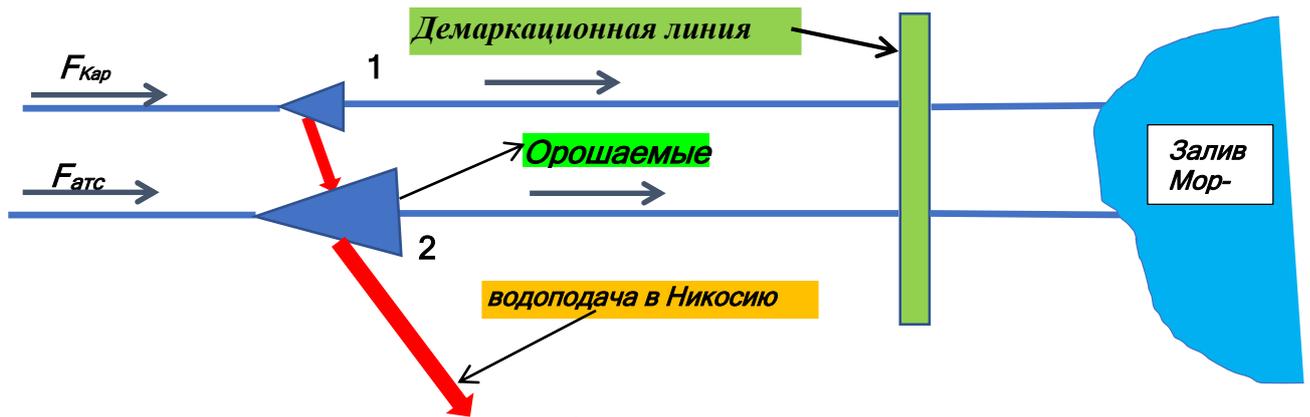
ры (м^3 , тыс. м^3 , млн. м^3), если оцениваются объемы воды, либо $\text{м}^3/\text{с}$, если баланс выполняется в расходах.

Цель водно-энергетических расчетов заключается в обосновании энерго-экономических параметров и целесообразности гидроэлектростанций, как независимых, так и работающих в каскадном режиме энергетических систем. Главными показателями являются гарантированная и установленная мощность, размещение ГЭС или ГАЭС в графике нагрузки энергосистемы. Водохозяйственные расчеты оперируют объемами воды. Водно-энергетический анализ, формально также относящийся к области водохозяйственных расчетов, использует понятия гарантированной мощности и выработки электроэнергии, причем мощность ГЭС определяется произведением напоров и расходов. По этой причине объединить оба вида водопотребления по объему используемой воды нельзя. Нужно формировать универсальную систему критериев удовлетворения требований.

Определяющее влияние на результаты расчетов оказывают коэффициент вариации притока и обеспеченность покрытия P , которую мы назначаем сами. Влияние параметра P на зависимость «емкость – отдача» исследована при коэффициенте вариации $C_v = 0,4$. Как выяснилось, многолетние емкости водохранилища в интересующем диапазоне отдач $\alpha = 0,8-0,9$ могут различаться в несколько раз. Очевидно, что критериальная составляющая в ходе водохозяйственного обоснования является решающей, поскольку определяет параметры сооружений.

Различия в требованиях водопользователей, характерные для российской проектной практики, наиболее наглядно представлены в бассейне реки Дон в зоне влияния Цимлянского водохранилища. Регулирование стока осуществляется для множества целей, в том числе хозяйственно питьевого водоснабжения миллионов людей, орошения около 200 тысяч гектар, транспортно-энергетические и рыбохозяйственные попуски. Пример ЦГУ интересен множеством участников водохозяйственного комплекса, масштабами водных потоков, измеряемых десятками кубокilометров.

Вопрос комплектации требований и приведения их к эквивалентной модели формулируется аналогично и для малых по масштабам объектов, таких, к примеру, как бассейн реки Клариус (в прошлом Кариотис) в республике Кипр. Эта маленькая река, длиной всего 27 км и объемом стока 18 млн. $\text{м}^3/\text{год}$ также несет на себе бремя комплексного водопотребления, причем в условиях многолетнего компенсированного регулирования. Проект водохозяйственной системы выполнялся группой советских специалистов в 90 – е годы прошлого столетия. Схема запроектированной в конце прошлого века водохозяйственной системы показана на рисунке 3. В качестве критериев была принята английская система, оперирующая не обеспеченностями конкретных величин, а вероятностями диапазонов значений, попадающих в зону ограничений.



- 1- водозаборный гидроузел на Clarios
 2- водохранилище Айос – Теодорос многолетнего регулирования

Рисунок 3. Линейная балансовая схема ВХС «Кариотис»

Для каждой из сельскохозяйственных культур закладывались критерии по максимальному снижению водопотребления и по критерию надежности « R » для всех потребителей, измеряемая количеством гарантированной воды в долях многолетней водоотдачи. Суть проекта заключалась в том, чтобы путем регулирования стока реки Кариотис гарантировать часть ресурса для подачи в столицу острова Никосию в 50 км от гидросистемы.

Как следует из вышеизложенного, фактор неоднозначности критериев является одинаково значимым для объектов с соотношением водных ресурсов 18 млн. м³ и 21 млрд. м³ 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 было очевидно, что весь набор водопользователей можно разделить на три группы по значимости и приоритету. В первую группу P_1 (приоритетные пользователи) входят пользователи, чьи потребности в воде считаются необходимыми для выживания человека и основных социальных функций. 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. 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.

Конкретные критерии классификации пользователей и приоритет, отдаваемый каждой группе, могут различаться в зависимости от местных правил, наличия воды и общественных ценностей. Предлагаемая система критериев с учетом отечественного и зарубежного опыта может рассматриваться как относительно универсальная. В качестве суммарного значения гарантированного ресурса за

многолетие используется критерий надежности R (*Reliability*).

$$R = \frac{\sum_1^N (A_{\text{пр}} - D_i)}{A_{\text{пр}} \cdot N} \cdot 100\% \quad (4)$$

Критерий гарантии $P(D \leq D_{\text{max}}^i) = P_i$, где P_i – вероятность того, что дефицит i – ой группы водопользователей не превысит максимального значения D_{max} . Обеспеченность P_i диапазона значений устанавливается с учетом опыта проектирования гидротехнических и мелиоративных объектов.

В пятой главе представлен алгоритм моделирования водохозяйственного баланса применительно к различным схемам использования водных ресурсов. Разработаны версии имитационно-оптимизационного моделирования в среде Excel с учетом рекомендуемой системы критериев покрытия водопотребления на основе метода трех групп. Показана общая постановка, а также балансовые модели разных водохозяйственных объектов, отражающие особенности участников водохозяйственного комплекса. Располагая описанием морфометрических зависимостей, мы получаем возможность для аналитического вычисления текущих значений потерь из водохранилища, определения мощности ГЭС и выработки электроэнергии в расчетные периоды времени. Основное внимание уделяется совмещению критериальной части задачи с моделирующим алгоритмом поиска оптимального решения. Применительно к системе с одним водохранилищем предлагается система уравнений и ограничений, сочетающая балансовые соотношения с элементами оптимизации.

Принципиальная разница в подходах с традиционной методики заключается в том, что затребована обеспеченность не конкретной величины, а диапазона значений, что следует считать более корректным подходом. Запись в системе (5) представлена в обобщенной форме моделирующего алгоритма. Принимая во внимание слишком большую для программы «solver» размерность задачи при многолетнем регулировании, разработанный моделирующий алгоритм ориентирован на сезонное регулирование, что не меняет сути методики. Описанный 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. Модель апробирована на реальных объектах. Характерным примером для анализа водоотдачи является Пензенское водохранилище, образованное Сурским гидроузлом (рис. 4).

$$\left\{ \begin{array}{l} Wb_{j,i} = F_{j,i} \pm \Delta V_{j,i} - Wr_j ; \\ V_{j,i} = V_{(j-1),i} + \Delta V_{j,i} ; \\ 0 < V_{j,i} < V_{max} ; \text{диапазон возможных значений наполнения} \\ \sum_{i=1}^N, \sum_{j=1}^m \Delta V_{j,i} = 0 ; \text{сумма значений "сработка - наполнение" за многолетие} \\ P_k(D \leq D_{max}^k) \geq P_{k,req}, k = 1, 3 \\ R \geq R_{req} ; \\ \alpha = \frac{\sum_{i=1}^N, \sum_{j=1}^m A_{j,i}}{F_{cp}} \rightarrow \max - \text{функционал, где } A_{j,i} \text{ суммарная полезная водотдача,} \\ \text{включая водопотребление и целевые попуски} \end{array} \right. \quad (5)$$

Выражение $P_k(D \leq D_{max}^k) \geq P_{k,req}$ – означает вероятность того, что дефициты к-ой группы водопользователей не превысят заданных максимальных ограничений.

Назначение системы объекта - решение проблемы комплексного водоснабжения городов Пензы и Заречного (город спутник), многих промышленных предприятий. 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.



Рисунок 4. Генплан Пензенского гидроузла

Смысл системы (5) состоит в том, чтобы варьируя переменными регулирования ΔV_j , и отметкой мертвого объема V_{MO} найти такие их значения, при которых отсутствуют дефициты водопотребления, объем водохранилища $V_{полн}$ достигает минимально-достаточного значения, а минимальная среднемесячная гарантиро-

ванная мощность $N_{\text{гар}}$, будет не менее заданной. Серия расчетов позволила построить анализирующие зависимости $V_{\text{полн}} = \varphi(N_{\text{гар}})$ для технико-экономического сравнения вариантов. Версия модели для Пензенского водохранилища описывается системой (6). Листинг программного модуля для системы (6) приведен на рисунке 5. Отметка УМО при одной и той же полной емкости водохранилища определяет и мощность ГЭС, и объем гарантированной отдачи.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_j = S_j \pm \Delta V_j - W_{\text{req},j}, \text{ где } j \text{ расчетный интервал, ВХБ;} \\ W_{\text{req},j} = W_{\text{кбх},j} + W_{\text{пром},j} + W_{\text{ор},j} + W_{\text{кп},j} + W_{\text{пот},j} - \text{ комплексное водопотребление} \\ B_j \geq 0 \text{ обнуление дефицитов; компл. попуск } W_{\text{кп},j} = \max\{W_{\text{сан},j}, W_{\text{рх},j}, W_{\text{эн},j}\}; \\ \nabla_j \geq \nabla_{\text{взб},j}; \text{ условия нормальной работы водозаборов по уровням НБ;} \\ V_j = V_{j-1} + \Delta V_j \text{ наполнение в } - \text{ ща на конец расчетного интервала;} \\ V_{\text{мо}} \leq V_j \leq V_{\text{полн}} \text{ регулирование в пределах емкости в } - \text{ ща;} \\ \sum_{j=1}^N \Delta V_j = 0 \text{ условие сезонного регулирования; } \pm \Delta V - \text{ значения сработки и наполнения} \\ N_j = 9,81 \cdot Q_j \cdot H_j; \text{ } \mathcal{E}_j = N_j \cdot T_j - \text{ мощность и выработка энергии на ГЭС;} \\ \text{for var } \{\Delta V_j, \nabla_{\text{мо}}\}, \quad N_{\text{гар}} \geq N_{\text{min}} \rightarrow V_{\text{плн}} \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (6)$$

Если мы хотим получить решение с максимальной энергоотдачей, фиксируем $V_{\text{плн}}$ и заменяя в алгоритме системы последнюю функциональную строку, получаем следующее выражение:

$$\text{for var } \{\Delta V_j, \nabla_{\text{мо}}\}, N_{\text{гар}} \rightarrow \max \quad (7)$$

В диссертации рассмотрены также версии имитационной модели для компенсированного регулирования стока. Показано, что в зависимости от модели баланса в качестве компенсатора может быть как незарегулированная боковая приточность, так и подземные воды в режиме совместного использования. При изменении постановки задачи, ориентируясь на максимальное развитие орошения в соответствии с упомянутым планом, снова меняем алгоритм в последней строке (8).

$$\text{for var } \{\Delta V_j, \nabla_{\text{мо}}, W_{\text{ор}}\}, N_{\text{гар}} \geq N_{\text{min}} \rightarrow W_{\text{ор-год}} \rightarrow \max \quad (8)$$

Результаты моделирования водохозяйственного баланса иллюстрируются таблицей 1. Модельные исследования показали, что существующий режим управления водными ресурсами Пензенского водохранилища не соответствует его возможностям. Целесообразно повышение отметки мертвого объема для увеличения энергоотдачи ГЭС, не сокращая водоотдачи водохранилища на другие отрасли и позволяет получить дополнительную энергетическую мощность.

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС В СТВОРЕ СУРСКОГО ГИДРОУЗЛА

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 _n	U	L	Рачетные требования к водным ресурсам	Дефицит	Резерв	отметка ВБ, м	отметка НБ, м	Напор, м	Средний напор, м	Q _{ГЭС} , м ³ /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	
																			Ммин	2360,00	1699,20
					Контроль невязки баланса:	7,64				Агар	1029,41								Эсут-об	56,64	МВТ*час
						7,64														20674	мвт*час

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация ориентирована на решение задач, связанных с оценкой гидроэнергетического потенциала водохранилищ с учетом альтернативных источников водоснабжения. 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. 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.

По результатам диссертационных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. При создании водохозяйственных систем 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 ориентированы на 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 комплексного назначения. Модели, разработанные в диссертации, являются инструментом для оценки компромиссов, рисков и определения оптимальных стратегий для достижения водно-энергетического баланса. Совершенствование методов оценки водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала водохранилищ направлено на повышение качества управления водно-энергетическими ресурсами речных бассейнов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Раткович, Л.Д. Аспекты распределения водных ресурсов трансграничных рек / Л. Д. Раткович, Муалла Манхаль, Н. В. Сафонова, Д. В. Агеев // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 92-101. – DOI 10.26897/1997-6011-2021-2-92-101. – EDN BHRJNW.
2. Раткович, Л.Д. Оценка водохозяйственного и гидроэнергетического потенциала реки на основе имитационного моделирования водохозяйственного баланса / Л.Д. Раткович, И.Г. Исмайлова, Ю.А. Бовина, С.Н. Щёголева, Муалла Манхаль // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 83-92. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-5-83-92. – EDN OYTHIP.
3. Раткович, Л.Д. Моделирование гидрографа максимального стока как часть задачи трансформации паводка через гидроузел / Л. Д. Раткович, Ю. А. Бовина, С. А. Соколова, Муалла Манхаль // Природообустройство. – 2023. – № 5. – С. 66-72. – DOI 10.26897/1997601120235-66-72. – EDN PWLJCS.
4. Муалла Манхаль. Оценка водообеспеченности в речном бассейне на основе обобщённых критериев покрытия водопотребления / Муалла Манхаль, Л. Д. Раткович // Гидротехническое строительство. – 2023. – № 10. – С. 42-47. – EDN EJLIRP.
5. Раткович, Л.Д. Оптимизационный алгоритм управления водными ресурсами водохранилищ для обоснования диспетчерских графиков / Л.Д. Раткович, С.А. Соколова, Муалла Манхаль // Природообустройство. – 2024. – № 4. – С. 99 -107.

В изданиях международных баз Scopus или WoS:

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

Патенты и свидетельства

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620799 Российская Федерация. Особенности коммунально-бытового хозяйства как участника водохозяйственного комплекса: № 2022620633: заявл. 31.03.2022: опубл. 15.04.2022 / Л. Д. Раткович, Муалла Манхаль; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

Публикации в журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций:

7. Муалла Манхаль. Конструкция мембранного биореактора для повторного использования воды / Муалла Манхаль // Материалы Международной научной конференции профессорско-преподавательского состава, посвященная 125-летию со

дня рождения В.С. Немчинова, Выпуск 292. Часть II, 2020. – С. 203-207.

8. Муалла Манхаль. Технологические схемы очистки гальванической промышленной воды в замкнутых циклах / Муалла Манхаль, М.С. Али // Материалы Всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. Том 1. Москва, 2021. - С. 260-264.

9. Муалла Манхаль. Оценка водообеспеченности в речном бассейне на основе обобщенных критериев покрытия водопотребления / Муалла Манхаль, Л. Д. Раткович // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: Сборник тезисов докладов VI Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 24 мая 2023 года. – Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2023. – С. 158-159. – EDN LOSBOJ.