

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

**ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.С. ОСИМИ**

УДК:621.311

На правах рукописи



**РАДЖАБЗОДА МИРЗОШАРИФ ШАРИФ
(РАДЖАБОВ МИРЗОШАРИФ ШАРИФОВИЧ)**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС
ВАХШСКОГО КАСКАДА С ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ
РОГУНСКОЙ ГЭС**

Диссертация на соискание учёной степени доктора философии
(PhD) - доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика
(6D071804 – Энергетические системы и комплексы)

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Султонзода Ш.М.

Душанбе – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	10
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ГЭС ВАХШСКОГО КАСКАДА.....	16
1.1 Анализ и обзор методов оптимизации в энергетике	16
1.1.1 Классификация методов оптимизации	17
1.1.2 Классические методы оптимизации	19
1.1.3 Метаэвристические методы оптимизации	28
1.1.4 Методы оптимизация на основе машинного обучения	34
1.2 Постановка задачи управления режимами работы ГЭС в каскаде Вахш	39
1.2.1 Особенности каскада ГЭС в электроэнергетических системах	39
1.2.2 Описание объекта исследования. Особенности каскада ГЭС на реке Вахш	47
1.2.3 Анализ режимов ГЭС каскада Вахш	53
1.2.4 Режимы работы Рогункой ГЭС в ЭЭС РТ.....	57
1.2.5 Влияние изменения климата на гидроэнергетику Таджикистана и меры адаптации.....	69
1.3 Выводы по первой главе	73
ГЛАВА 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕКИ ВАХШ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РОГУНСКОЙ ГЭС	75
2.1. Регулирование речного стока	75
2.2. Основы прогнозирования речного стока.....	85
2.3. Моделирование гидрологических временных рядов	89
2.4. Прогнозирование стока реки Вахш для назначения оптимальных режимов Рогунской ГЭС.....	94
2.5. Разработка программы для прогноза стока реки Вахш методом машинного обучения.	101
2.6. Выводы по второй главе.....	116

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС ВАХШСКОГО КАСКАДА С ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ РОГУНСКОЙ ГЭС.....	118
3.1. Методика диспетчерского управления режимами ГЭС.....	118
3.2. Разработка диспетчерских графиков для долгосрочной оптимизации режима Рогунской ГЭС	122
3.3. Выводы по третьей главе	129
ГЛАВА 4. ОПТИМАЛЬНОЕ КРАТКОСРОЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ГЭС КАСКАДА.....	130
4.1. Разработка модели каскада Вахшских ГЭС с учетом Рогунской ГЭС	130
4.2. Разработка алгоритма для оптимального управления режимами ГЭС Вахшского каскада с учетом Рогунской ГЭС	145
4.3. Программный комплекс для оптимизации краткосрочных режимов работы ГЭС Вахшского каскада.....	146
4.4. Выводы по четвертой главе	150
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЯ	171

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИНА	- International Hydropower Association
БТ	- Барки Точик
ВБ	- Верхний бьеф
ВИЭ	- Возобновляемые источники энергии
ВХК	- Водохозяйственный комплекс
ВХК	- Водохозяйственный комплекс
ГА	- Гидроагрегат
ГЭС	- Гидроэлектростанция
МО	- Машинное обучение
НБ	- Нижний бьеф
НПУ	- Нормальный подпорный уровень
ОРУ	- Открытое распределительное устройство
УВБ	- Уровень верхнего бьефа
УМО	- Уровень мертвого объема
ФПУ	- Форсированный подпорный уровень
ХОП	- Характеристики относительных приростов
ЭВМ	- Электронная вычислительная машина
ЭВМ	- Электронная вычислительная машина
ЭЭС	- Электроэнергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Устойчивое развитие стран с большими гидроэнергетическими ресурсами, в том числе и Республики Таджикистан связано с гидроэнергетикой, которая на сегодняшний день является самым развитым и основным видом возобновляемым источником энергии (ВИЭ) в мире. Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA) [1], Международной ассоциации гидроэнергетиков (ИНА) [2], Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) [3] и аналитического центра Ember [4] в 2024 году выработка электроэнергии в мире составляла около 30929 ТВт*ч, а доля электроэнергии, выработанной на основе ВИЭ составила 9837 ТВт*ч, что составляет около 31,8%. Из них 14,3% вырабатывается на гидроэлектростанциях (ГЭС). Устойчиво растет и установленная мощность ГЭС в мире, в 2000 году она составляла 702 ГВт, а в 2024 году установленная мощность выросла до 1443 ГВт, вырабатывая 4578 ТВт*ч электроэнергии.

Таджикистан обладает большим гидроэнергетическим потенциалом $527 \cdot 10^9$ кВт*ч/год [5, 6, 14-А], которая в три раза превышает текущее электропотребление всех государств Центральноазиатского региона. При рациональном и комплексном освоении данного потенциала возможно не только удовлетворение внутренних потребностей, но и экспорт экологически чистой и сравнительно дешёвой электроэнергии в соседние страны. Гидроэнергетические ресурсы страны в основном сосредоточены в бассейнах рек Вахш, Пяндж, Амударья, Кофарнихон и Зарафшан. В структуре выработки электроэнергии в стране гидроэнергетика составляет более 95%. В 2024 году в республике за счет ГЭС было произведено около $21 \cdot 10^9$ кВт*ч электроэнергии [18-А].

Достижение энергетической независимости Республики Таджикистан является одной из стратегических целей Правительства. За годы независимости страны было реализовано много энергетических проектов в том числе за последние 20 лет было введено более 2000 МВт новых мощностей

больших и малых ГЭС [8-А, 16-А], включая Сангтудинские ГЭС 1 и 2, ГЭС Себзор, первую очередь Рогунской ГЭС и др.

Гидроэнергетический комплекс Вахшского каскада играет ключевую роль в энергетической системе Таджикистана, обеспечивая более 90% производства электроэнергии страны. Ввод в эксплуатацию Рогунской гидроэлектростанции - крупнейшего энергетического объекта в Центральной Азии, существенным образом меняет функционирование каскада, формируя новые условия для управления как энергетическими, так и водохозяйственными процессами.

Высокая межгодовая и сезонная изменчивость водных ресурсов Вахшского бассейна, усугубляемая изменениями климата, требует разработки более точных и адаптивных моделей для планирования режимов. Традиционные методы оптимизации эксплуатации гидроэнергетических систем зачастую не в полной мере учитывают стохастический характер притока и сложную взаимосвязь между гидрологическими, климатическими и эксплуатационными факторами. В этих условиях возрастает необходимость применения современных вычислительных методов, в частности алгоритмов машинного обучения, которые позволяют учитывать нелинейные зависимости, скрытые закономерности и неопределённости в гидрологическом прогнозировании.

На реке Вахш на сегодняшний день эксплуатируются 8 ГЭС [6], в том числе введена в эксплуатацию первая очередь самой мощной ГЭС в Центральной Азии – Рогунской. Установленная мощность этих ГЭС составляет более 5500МВт, доля выработки электроэнергии в стране на них составляет около 89%.

Правительство Республики Таджикистан усердно введёт работы по завершению строительства Рогунской ГЭС в верховье реки Вахш. Рогунская ГЭС с общей установленной мощностью 3780 МВт станет самой крупной в Таджикистане, со среднегодовой выработкой около 17 млрд. кВт*ч [7]. Рогунская ГЭС на р. Вахш будет обеспечивать наиболее эффективную работу

всего каскада [8]. С вводом этой станции возможно практически полное освоение гидроэнергетического потенциала реки Вахш, а также эффективное регулирование стока бассейна Амударья.

На данный момент введено в эксплуатацию два гидроагрегата Рогунской ГЭС. Первый агрегат мощностью 360 МВт был введен в эксплуатацию 16 ноября 2018 года, второй - мощностью 400 МВт 9 сентября 2019 года. Строительство станции продолжается, третий гидроагрегат планируют ввести в эксплуатацию в ближайшие годы. Также необходимо отметить, что на Головной ГЭС завершена, а на Нурекской ГЭС на сегодняшний день идут работы по реконструкции (реабилитации). Развитие гидроэнергетических мощностей позволит Таджикистану стать региональным лидером в производстве и транзите дешевой и экологически чистой электроэнергии [9].

Учитывая вышесказанное, особая специфика выработки электроэнергии в стране, особенно функционирования ГЭС Вахшского каскада, актуальность приобретает оптимальное управление режимами этих ГЭС в каскаде и в электроэнергетической системе (ЭЭС) республики.

Оптимальное распределение водных ресурсов между ГЭС каскада позволяет повысить выработку электроэнергии. Оптимизация режимов ГЭС можно разделить на долгосрочную (от одного месяца до нескольких лет), среднесрочную (от нескольких дней до месяца) и краткосрочную (от часа до нескольких дней) [10].

Ввод в эксплуатацию Рогунской ГЭС с многолетним регулированием речного стока кардинально меняет структуру и динамику Вахшского каскада, являющегося основой электроэнергетической системы (ЭЭС) Таджикистана. Управление таким сложным техническим комплексом, включающим шесть последовательно расположенных ГЭС с различными регулируемыми способностями стока реки, представляет собой научно – техническую проблему высокой размерности. Она обусловлена:

1. Системной сложностью: необходимостью совместной оптимизации режимов множества гидравлически связанных объектов.

2. Высокой неопределенностью: стохастическим характером основного гидрологического параметра – стока реки Вахш, динамика которого усугубляется изменением климата.

3. Смешанным характером ограничений: наличием линейных, нелинейных и дискретных ограничений.

Существующие методы управления часто не учитывают в полной мере эти факторы, что приводит к потерям потенциальной выработки и снижению надёжности энергоснабжения. Научная проблема заключается в синтезе комплексной методологии, объединяющей методы прогнозирования стохастических временных рядов и детерминированные методы оптимизации для многообъектной системы, с целью максимизации интегрального энергетического эффекта.

Следовательно, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки и внедрения научно обоснованных методов оптимизации режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада, учитывающих особенности многолетнего регулирования, гидрологическую изменчивость и технические характеристики ГЭС. Результаты исследования будут способствовать: повышению эффективности и надёжности функционирования энергосистемы Таджикистана; увеличению выработки электроэнергии; улучшению управления водными ресурсами и снижению риска межсезонных энергетических дефицитов.

Таким образом, разработка комплексной математико-алгоритмической методологии для многоуровневого оптимального управления каскадом в новых условиях является критически важной задачей для энергетической безопасности и устойчивого энергетического развития Республики Таджикистан.

Степень научной разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории, исследования и разработку методов, алгоритмов оптимизации управления режимами ГЭС в электроэнергетических системах внесли коллективы Всесоюзный научно-исследовательский

институт энергетики (ВНИИЭ), Институт систем энергетики имени Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), Московского энергетического института (МЭИ), Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ и ряд других организаций. В последние десятилетия вопросам разработки эффективных методов и подходов к управлению режимами работы гидроэнергетических систем уделялось большое внимание. Существенный вклад в формирование теоретических основ и практических решений в данной области был внесён рядом исследователей, Т.А. Филипповой [11], Е.В. Цветковым [12], Д.А. Арзамасцевым [13], М.Ш. Мисрихановым, Б.И. Аюевым, В.М. Горнштейном, В.И. Обрезковым [14], Ю.А. Секретаревым [15], М.Г. Тягуновым [16], С.Н. Никитиным, А.Ш. Резниковским, М.И. Рубинштейном [17], А.Ю. Александровским [18, 19], А.Г. Русиной [20], П.С. Борща [21], О. Fosso, R.K. Swain, Wang C., Shang L. также отечественных ученых А.Д. Ахроровой [22], Г.Н. Петровым [23], С.Т. Наврузовым [24], А.А. Гулахмадовым [25], Ш.М. Султонзода [26] и т.д.

Связь исследования с программами (проектами) и научными темами. Научные исследования в рамках диссертационной работы соответствуют нормативным требованиям ряда стратегий и программ: Национальной стратегии развития РТ на период до 2030 года (№ 392, от 01.10.2016 г.), Закону РТ об энергетике (№1909, от 19.07.2022 г.), Стратегии развития «Зеленая» экономика в Республике Таджикистан на 2023-2037 годы (№482, от 30.09.2022 г.), Постановление Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, №427 О Плана мероприятий на 2020-2025 годы по реализации объявления 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования», Концепции формирования электронного правительства в РТ (№ 643, от 30.12.2011 г.). Целям устойчивого развития ООН в части обеспечения доступа к недорогой и чистой энергии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель диссертационного исследования – повышение эффективности и надёжности энергосистемы Таджикистана путём разработки и реализации комплекса математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для оптимального многоуровневого управления режимами Вахшского каскада с учётом ввода Рогунской ГЭС.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в данном исследовании были поставлены следующие задачи:

1. Провести системный анализ Вахшского каскада как единого технологического комплекса и выполнить критический обзор методов оптимизации в гидроэнергетике;
2. Разработать и верифицировать модель долгосрочного прогнозирования стока реки Вахш на основе алгоритмов машинного обучения;
3. На основе прогнозных сценариев разработать формализованные диспетчерские графики для долгосрочного управления режимами водохранилища многолетнего регулирования Рогунской ГЭС;
4. Разработать детализированную математическую модель ГЭС Вахшского каскада для задач краткосрочной оптимизации, учитывающее все технические и гидравлические ограничения;
5. Разработать эффективный алгоритм и практический программный комплекс для решения задачи краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС Вахшского каскада с учётом Рогунской ГЭС.

Объектом исследования диссертационной работы являются гидроэлектростанции, работающие в каскаде реки Вахш в новых условиях эксплуатации после ввода в работу Рогунской ГЭС.

Предметом исследования являются математические модели, алгоритмы и программные комплексы для многоуровневого управления режимами ГЭС каскада Вахш, включающие методы прогнозирования, долгосрочной и краткосрочной оптимизации.

Теоретические основы диссертационного исследования. В диссертационной работе для прогнозирования речного стока используются методы, основанные на современных алгоритмах машинного обучения, для долгосрочной и краткосрочной оптимизации режимов каскада ГЭС реки Вахш предложены методы математического моделирования.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Структурирована и формализована оптимальная многоуровневая схема управления режимами ГЭС Вахшского каскада как задача управления сложной технической системой со смешанными ограничениями и стохастическими входными параметрами.

2. В рамках долгосрочной оптимизации: предложена и реализована двухуровневая схема. На первом уровне разработана гибридная модель для прогноза стока реки Вахш на основе машинного обучения, показавшая превосходство над традиционными методами. На втором уровне на основе прогнозных данных разработаны диспетчерские графики для Рогунской ГЭС, формализующие стратегию многолетнего регулирования в виде зон допустимых режимов.

3. В рамках краткосрочной оптимизации: для Вахшского каскада разработана детализированная математическая модель в форме задачи линейного программирования большой размерности, учитывающей гидравлическую связь, совокупность ограничений по уровням, расходам и мощностям для каждой ГЭС, а также три возможных режима работы каждого водохранилища, что порождает до 243 структурных комбинаций режимов для всего каскада.

4. С целью алгоритмического и программного обеспечения поставленных задач разработаны и зарегистрированы специализированные программные комплексы и базы данных, реализующие предложенную методологию: а) «ML-VakhshRiver» для прогнозирования стока реки; б) для краткосрочного управления алгоритм «Оптимизация режимов работы ГЭС Вахшского каскада», реализующий последовательный перебор допустимых

режимов с учётом ограничений, и выбор оптимального по критерию максимума выработки электроэнергии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Архитектура, алгоритмы и результаты работы программного комплекса для долгосрочного прогнозирования стока реки Вахш на основе машинного обучения, обеспечивающего повышенную точность прогноза.

2. Набор диспетчерских графиков для Рогунской ГЭС, являющихся формализацией оптимальной стратегии многолетнего регулирования на основе прогнозных сценариев.

3. Математическая модель, алгоритмы и программный комплекс для краткосрочной оптимизации режимов работы каскада ГЭС, обеспечивающие оптимальное распределение мощности и расходов воды с учётом всех эксплуатационных ограничений по критерию максимизации суточной выработки электроэнергии.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

Теоретическая значимость заключается в развитии методов системного анализа и математического моделирования для управления сложными режимами каскада ГЭС, а также в адаптации методов машинного обучения к задачам долгосрочного прогнозирования стока реки в условиях изменяющегося климата.

Практическая значимость подтверждается внедрением:

- Разработанная на основе машинного обучения программа для прогнозирования стока реки Вахш может быть использована при долгосрочной оптимизации режимов ГЭС и планировании выработки электроэнергии всего каскада.
- Построенные диспетчерские графики позволяют оптимизировать режим сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном временном интервале, которые могут быть применены в ОАО «Барки Точик».

- Предложенный алгоритм и созданное программное обеспечение для оптимизации краткосрочных режимов ГЭС каскада Вахш используются при подготовке студентов и магистров по специальности «Электрические станции» при изучении дисциплин «Оптимизация электроэнергетических систем», «Режимы работы электростанций и электроэнергетических систем» и «Гидроэнергетические установки» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Достоверность результатов: Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы данными, полученными при проведении расчета режимов работы каскада ГЭС реки Вахш. Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, а также использованием современных инструментов программной реализации, включая Delphi и Python. Сопоставление расчётных данных с аналитическими оценками демонстрируют согласованность и непротиворечивость выводов.

Соответствие диссертации по паспорту научной специальности.

Диссертация выполнена в соответствии со следующими разделами Паспорта номенклатуры специальностей научных работников: - по специальности **6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы)**: В диссертации, научные положения связаны с областями исследования специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы). В частности:

пункту-1 – «Разработка научных...» в рамках диссертационного исследования разработаны алгоритмы для краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС каскада Вахш.

пункту-2 – «Математическое моделирование...» в работе создана модель прогнозирования стока реки в долгосрочном режиме и математическая модель каскада реки Вахш для оптимизации краткосрочных режимов.

пункту-10 – «Разработка методов и...» в диссертационной работе разработана программа для прогнозирования стока реки Вахш на основе методов машинного обучения.

Личный вклад соискателя учёной степени в подготовке диссертации выражается в определении целей и задач исследований; выборе методологической и информационной базы; проведении исследований, разработке методик и алгоритмов; разработке программного комплекса.

Апробация реализации результатов исследования. Основные положения диссертации, отдельные ее части, а также результаты исследования докладывались и обсуждались на: International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (Conmechydro - 2021). 1-3 April 2021, Tashkent, Uzbekistan; III научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Наука – основа инновационного развития”, посвященной Дню науки, Году развития туризма и народных ремесел и началу десятилетия “Вода для устойчивого развития” (2018-2028 гг.). Душанбе – 2018; Республиканской научно-практической конференции “Наука – основа инновационного развития” – Душанбе, 2019; Двадцать девятой и тридцатой Международной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (16-18 марта 2023 г. и 29 февраля – 2 марта 2024 г, Москва); Международной научно – практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития», Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. Душанбе. – 2023; Международной научно – практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости» Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими –Душанбе, 07 апреля 2025г; Международной научно-практической конференции «Электротехника, электроника и управление в электротехнических системах: тренды, технологии, исследования», 22-23 апреля 2025г. (Видеоконференция); научных семинарах кафедры

«Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Публикации по теме диссертации. Диссертационная работа нашла отражение в опубликованных автором статьях и докладах. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 7 научных статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РТ, 2 статьи входящих в международные базы данных Scopus и IEEE, 10 публикаций в материалах международных конференций, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 175 страницах, состоит из введения, четырёх глав, заключения. Текст исследования иллюстрирован 47 рисунками, содержит 12 таблиц. Библиографический список включает в себя 131 наименований. В диссертационную работу включено 5 приложений.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ГЭС ВАХШСКОГО КАСКАДА

1.1 Анализ и обзор методов оптимизации в энергетике

Методы оптимизации находят широкое применение в различных областях науки и техники, особенно в задачах управления и планирования функционирования сложных технических и природно-технических систем. Одной из таких систем является энергетика, где оптимизационные подходы используются как для стратегического долгосрочного планирования, так и для оперативного и краткосрочного управления режимами работы электростанций, в том числе гидроэлектростанций, объединённых в каскады. Современные энергетические системы представляют собой иерархически организованные, многоуровневые и взаимосвязанные структуры с высокой степенью сложности, динамичности и неопределённости. Математическое моделирование таких систем, как правило, требует учёта большого количества взаимозависимых параметров, ограничений и условий.

Оптимизацию можно считать практическим инструментом для упрощения и решения линейных и нелинейных формул больших проблем и интерпретации решений. Оптимизация – это эффективный метод поиска ответа, который обеспечивает наилучший результат с наибольшей прибылью и наименьшими затратами.

Сегодня для оптимального использования имеющихся ресурсов, включая водные ресурсы и связанных с ними вопросов, это привело исследователей к использованию различных методов оптимизации по всему миру. Своевременным также является разработка и использовании энергокомплексов для энергообеспечения энерготехнологических процессов (как источник зеленой энергии), как автономный источник в труднодоступных горных районах, где отсутствует централизованное энергообеспечение [3-А].

Методы оптимизации являются шагом вперед в исследованиях исследователей для решения проблем эксплуатации водохранилищ и улучшения управления водными ресурсами в ситуациях нехватки воды.

Особое внимание при оптимизации режимов работы ГЭС следует уделять учёту следующих факторов: сезонной и межгодовой изменчивости водных ресурсов, эксплуатационных ограничений, требований к надёжности энергоснабжения, балансовых ограничений энергосистемы, экологических и трансграничных аспектов.

Таким образом, выбор метода оптимизации и построение соответствующей модели зависит от множества факторов, включая цели управления, доступные данные, горизонты прогнозирования, требования к точности и времени расчёта. В условиях растущей неопределённости, связанной с климатическими изменениями и переходом к «зелёной» энергетике, интеграция классических подходов с современными методами машинного обучения представляется особенно перспективной и актуальной для гидроэнергетики стран Центральной Азии, включая Таджикистан.

1.1.1 Классификация методов оптимизации

Процессы в энергетической системе обычно описываются системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Задачи оптимизации в энергетике могут относиться или к переходным режимам, когда обязательно приходится пользоваться системами дифференциальных уравнений, или к установившимся режимам, когда можно ограничиться рассмотрением систем алгебраических уравнений.

Оптимизация режимов работы каскадов ГЭС представляет собой отдельное направление в энергетическом моделировании, обусловленное специфическими особенностями гидроэнергетических объектов. В отличие от тепловых и атомных электростанций, ГЭС обладают высокой маневренностью, возможностью аккумуляции водных ресурсов в водохранилищах, а также зависят от гидрологических и климатических

условий. Эти особенности требуют особого подхода к выбору методов оптимизации и построению соответствующих моделей.

Методы оптимизации применяемые при оптимизации режимов работы ГЭС и каскада ГЭС в электроэнергетических системах можно условно разделить на три группы: классические методы, метаэвристические методы и методы на основе машинного обучения (рисунок 1.1). Далее будем подробно рассматривать методы каждый их этих групп.

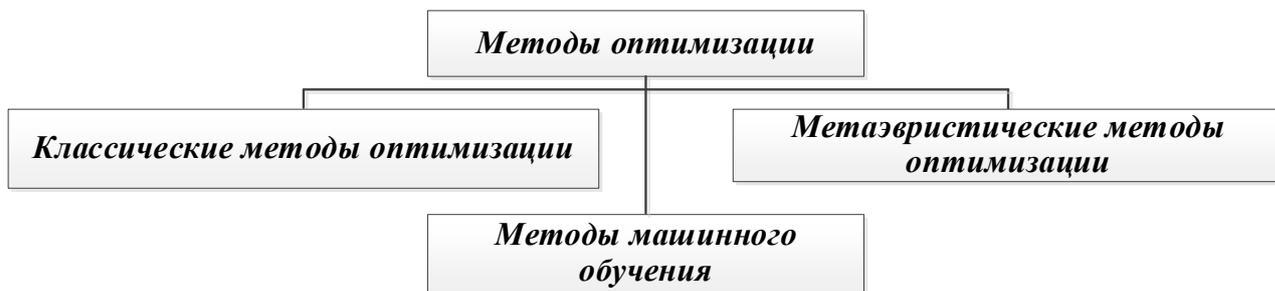


Рисунок 1.1 – Методы оптимизации

- ✓ Классические методы, такие как линейное и нелинейное программирование, динамическое программирование, метод Лагранжа и др., которые предполагают наличие точной информации;
- ✓ Метаэвристические алгоритмы, включая генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц, муравьиные колонии, симуляцию отжига, которые эффективны при решении задач с большим числом переменных и ограничений, а также при наличии нелинейностей и неявных зависимостей;
- ✓ Машинное обучение, позволяющее строить модели прогнозирования и оптимизации на основе исторических данных, а также адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени. В последние годы всё более активно применяются нейронные сети, ансамблевые методы, модели глубокого обучения и другие модели МО.

С точки зрения временного горизонта управления, задачи оптимизации режимов работы каскадов ГЭС могут быть классифицированы на:

- Краткосрочные (от нескольких часов до суток), направленные на обеспечение оперативного управления и диспетчеризации;
- Среднесрочные (от нескольких суток до недель), ориентированные на оптимизацию в рамках погодных и гидрологических прогнозов;
- Долгосрочные (месяцы и годы), охватывающие стратегическое планирование, инвестиционные расчёты и экологическое регулирование.

1.1.2 Классические методы оптимизации

Функционирование энергетических систем, как правило, описывается с использованием систем дифференциальных и алгебраических уравнений, отражающих как динамические, так и стационарные характеристики процессов. В задачах оптимизации, возникающих в контексте управления энергосистемами, в зависимости от исследуемого режима - переходного или установившегося - применяются различные математические модели.

Оптимизационные задачи в энергетике охватывают как эксплуатацию действующих электроэнергетических систем – включая электростанции, подстанции, линии электропередачи, сети и потребителей, так и проектирование, планирование и прогнозирование будущих объектов. Высокая сложность таких задач обуславливает необходимость использования вычислительных методов и мощных электронно-вычислительных машин (ЭВМ), особенно при учёте разнообразных технических ограничений на параметры режимов.

Применение классических методов оптимизации в управлении режимами энергосистем началось ещё в 1920-х годах, однако их широкое внедрение связано с развитием вычислительной техники в 1950-х годах. По мере усложнения энергетических задач стали применяться специализированные методы прикладной математики, включая вариационные методы, позволяющие находить экстремальные значения функционалов путём анализа зависимостей между переменными.

Наиболее всесторонние положения, касающиеся применения *классических методов* оптимизации режимов работы электростанций и энергетических систем, изложены в трудах исследователей и специалистов в области энергетики. Значительный вклад в развитие теоретических основ и практических алгоритмов оптимального управления энергетическими режимами внесли такие учёные, как Д.А. Арзамасцев [13], В.А. Веников [27], В.М. Горнштен [28, 29], В.Г. Журавлёв, В.И. Обрезков, Л.А. Крумм [30], Л.С. Беляев, И.М. Маркович, Т.А. Филиппова [20], Н.А. Мельников, В.М. Синьков [31], Е.В. Цветко [12] в, Allen J. Wood [32], Zhu Jizhong [33] и др. Их работы заложили методологическую основу для построения моделей энергосистем и разработки алгоритмов оптимального распределения нагрузки, водно-энергетических балансов, а также выбора рациональных режимов функционирования как отдельных электростанций, так и крупных энергетических объединений.

В [34] выполнен обзор методов и программ, разработанных на их основе, также выполнено сравнение методов и алгоритмов оптимизации режимов, внедренных в практику планирования оптимальных режимов ЭЭС.

Развитие методов оптимизационных расчётов в электроэнергетике началось с анализа условий экономически наилучшего распределения мощности между агрегатами теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), с применением метода неопределённых множителей Лагранжа [28, 35, 36], где основное внимание уделялось определению оптимального распределения электрической нагрузки между ТЭЦ с целью повышения эффективности производства электроэнергии.

В работе [2-А] для определения и анализа энергоэффективности предлагается расчетно-графический метод конечных отношений, который позволяет определить относительную энергоемкость. При использовании энергетической диаграммы в анализе энергоэффективности кроме оборудования включается технологический процесс действия, результат

которого обеспечен теоретическим или нормативным показателем удельного (минимального) расхода энергии.

Современные задачи оптимизации в энергетике всё чаще принимают форму операционных задач, предполагающих выполнение целенаправленного комплекса действий, направленного на достижение заданного результата. Степень достижения цели формализуется с помощью целевой функции (или критерия эффективности), принимающей числовые значения. При наличии её аналитического выражения задача сводится к поиску экстремума – максимума или минимума данной функции. Методы нахождения экстремумов при наличии ограничений изучаются в рамках теории математического программирования, включающей такие направления, как линейное, нелинейное, динамическое и стохастическое программирование.

Согласно [37] «...Для оптимизационных задач имеют значение число и вид критериев эффективности. Выделяют однокритериальные и многокритериальные задачи. Вид функции, описывающей цель, позволяет говорить о задачах линейных и нелинейных, тип переменных – о непрерывных и дискретных задачах, распределенность процессов во времени – о статических и динамических задачах». В задачах оптимизации режимов используются различные критерии: технические (например, минимизация потерь или расхода ресурсов), экономические (издержки), а также коммерческие (стоимость производства и реализации электроэнергии).

Объектами оптимизации могут выступать как отдельные электростанции, так и объединённые энергосистемы, электрические сети и предприятия. В частности, для электростанций актуальны задачи внутристанционного распределения нагрузки, где основными критериями являются минимум расхода топлива (для ТЭС) или рациональное использование водных ресурсов (для ГЭС).

Существует широкий спектр классических методов оптимизации, различающихся по своим теоретическим основам, области применения и типу

решаемых задач. Классификация классических методов оптимизации представлена на рисунке 1.2.

Для энергетических систем наиболее характерно нелинейные зависимости, обусловленные, например, статическими характеристиками электрических нагрузок, потерями мощности, зависящими от квадратов токов и напряжений, а также уравнениями установившегося режима, выражающимися в виде нелинейных алгебраических уравнений. Более того, встречаются и более сложные, не сводимые к квадратичным, типы нелинейностей. По этой причине задачи оптимального управления режимами энергосистем, как правило, требуют применения методов нелинейного программирования. Однако, в отличие от линейного программирования, где существует универсальный симплекс-метод, применимый к широкому кругу задач, в нелинейном случае отсутствует единый универсальный алгоритм. Выбор метода зависит от структуры конкретной задачи и типа ограничений.



Рисунок 1.2 – Классические методы оптимизации

Наиболее распространённые подходы включают метод неопределённых множителей Лагранжа, модификации градиентных методов, а также методы второго порядка, такие как метод Ньютона и его вариации.

Наибольшее распространение в задачах оптимизации, связанных с энергетическими системами, получил метод Лагранжа. Его основное преимущество заключается в способности находить экстремум непрерывной функции при наличии уравнений связи, то есть ограничений, налагаемых на допустимые решения [29, 32, 38, 28]. Суть метода заключается в преобразовании исходной целевой функции в так называемую функцию Лагранжа, которая одновременно учитывает, как оптимизационный критерий, так и ограничения. Это позволяет при минимизации (или максимизации) автоматически соблюдать заданные условия, без необходимости их отдельного контроля.

Метод равенства относительных приростов, основанный на методе Лагранжа, широко применяется в электроэнергетике для решения задач оптимального распределения нагрузки. Условием оптимальности является выравнивание относительных приростов мощности всех участвующих агрегатов [39, 40]. Основой метода служат характеристики относительных приростов (ХОП), индивидуальные для каждого агрегата и станции в целом.

В работе [41] рассмотрена задача оптимального распределения нагрузки между тепловыми электростанциями в энергосистеме на основе критерия минимизации топливных затрат с учётом сетевых потерь и их стоимости в условиях рыночной экономики. Для решения задачи применён метод неопределённых множителей Лагранжа.

В [42] метод неопределённых множителей Лагранжа применён для краткосрочной оптимизации распределения нагрузки в гидротепловой энергосистеме Бразилии. Поиск минимума функции Лагранжа может быть реализован с использованием градиентных методов или метода Ньютона.

Градиентные методы получили широкое применение при решении многомерных задач оптимизации, особенно в случае большого числа переменных [32].

Преимуществом градиентного подхода по сравнению с методом Лагранжа является возможность учета ограничений в форме неравенств [29]. Однако реализация таких ограничений требует дополнительных преобразований, что усложняет вычисления.

Основным недостатком градиентных методов является их чувствительность к выбору начального приближения и отсутствие гарантии глобального экстремума, особенно в задачах с множественными локальными минимумами. Тем не менее, при решении унимодальных задач они обеспечивают высокую скорость сходимости и приемлемую вычислительную эффективность [29, 43, 13].

Градиентные алгоритмы обеспечивают высокую скорость сходимости при решении задач оптимизации, но чувствительны к выбору начального приближения. Кроме того, метод не гарантирует достижение глобального экстремума, поскольку результат во многом зависит от исходной точки поиска [44].

Относящийся к численным методам второго порядка Метод Ньютона, отличается высокой точностью и быстрой сходимостью, значительно превосходя по этому параметру методы первого порядка [45, 20]. Основная идея заключается в использовании квадратичной аппроксимации целевой функции, что позволяет находить решение за небольшое число итераций – часто в пределах нескольких шагов.

Предложенный Р. Беллманом Метод динамического программирования, в 1950-х годах, стал одним из ключевых инструментов в решении оптимизационных задач электроэнергетики [46, 32, 33, 47]. Суть метода – представлении процесса оптимизации как многошагового – решение ищется последовательно, шаг за шагом, с учётом промежуточных состояний системы. Такой подход позволяет существенно сократить объём вычислений и

эффективно находить глобальные экстремумы даже в задачах с множественными локальными минимумами.

Однако метод динамического программирования имеет ряд ограничений. Он плохо адаптируется к задачам, связанным с минимизацией потерь в электрических сетях, и требует значительных вычислительных ресурсов при увеличении размерности задач (числа станций, узлов, временных шагов). Это связано с экспоненциальным ростом объёма перебора состояний – так называемым эффектом "проклятия размерности".

Несмотря на это, метод получил активное развитие в работах как зарубежных, так и отечественных учёных [48, 49, 50, 51, 52, 53], особенно в США. В этих исследованиях рассматривались многоузловые энергосистемы, где на каждом шаге решалась задача линейного программирования для оптимального распределения нагрузки между ТЭС с учётом водных ресурсов на ГЭС, баланса энергии и пропускной способности ЛЭП.

В исследованиях Д.И. Легалова [48, 49] предложена двухэтапная схема оптимизации: сначала определяется режим работы ГЭС с максимизацией выработки электроэнергии (без учёта сетевых ограничений), затем выполняется оптимизация работы ТЭС по критерию минимизации топливных затрат с учётом заданной генерации на ГЭС и сетевых ограничений.

В [54] предложен итерационный комбинированный алгоритм, объединяющий метод Беллмана и расчёт потерь в сети: на первом этапе определяется оптимальное распределение без учёта потерь, затем рассчитывается режим ЭЭС и величина потерь, которые на следующем шаге учитываются как дополнительная нагрузка – итерации продолжаются до достижения сходимости.

В работе [50] представлен подход стохастического динамического программирования, предназначенный для оптимизации режимов работы каскадов ГЭС с водохранилищами. В этом методе вместо детального расчёта для всех состояний используется зависимость условно-оптимальных затрат от объёмов воды, что позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку.

К числу основных достоинств метода динамического программирования можно отнести высокую вероятность достижения глобального оптимума и гарантированную сходимость вычислительного процесса. К недостаткам – высокая вычислительная сложность при росте размерности системы и сложности учёта сетевых потерь.

Метод штрафных функций применяется для преобразования задачи оптимизации с ограничениями в эквивалентную безусловную задачу за счёт включения ограничений в целевую функцию в виде штрафных добавок [29, 27, 55]. Основным принципом заключается в том, что при нарушении допустимых границ переменных целевая функция наказывается – к ней добавляется штраф, значительно возрастающий по мере отклонения от допустимой области. В пределах допустимых значений штрафная компонента либо отсутствует, либо остаётся незначительной.

Такой подход обеспечивает универсальность в учёте ограничений различной природы, включая как неравенства, так и случаи несовместных ограничений. Однако эффективность метода существенно зависит от выбора коэффициентов штрафа, которые часто адаптируют по ходу итерационного процесса – от малых значений к более строгим, с целью повышения сходимости алгоритма.

Следует отметить, что классические реализации метода, основанные на использовании градиента и замен переменных, демонстрируют ограниченную эффективность вблизи оптимума. Они плохо справляются с жёсткими ограничениями и характеризуются замедленной сходимостью, особенно при высокой чувствительности решения к малым изменениям параметров.

Метод линейного программирования

В ряде задач оптимизации режимов работы энергосистем, особенно когда расходные характеристики энергоблоков аппроксимируются линейными функциями, возможно применение методов линейного программирования. Такие подходы существенно упрощают вычислительные процедуры по сравнению с методами нелинейного программирования, что

делает их привлекательными для практического применения в системах планирования и оперативного управления [32].

Одним из наиболее известных и широко используемых методов в данной категории является симплекс-метод, разработанный Дж. Данцигом. Он применяется для решения задач, в которых требуется найти экстремум линейной целевой функции при наличии линейных ограничений в виде равенств или неравенств. Преимуществом симплекс-метода является его алгоритмическая устойчивость и возможность обработки задач большой размерности. В частности, в энергетике данный метод успешно используется, например, в одной из крупнейших энергогенерирующих компаний Германии для оптимизации режимов работы энергоблоков.

По сравнению с методами нелинейного программирования, симплекс-метод характеризуется меньшей вычислительной нагрузкой и более простой реализацией. Однако его применимость ограничена линейностью модели, что, в случае аппроксимации реальных (нелинейных) характеристик, может привести к снижению точности результата. Тем не менее, при корректной сегментации нелинейных зависимостей (например, разбиение на линейные участки) данный метод остаётся эффективным инструментом.

В дополнение к симплекс-методу, в современных программных средствах оптимизации широко используется метод внутренних точек, которая является эффективной альтернативой, основанная на других принципах поиска. В частности, в программном комплексе DIgSILENT PowerFactory, применяемом для моделирования и расчёта режимов электроэнергетических систем, реализован алгоритм на основе этого метода. Его особенностью является движение к оптимальному решению внутри допустимой области (в пространстве переменных), минуя вершины многогранника, как это происходит в симплекс-методе.

Метод внутренней точки хорошо масштабируется и адаптируется к задачам с большим числом ограничений. Он допускает использование комбинированных подходов, в которых для учёта ограничений одновременно

применяются множители Лагранжа и штрафные функции, что повышает гибкость метода при решении сложных задач оптимизации режимов ЭЭС с различными видами ограничений.

В работе [56] представлена эффективная модель долгосрочного планирования работы каскада ГЭС, основанная на методе смешано-целочисленного линейного программирования (MILP), что позволяет учитывать водные балансы, энергетические ограничения и межвременные зависимости. Разработанная модель обеспечивает высокую точность при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с нелинейными аналогами. MILP-формализация позволяет применять модель как для отдельных ГЭС, так и для крупных каскадов в многопериодном горизонте планирования. Проведённые численные эксперименты подтвердили эффективность подхода на реальных данных.

Таким образом, методы линейного программирования, несмотря на их более узкую область применимости по сравнению с нелинейными подходами, остаются важным инструментом в арсенале энергосистемного моделирования, особенно в случаях, когда допуски и структуры задач позволяют использовать линейные аппроксимации.

1.1.3 Метаэвристические методы оптимизации

За последние десятилетия были изобретены новые методы оптимизации, концептуально отличающиеся от традиционных. Большинство из них основаны на определенных характеристиках, присущих биологическим, молекулярным, физическим, нейробиологическим системам. Эвристические методы основаны на подсознательном мышлении и характеризуются неосознанным (интуитивным) способом действий для достижения осознанных целей. Эвристический алгоритм – это алгоритм решения задачи, правильность которого для всех возможных случаев не доказана, но про который известно, что он даёт достаточно хорошее решение в большинстве случаев [57].

Сегодня эволюционные алгоритмы считаются эффективными и действенными методами оптимизации водохранилища и максимизации

производства электроэнергии. Учитывая, что традиционная оптимизация является сложной и трудной задачей при решении многомерных нелинейных задач в энергетических системах и крупномасштабных электростанциях, поэтому решение такой большой задачи традиционными подходами будет непрактичным.

Согласно полученным результатам, можно утверждать, что используемые метаэвристические алгоритмы способны решать сложные модели в задачах эксплуатации резервуаров с высокой скоростью сходимости.

Оптимизация и эксплуатация резервуара являются многомерными задачами оптимизации, которые трудно решить с помощью традиционных алгоритмов оптимизации; такие алгоритмы часто требуют больших вычислительных затрат. Мета-эвристические алгоритмы предоставляют новые подходы к решению этих задач и обладают повышенной эффективностью, которая широко изучалась в операциях по оптимизации резервуара. Метаэвристические алгоритмы можно разделить на следующие категории, такие как, включая эволюционные, роевые, физические, человеческие, биологические, системные, математические, музыкальные и вероятностные метаэвристические алгоритмы [58]. Классификация метаэвристических методов оптимизации приведена на рисунке 1.3.

Существует множество видов метаэвристических алгоритмов на биологической основе, которые можно разделить: на основанные на растениях (алгоритм инвазивных сорняков), основанные на животных (алгоритм кита, алгоритм серого волка), основанные на насекомых (алгоритм колонии муравьев, алгоритм колонии пчел), основанные на микробах (алгоритм слизевика) и т. д. Эти алгоритмы обладают высокой производительностью и адаптивностью при решении сложных многомерных задач, поэтому они вызвали много беспокойства. Смешение различных алгоритмов может помочь преодолеть недостатки одного алгоритма и решать проблемы более эффективно.

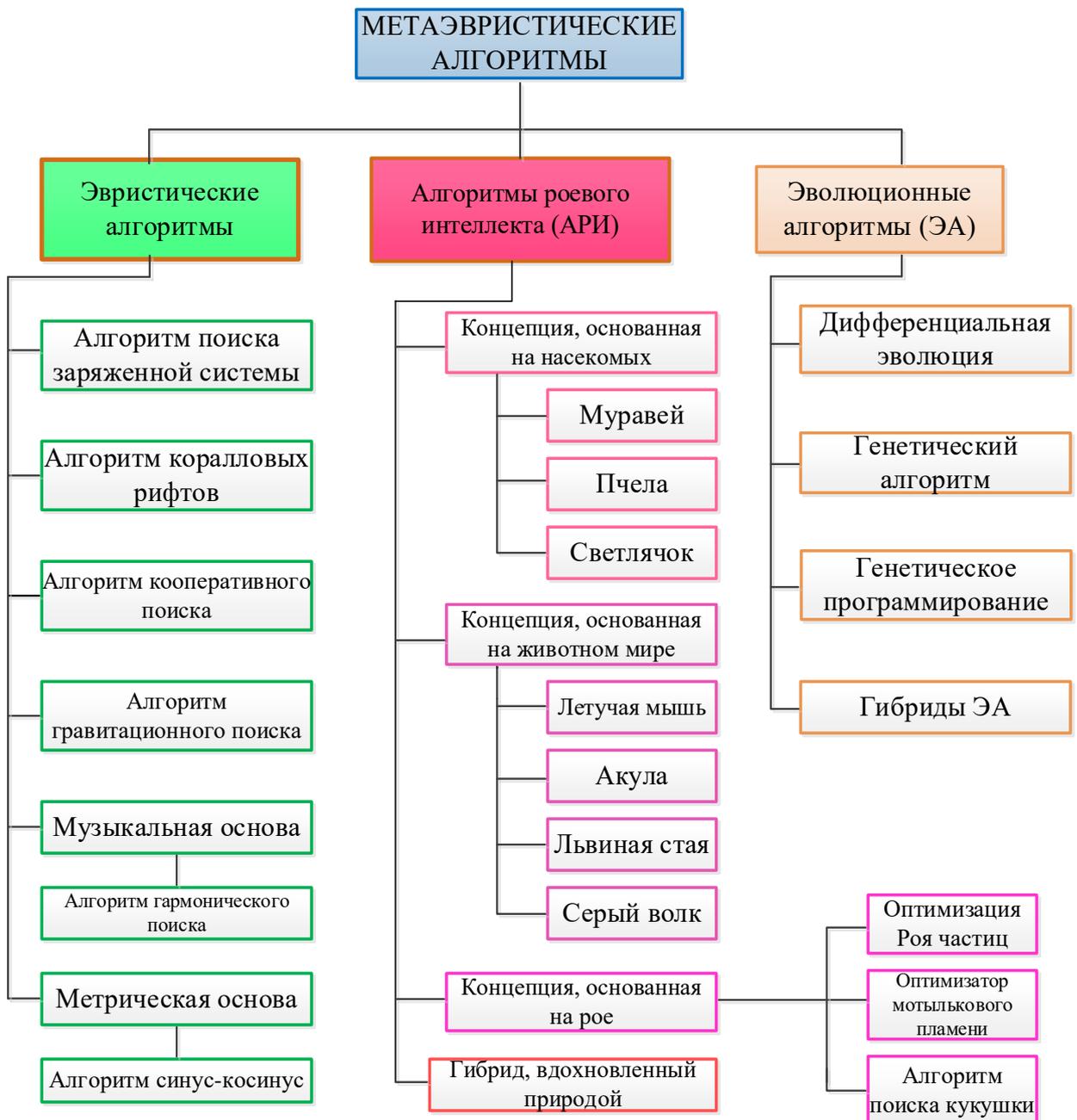


Рисунок 1.3 – Метаэвристические методы оптимизации

Улучшенными алгоритмами этих алгоритмов являются гибридный алгоритм оптимизации китов, гибридный алгоритм оптимизации инвазивных сорняков и алгоритм поиска кукушки, гибридный алгоритм слизевика и арифметической оптимизации и т. д. Они широко используются в задачах оптимальной эксплуатации резервуара, включая краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную оптимальную эксплуатацию [59, 60, 61].

Подробное исследование по применению метаэвристических алгоритмов в оптимизации гидроэнергетики приведён в [62], приведен

обширный анализ применения метаэвристических алгоритмов оптимизации для управления выработкой электроэнергии на гидроэлектростанциях. В работе рассматриваются как классические, так и новейшие методы оптимизации, подчеркивая их эффективность по сравнению с традиционными методами, такими как линейное и динамическое программирование, особенно в условиях высокой размерности и нелинейности задач управления водохранилищами.

Методы метаэвристических алгоритмов, такие как эволюционный алгоритм (EA), роевой интеллект (SI), основанные на концепциях поведения животных и насекомых и роях, являются одними из новых примеров идеально работоспособных методов оптимизации. В обзоре [63] подытожено обсуждение различных моделей пласта, разработанных с целью оптимизации эксплуатации водохранилища ГЭС.

Классические методы и эволюционные алгоритмы или мета-эвристики (EA) являются основными методами оптимизации работы резервуара. Конечно, разработанные эволюционные алгоритмы более полезны в сегодняшних исследованиях. Высокие размерности и медленная сходимость можно назвать основной причиной, по которой классические методы, такие как линейное программирование (LP), динамическое программирование (DP), стохастическое динамическое программирование (SDP) и нелинейное программирование (NLP), не принимаются исследователями. Поэтому эволюционные алгоритмы (вдохновленные биологическими явлениями) были разработаны и широко использовались из-за их высокой скорости поиска для нахождения глобальных почти оптимальных решений и заменили классические методы.

Эволюционные алгоритмы, используемые при решении задач эксплуатации водохранилищ, имеют свои преимущества и недостатки. Лучшим способом решения этой проблемы, чтобы обеспечить оптимальное решение, многие исследователи считают целесообразным использовать гибридные модели и полагают, что недостатки одного алгоритма

исправляются и дополняются другим алгоритмом. Гибридные алгоритмы стали широко использоваться и распространены при решении сложных задач управления водными ресурсами.

В [64] рассматривается текущая методика оптимизации, разработанная для решения проблем эксплуатации водохранилищ в области водных ресурсов. Будет обсуждаться и исследоваться применение обычных, особенно эволюционных вычислений, комбинации моделирования-оптимизации и многоцелевой оптимизации в эксплуатации водохранилища. Кроме того, будет представлен новый алгоритм оптимизации из других приложений с упором на искусственную колонию пчел (ABC) и алгоритм гравитационного поиска (GSA) как альтернативные методы, которые могут быть изучены исследователями в области водных ресурсов. Наконец, в этой статье рассматриваются проблемы и вопросы изменения климата при оптимизации водохранилища.

Эксплуатация каскадного водохранилища может обеспечить оптимальное использование водных и гидроэнергетических ресурсов и повысить общую эффективность гидроэлектростанций.

В [61] предложили новый алгоритм поиска молний с лягушачьим прыжком частиц, объединив его с хаотической инициализацией (картографированием), FLA и Оптимизация роя частиц (PSO). Для предварительной проверки применяются десять тестовых функций. Оптимальная модель работы максимальной мощности генерации электроэнергии строится с граничными условиями каскадных водохранилищ гидроэлектростанций. Результаты алгоритмов поиска молний с лягушачьим прыжком частиц (frog-leaping-particle swarm optimization FPLSA), LSA, PSO и DE сравнивались в трех типичных годах различных сценариев стока. Во многих исследованиях использовались метаэвристические алгоритмы для оптимизации работы водохранилища, но все еще существуют такие проблемы, как невозможность найти глобальное оптимальное решение и медленная скорость сходимости. Алгоритм поиска молнии (Lightning search algorithm

LSA) – это новый метаэвристический алгоритм, который имеет такие преимущества, как высокая скорость сходимости и небольшое количество параметров для настройки.

За последние два десятилетия использование современных методов метаэвристической оптимизации в различных темах систем водных ресурсов возросло для преодоления недостатков традиционных методов и неэффективности математических методов из-за увеличения размерности и сложности проблемы.

В исследовании [65] метод оптимизации серый волк (Grey Wolf GWO) в сочетании с адаптивной нейро-нечеткой системой вывода (ANFIS) прогнозирует выработку гидроэлектроэнергии. Для этой цели среднее количество осадков в бассейне реки Дез было рассчитано с использованием полигонов Тиссена. Использовались двадцать входных комбинаций, включая приток к плотине, осадки и гидроэнергетику в предыдущие месяцы, в то время как выход во всех сценариях был одним месяцем выработки гидроэлектроэнергии. Затем для прогнозирования выработки гидроэлектроэнергии использовалась сопряженная модель. Результаты показали, что метод является многообещающим. GWO-ANFIS смог удовлетворительно прогнозировать выработку гидроэлектроэнергии.

Методы генетического алгоритма

В последние годы методы генетического алгоритма (ГА) находят всё более широкое применение при решении задач оптимизации в электроэнергетике, что отражено в ряде современных публикаций [66, 67, 68]. Подробный анализ применения ГА в задачах планирования и управления режимами работы электроэнергетических систем представлен в работе Д.А. Павлюченко [69]. Метод основан на эволюционных принципах: формировании популяции возможных решений, применении операторов селекции, кроссовера и мутации, что позволяет эффективно исследовать пространство решений.

Одним из ключевых преимуществ генетического алгоритма является его способность с высокой вероятностью приближаться к оптимальному решению при относительно невысоких вычислительных затратах. Так, в работе [70] представлены расчёты для смешанной энергосистемы с участием ГЭС и ТЭС, в которой ГА применён для задачи оптимального распределения нагрузки. Проведённое сравнение с результатами, полученными градиентным методом, продемонстрировало более высокую эффективность ГА по достижению лучших решений в условиях сложных многокритериальных ограничений.

Однако метод имеет и существенные ограничения, главным из которых является отсутствие гарантии нахождения глобального оптимума. Для повышения надёжности получаемых результатов, как правило, алгоритм запускается многократно с различными начальными условиями, после чего из полученного множества решений отбирается наилучшее.

1.1.4 Методы оптимизация на основе машинного обучения

В последние два десятилетия модели машинного обучения (МО) стали незаменимыми инструментами, широко применяемыми для моделирования, проектирования и прогнозирования в различных энергетических системах. Наблюдается значительный рост в развитии и применении различных типов моделей МО в этой области. Эта тенденция обусловлена жизненно важной потребностью в энергии и растущей сложностью энергетических систем [71].

Развитие машинного обучения (МО) за последнее десятилетие открыло новые горизонты для решения сложнейших задач в энергетике и особенно в гидроэнергетических системах.

Машинное обучение стало неотъемлемым и даже обязательным инструментом в современной энергетике, преобразуя подходы к моделированию, проектированию и прогнозированию в условиях растущего спроса и сложности систем. Его применение охватывает широкий спектр задач в энергетике, включая оптимизации режимов ГЭС и каскадов ГЭС, прогнозирования нагрузки, выработки энергии, интеграции возобновляемых источников энергии, прогнозирования речного стока, управление

водохранилищами и адаптации к изменению климата [71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81]. Классификация моделей на основе машинного обучения используемые в различных задачах энергетики приведена на рисунке 1.4.

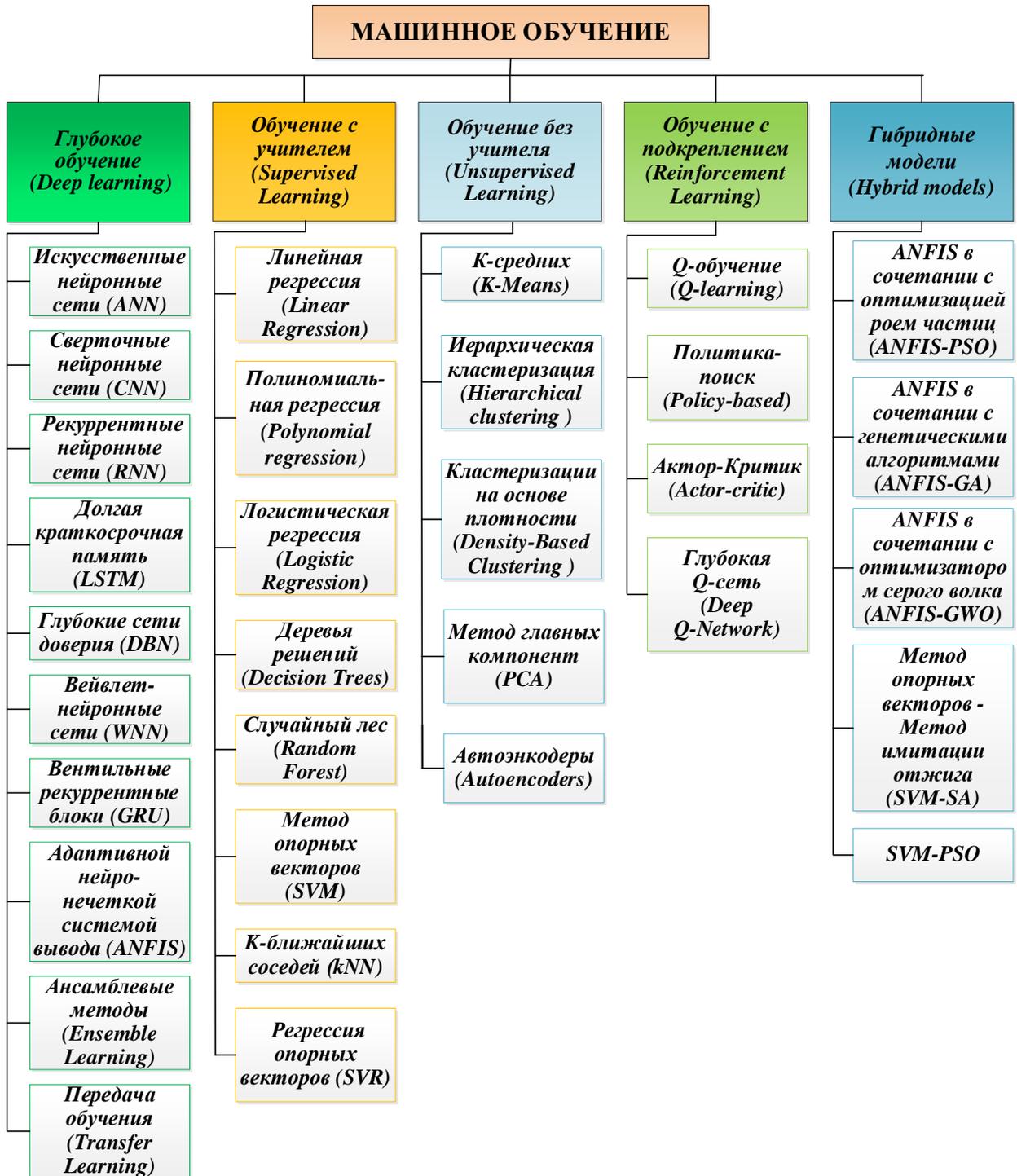


Рисунок 1.4 – Модели машинного обучения в энергетике

Совершенствование математических методов машинного обучения и увеличение вычислительных мощностей привели к впечатляющим результатам сложных моделей машинного обучения во многих областях [82].

Достоинствами этих моделей являются простота и однородность их анализа и проектирования.

В гидроэнергетике модели МО, включая нейронные сети, генетические алгоритмы, деревья решений и ансамблевые методы, используются для точного прогнозирования притоков в водохранилища, оптимизации графиков сброса воды и управления рисками наводнений. Глубокое обучение, в частности LSTM и CNN, значительно улучшает точность прогнозирования и оперативное принятие решений. В контексте каскадов ГЭС, МО позволяет интегрировать многошаговые прогнозы стока с многоцелевой оптимизацией, повышая эффективность распределения водных ресурсов и снижая колебания нагрузки в сети [76]. В исследовании [76] был проведён обзор ранее опубликованных научных работ, посвящённых применению методов машинного обучения (ML) в управлении дамбами и водохранилищами. За последние годы широко изучались возможности моделей ML для: прогнозирования притоков в водохранилища, оптимизации графиков водосбросов, управления рисками наводнений. Особое внимание учёных было сосредоточено на преодолении сложностей, вызванных изменчивостью климата и растущими потребностями в водных ресурсах.

В рамках исследования [83] была разработана модель краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки для диспетчерского управления электроэнергетической системой Республики Таджикистан на основе метода опорных векторов (SVM), оптимизированного с использованием алгоритма роя частиц (PSO). Полученные результаты подтвердили высокую точность и надежность предложенной модели при прогнозировании энергопотребления. Дополнительный учет температурного фактора, варьирующегося в зависимости от сезона и конкретного дня, позволил существенно повысить точность прогноза, что демонстрирует эффективность интеграции SVM и PSO в задачах краткосрочного прогнозирования нагрузки для условий ЭЭС РТ.

В работе [71] представлен всесторонний обзор современных подходов применения методов машинного обучения (ML) в задачах прогнозирования,

моделирования и оптимизации в энергетическом секторе. Целью исследования является систематизация существующих решений и технологий ML, используемых на различных этапах функционирования энергосистем: от генерации и распределения до потребления и технического обслуживания оборудования. Анализируются широкий спектр алгоритмов – от классических методов регрессии и деревьев решений до современных моделей нейронных сетей, опорных векторов (SVM), ансамблевых подходов (Random Forest, Gradient Boosting), а также методов глубокого обучения (DNN, CNN) и эволюционных алгоритмов. Важное внимание уделено гибридным моделям, сочетающим машинное обучение с оптимизационными алгоритмами (например, ANN+GA, SVM+PSO), которые продемонстрировали высокую точность при решении комплексных энергетических задач.

В задачах прогнозирования электрической нагрузки отмечается высокая эффективность нейросетей и ансамблевых моделей, особенно при учёте сезонных, погодных и поведенческих факторов. В области прогнозирования генерации от возобновляемых источников (ветровая и солнечная энергетика) особое внимание уделено алгоритмам SVM и гибридным подходам, позволяющим повысить надёжность краткосрочного прогноза. В диагностике и техническом обслуживании оборудования применяются обучаемые классификаторы и анализ временных рядов, что позволяет предсказывать отказы и оптимизировать техобслуживание.

Таким образом, в работе [71] делается вывод о высокой адаптивности и прикладной ценности машинного обучения в энергетике, особенно в условиях неопределённости, изменчивых режимов и растущей роли ВИЭ.

Исследования [72] были направлены на методы МО, прогнозы расписания, речные системы и приложения МО для оптимизации гидроэнергетики. Результаты показали, что методы МО больше применялись для прогнозирования речного стока и оптимизации эксплуатации водохранилища. Долгосрочный горизонт планирования является наиболее распространённым применением в проанализированных исследованиях.

Поэтому контролируемое обучение больше применялось как сегмент техники МО. Несмотря на то, что это широко изученная тема, новые области открывают возможности для прорывных исследований, таких как прогнозирование расписания в реальном времени, оптимизация системы русла реки и эксплуатация низконапорных гидроэлектростанций.

В работе [84] предложена модифицированная непараметрическая модель на основе алгоритма k -ближайших соседей, новизна которой заключается в полиномиальном логарифмическом преобразовании пространства признаков, повышающем точность выбора подобных ретроспективных участков временного ряда.

В настоящее время подходы МО, включая контролируемое, неконтролируемое, подкрепление, онлайн, перенос, глубокое обучение, опорные векторные машины и деревья решений, используются для улучшения традиционных моделей оптимизации и разработки новых надежных и адаптивных моделей МО. Ожидается, что эти два подхода станут более взаимодополняющими друг друга для надежного, надежного, адаптивного и гибкого решения проблемы оптимизации ЭС.

Таким образом модели машинного обучения (МО) приобрели популярность благодаря конструктивному использованию больших данных для принятия обоснованных решений и повышения эффективности моделей. Наиболее популярные алгоритмы МО, применяемые в энергетических системах для построения моделей: ANN, MLP, ELM, SVM (Регрессия опорных векторов), WNN (Вейвлет нейронная сеть), ANFIS (Адаптивная нейро-нечеткая система вывода), деревья решений, глубокое обучение, ансамбли и продвинутое гибридные модели МО. Примеры применения моделей МО включают прогнозирование потребления энергии, прогнозирование скорости ветра, прогнозирование солнечной радиации, различные задачи оптимизации, прогнозирование выработки электроэнергии, прогнозирование временных рядов, минимизацию затрат, оценку заряда аккумуляторных батарей, прогнозирование цен и многое другое. Тенденция к развитию гибридных

моделей МО продолжит обеспечивать более высокую производительность и сложность энергетических моделей.

Несмотря на значительные достижения, остаются вызовы, такие как обеспечение качества данных, высокая вычислительная стоимость, сложность проектирования алгоритмов оптимизации и разрыв между симуляцией и реальностью. Однако, перспективы развития МО в энергетике огромны, включая онлайн-обучение, развитие ИИ, ориентированного на человека, создание надежных моделей временных рядов, масштабируемость, слияние данных и использование цифровых двойников. В целом, интеграция машинного обучения в энергетические системы является фундаментальным шагом к созданию более устойчивой, эффективной и адаптивной энергетической инфраструктуры, способной справиться с вызовами будущего и изменением климата.

1.2 Постановка задачи управления режимами работы ГЭС в каскаде Вахш

1.2.1 Особенности каскада ГЭС в электроэнергетических системах

Гидроэлектростанции являются ключевым, возобновляемым и экологически чистым источником энергии, обладающим уникальной маневренностью и гибкостью. Их способность работать в различных режимах: базовом, пиковом и регулирующем, что позволяет им эффективно адаптироваться к изменяющимся потребностям энергосистемы [15-А]. По [85] “ГЭС представляют собой гидроузлы комплексного назначения и решают не только энергетические, но и водохозяйственные задачи”.

ГЭС являются наиболее эффективным и маневренным видом станции для покрытия неравномерностей режима электропотребления, которые также предназначены для регулирования частоты и обеспечения необходимого резерва мощности в энергосистеме. В соответствии с ролью маневренного источника энергии зимой, в период прохождения максимумов электрической нагрузки в водохранилищах ГЭС необходимо иметь определенный запас

воды. Этим запасом определяется место ГЭС в графике нагрузки энергосистемы, продолжительность ежесуточной работы установленной мощностью, значение величин нагрузочного и аварийного резерва энергосистемы, относимого на ГЭС [17].

Выработки электроэнергии на ГЭС определяется:

$$P_{ГЭС} = 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta,$$

где $P_{ГЭС}$ – электрическая мощность гидроэлектростанции (кВт); Q – расход воды, проходящий через турбины ГЭС ($\text{м}^3/\text{с}$); H – напор (м); η – коэффициент полезного действия (КПД) гидроагрегата.

Формула для общего КПД гидроагрегата:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_g,$$

где η_t – КПД турбины; η_g – КПД гидрогенератора.

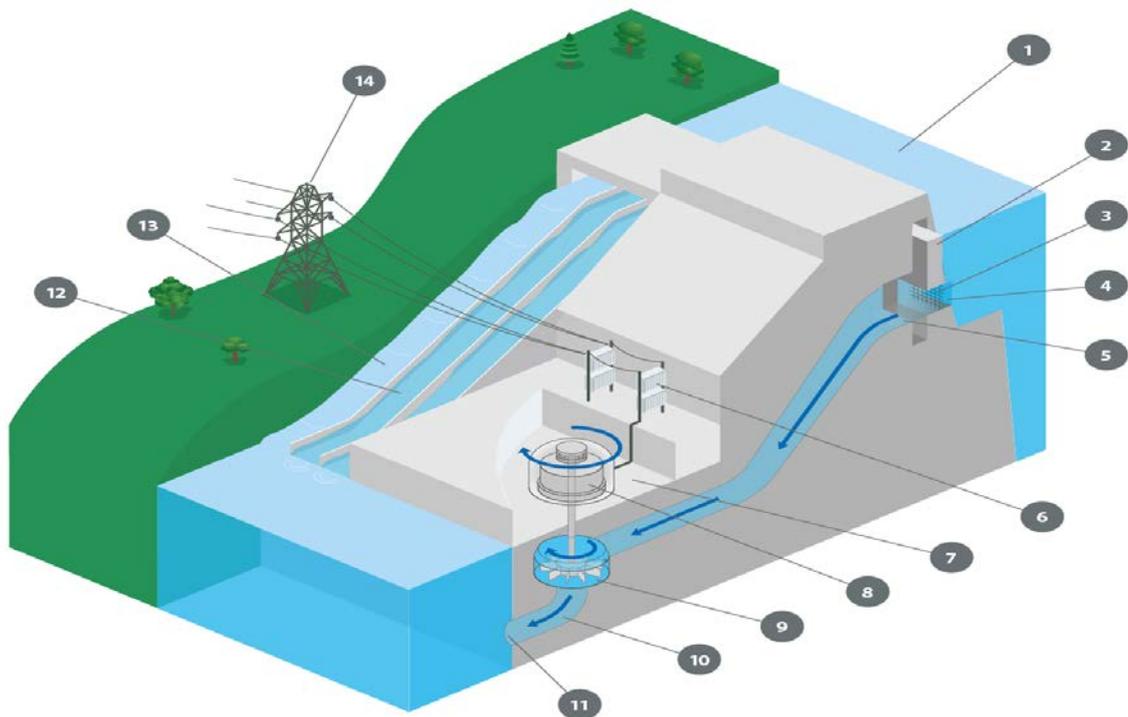


Рисунок 1.5 – Схема гидроэлектростанции

где: 1. Водохранилище; 2. Затвор; 3. Решётка для мусора; 4. Водозабор; 5. Напорный водовод; 6. Трансформатор; 7. Здание ГЭС; 8. Генератор; 9. Турбина; 10. Отводящая труба; 11. Водосброс; 12. Водослив; 13. Рыбопропускное сооружение; 14. Линия электропередачи

Рациональное управление режимами гидроэлектростанций представляет собой одну из наиболее сложных задач в энергосистемах, поскольку связано с высокой степенью изменчивости природных водных ресурсов. Гидроэнергетический потенциал рек может колебаться в широком диапазоне, достигая 20–30 % в годовом выражении для отдельных станций, что требует учета множества факторов при планировании и оптимизации их работы.

К числу ключевых факторов, влияющих на эффективность режимов работы ГЭС, относятся:

Гидрологические параметры: величина речного стока, его сезонная и межгодовая изменчивость, структура использования стока, а также форма и динамика гидрографа реки. Эти параметры являются природными и не поддаются прямому управлению. Кроме того, гидрографы рек никогда не повторяются в точности, что затрудняет построение детерминированных моделей прогнозирования.

Технические и технологические особенности ГЭС: включают конфигурацию оборудования, правила и алгоритмы управления турбинно-генераторными агрегатами, ограничение по уровню водохранилища, условия переходных режимов. Варианты загрузки оборудования и схема эксплуатации существенно влияют на эффективность преобразования гидравлической энергии в электрическую.

Потребности энергосистемы: запросы на выработку электроэнергии, графики нагрузки, участие ГЭС в покрытии пиковых нагрузок, обеспечение системной надежности и маневренности.

Хотя повлиять на водный приток невозможно, оптимальное управление его распределением позволяет повысить эффективность использования ресурсов на 10–15 %. При этом технологические решения, связанные с оптимизацией режима работы оборудования, могут дополнительно повысить производительность на 3–5 %. Благодаря высокому коэффициенту полезного действия (КПД) гидротурбин, достигающему 93–95 %, даже небольшие

улучшения в режиме управления приводят к значительному увеличению суммарной выработки электроэнергии [85].

Таким образом, реализация научно обоснованных подходов к управлению режимами работы ГЭС с учётом изменчивости стока, требований энергосистемы и внутренних технических ограничений, позволяет существенно повысить общую эффективность использования гидроэнергетических ресурсов.

Изменения в структуре водопользования или бытовой приточности водохранилища непосредственно отражаются на эксплуатационных возможностях гидроэлектростанции. Основным показателем, определяющим способность ГЭС к регулированию стока, является отношение объёма водохранилища к годовому речному притоку. В зависимости от этого параметра водохранилища классифицируются как безрегулируемые, а также обладающие суточным, недельным, сезонным, годовалым или многолетним регулированием.

Гидроэлектростанции, как правило, входят в состав гидроузлов многоцелевого назначения и совмещают энергетические и водохозяйственные функции. Управление их режимами включает два уровня: долгосрочное – направленное на рациональное распределение водных ресурсов, и краткосрочное – обеспечивающее оперативное согласование работы с требованиями энергосистемы. Степень участия конкретной ГЭС в энергетических балансах определяется как водностью бассейна, так и её регулируемыми характеристиками [85].

Режим работы ГЭС в современных электроэнергетических системах определяется необходимостью сочетания высокой гибкости, надёжности и учёта экологических и экономических факторов. В условиях интеграции с ВИЭ, климатических изменений и ограниченных водных ресурсов, эффективное управление режимом ГЭС требует использования как традиционных, так и интеллектуальных методов оптимизации, основанных на анализе больших данных и прогнозных моделей. При этом особую роль

играют каскадные ГЭС, требующие согласованного управления в масштабе бассейнов рек [86, 85].

Определяющей характеристикой каскада ГЭС является гидравлическая и гидрологическая взаимосвязь между его станциями. В сомкнутых каскадах ГЭС, где уровни воды в водохранилищах значительно превышают естественный уровень реки, существует прямая гидравлическая связь по расходу и напору между станциями [87]. ГЭС связаны по напору, поскольку в каскаде происходит взаимное регулирование стока, что обусловлено требованиями потребителей каждой станции и осуществляется по принципу максимальной эффективности всего каскада [85].

Каскадное расположение гидроэлектростанций представляет собой систему последовательно расположенных по течению реки ГЭС, где каждая нижерасположенная станция использует сбросы воды вышерасположенной. Такая организация позволяет значительно повысить эффективность использования водных ресурсов и выработки электроэнергии. Основные особенности эксплуатации каскада ГЭС заключаются в следующем:

- Гидрологическая взаимосвязь: режим работы каждой станции зависит от сбросов и накоплений воды на вышестоящих ГЭС. Это требует согласованного и иерархического управления каскадом.
- Необходимость координации графиков водосбросов: чтобы избежать конфликтов между энергетическими, экологическими и хозяйственными интересами.
- Учет сезонной и межгодовой изменчивости стока: влечёт за собой необходимость разработки сценарных моделей эксплуатации.
- Наличие синергетического эффекта: при согласованной работе каскада общая выработка энергии и эффективность водопользования значительно возрастают.

Управление каскадом ГЭС представляет собой многокритериальную задачу, включающую в себя не только максимизацию выработки электроэнергии, но и соблюдение экологических требований, обеспечение

надёжности водоснабжения, предотвращение паводков и минимизацию потерь [13-А]. На практике для решения таких задач применяются классические методы оптимизации (например, динамическое программирование), а также современные метаэвристические алгоритмы и методы машинного обучения, особенно при наличии высокой неопределённости в гидрологических прогнозах.

Отсутствие адекватного математического и программного моделирования ключевых факторов, влияющих на работу гидроэлектростанций, приводит к искажённому представлению об их функционировании в составе электроэнергетической системы. Современные условия эксплуатации требуют внедрения новых методов и интегрированных подходов для согласованного управления как гидрологическими, так и энергетическими режимами – как на уровне отдельных ГЭС, так и в пределах каскадов.

Работа каскадных ГЭС может быть формализована в виде математической модели с заданной структурой и алгоритмом функционирования, требующим периодической адаптации к изменяющимся условиям. Ключевым вызовом при построении таких моделей является учёт стохастической природы притока, обусловленной метеоусловиями, характером питания реки, боковой приточностью и другими гидрологическими факторами [85].

Накопление энергии в каскадной гидроэлектростанции связано с взаимосвязью между верхним и нижним бьефами станции, а также с её техническими характеристиками. Эта концепция чрезвычайно сложна и не может быть прямо выражена через общий объём воды в каскаде или гравитационную потенциальную энергию этого объёма. Существующие методы расчёта, как правило, не позволяют глубоко проанализировать процессы накопления энергии в каскадных ГЭС и редко рассматривают ключевые факторы, влияющие на этот процесс [10-А].

В последние годы для анализа и расчета водноэнергетических режимов каскадов ГЭС наряду с оптимизационными моделями широкое применение нашли так называемые имитационные модели. Основой этих моделей является имитационный эксперимент, т. е. расчет характеристик изучаемого объекта при тех или иных алгоритмах управления этим объектом [88]. Схема каскада ГЭС приведена на рисунке 1.6.

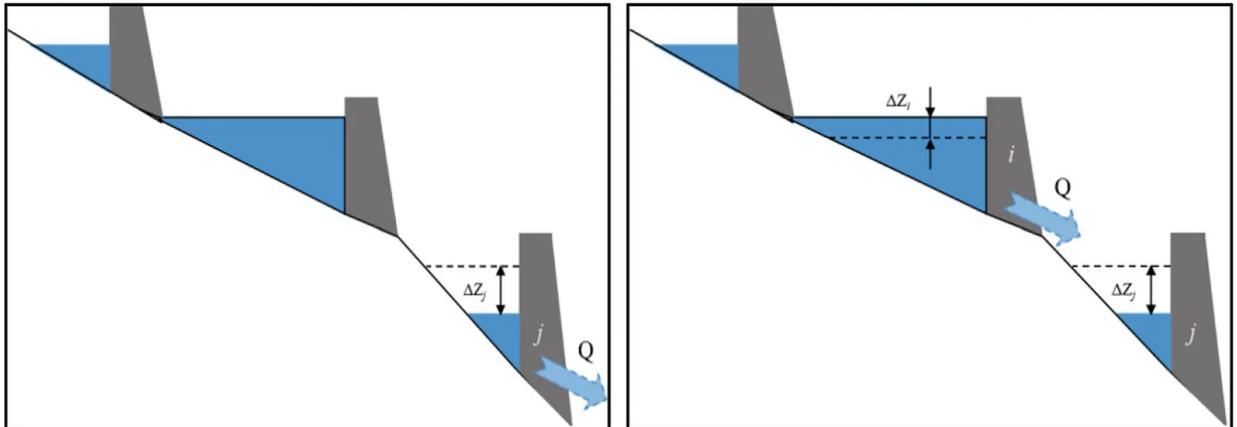


Рисунок 1.6 – Схема каскада гидроэлектростанций

Общее уравнение водного баланса для водохозяйственного участка, применимое к водохранилищам:

$$\Delta V = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}} + W_{\text{пзв}} + W_{\text{вв}} + W_{\text{дот}} - W_{\text{исп}} - W_{\text{ф}} - W_{\text{у}} - W_{\text{вдп}} - W_{\text{кп}} - W_{\text{кп}},$$

где:

ΔV – Изменение объема водохранилища за расчетный период (наполнение или сработка). Положительное значение указывает на увеличение объема, отрицательное – на уменьшение (млн м³);

$W_{\text{вх}}$ – Объем стока, поступающий с вышележащих участков реки или от вышестоящих ГЭС в каскаде (входящий приток);

$W_{\text{бок}}$ – Объем воды, образующийся в пределах расчетного водохозяйственного участка (например, приток от боковых притоков реки, осадков на поверхности водохранилища);

$W_{\text{пзв}}$ – Объем забора воды из подземных источников, имеющих гидравлическую связь с водохранилищем;

$W_{\text{вв}}$ – Объем возвратных вод (например, сточные, дренажные воды), сбрасываемых обратно в водохранилище или реку в пределах участка;

$W_{\text{дот}}$ – Дополнительный объем воды, поступающий в водохозяйственный участок из систем территориального перераспределения стока (межбассейновые или внутрибассейновые переброски);

$W_{\text{исп}}$ – Потери воды на испарение с поверхности водохранилища за расчетный период;

$W_{\text{ф}}$ – Потери воды на фильтрацию из водохранилища, каналов и других поверхностных водных объектов в пределах расчетного участка;

$W_{\text{у}}$ – Уменьшение речного стока, вызванное забором подземных вод, имеющих гидравлическую связь с рекой;

$W_{\text{пер}}$ – Переброска части стока (объема воды) за пределы расчетного водохозяйственного участка;

$W_{\text{вдп}}$ – Суммарные потребности всех водопользователей в данном расчетном водохозяйственном участке (например, объемы воды для ирригации, питьевого и промышленного водоснабжения);

$W_{\text{кп}}$ – Требуемый транзитный сток или комплексный попуск в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка (включает санитарно-экологические и экономические попуски).

Уравнение баланса для каскада ГЭС:

$$V_{n, t+1} = V_{n, t} + (Q_{n, t}^{\text{in}} - Q_{n, t}^{\text{out}}) \Delta t + V_{n, t}^{\text{af}},$$

где:

- $V_{n, t+1}, V_{n, t}$ – объёмы воды в хранилище в момент $t+1$ и t [м^3];
- $Q_{n, t}^{\text{in}}, Q_{n, t}^{\text{out}}$ – приток и отток [$\text{м}^3/\text{с}$];
- $V_{n, t}^{\text{af}}$ – изменение объёма за счёт сторонних факторов.

Гидравлическая связь между станциями:

$$Q_{n, t}^{\text{in}} = Q_{n-1, t-\tau}^{\text{out}} + Q_{n, t}^{\text{mid}},$$

$n \geq 2$, τ – время добегания волны (стока) между станциями.

Таким образом, особенностью ГЭС, связанных каскадом, является то, что уровень нижнего бьефа вышележащей станции зависит от кривой подпора водохранилища нижележащей станции [89].

1.2.2 Описание объекта исследования. Особенности каскада ГЭС на реке Вахш

Вахшский каскад гидроэлектростанций является центральным элементом энергетической и водохозяйственной системы Таджикистана, играя ключевую роль в обеспечении страны электроэнергией и водой для орошения. Его особенности определяются уникальным гидрологическим режимом реки Вахш, питаемой в основном ледниками и снегом, что приводит к значительным сезонным колебаниям стока и высокой наносной нагрузке.



*источник: <https://www.mapsofworld.com/tajikistan/river-map.html>

Рисунок 1.7 – Карта рек Таджикистана

Назначение гидроузла – комплексное, ирригационно-энергетическое. Водохранилище гидроузла, совместно с Нурекским и Туюмюонским на р. Амударье, предназначается для многолетнего компенсированного регулирования стока р. Амударьи в интересах энергетики и орошаемого земледелия [18-А]. Включение в работу Рогунского водохранилища позволит с высокой гарантией водообеспеченности довести площади орошаемых земель в бассейне до 4,3 млн.га, в т.ч. ввод земель нового орошения составит 360

тыс.га. Дешевая электроэнергия ГЭС предназначалась для дальнейшего развития Среднеазиатского экономического района и, в первую очередь, для Южно-Таджикского промышленного комплекса, с его алюминиевой промышленностью.

Исходная информация по каскаду ГЭС на реке Вахш

Река Вахш является одной из крупных рек Таджикистана. Верхняя часть бассейна реки расположена на северной окраине Памира в пределах Памирского и Алайского гидрогеологических массивов, средняя и нижняя части – в Южно-Таджикской депрессии, образующей сложный артезианский бассейн. Около 30% площади бассейна располагается выше отметки 4000 м и лишь 13% водосборной площади находится в пределах равнинной части. Река Вахш берет свое начало на высоте 3680 м в северо-восточной части Алайской долины под названием р. Кызылсу. Основным источником питания бассейна р. Вахш являются талые воды сезонных снегов, ледники, вечные снега и дожди. Так как распределение осадков и температур воздуха в бассейне подчинено высотной зональности, то и процессы формирования стока зависят от высотного положения водосбора.

Количество осадков, выпадающих на территории района, характеризуется значениями 819 – 936 мм. При этом около 60% годовой нормы выпадает в период с февраля по март, с наибольшим количеством осадков в марте. Устойчивый снежный покров устанавливается со 2 декады декабря и держится почти до конца марта. Средняя высота снегового покрова изменяется от 40 до 60 см, максимальная - от 90 до 114 см.

Направление ветра в основном западное и определяется долиной реки. Скорость ветра, средняя за год, по данным метеостанции “Оби-Гарм”, равна 1,0 м/с, в Гарме (Рашт) - до 2,5 м/с. Сильные ветры наблюдаются редко. Число дней в году со скоростью ветра более 15 м/с в районе строительства - 10. Расчетные максимальные значения скорости ветра, один раз в 12 лет, достигают 21 м/с.

Сток р. Вахш формируется преимущественно талыми водами сезонных и высокогорных снегов и ледников, что обуславливает его внутригодовое распределение. Естественный режим уровней и расходов р. Вахш в период с октября по март характеризуется устойчивой меженью с небольшими, почти равномерными, расходами воды, наименьшими в декабре, с незначительными колебаниями уровней. На притоках Вахша, расположенных ниже слияния рек Сурхоб и Обихингоу, основная часть стока формируется снеговыми и дождевыми водами, что определяет внутригодовое распределение стока с максимальной концентрацией в весенние месяцы (март, апрель, май).

После слияния с р. Муксу река называется Сурхоб и только после впадения в нее р. Обихингоу приобретает свое настоящее название – Вахш. Бассейн реки Вахш (рисунок 1.8) расположен между 37,10 и 39,74 северной широты и 68,31 и 73,70 восточной долготы. Высота над уровнем моря в бассейне колеблется от 302 до 7050 м над уровнем моря. Длина Вахша 524 км, общая площадь бассейна составляет 39100 км², водосборная площадь в створе плотины Рогунской ГЭС - 30390 км². Намечаемый створ Рогунского гидроузла расположен в верхнем течении Вахша, в 338 км от устья и в 34 км ниже слияния Сурхоб и Обихингоу. Русло на всём протяжении глубоко врезано в дно долины, ширина в межень составляет примерно 50-80 м, в створе плотины – около 20 м. Большая часть бассейна реки находится в горной системе Памиро-Алая. Основная часть стока реки Вахш формируется снеговыми и дождевыми водами, что определяет внутригодовое распределение стока с максимальной концентрацией в весенние месяцы (март, апрель, май) [1-А, 90]. Обилие источников питания, большие абсолютные высоты и горный рельеф обусловили развитие густой речной сети. Всего в бассейне Вахша 6276 рек и малых водотоков общей протяженностью 17073 км.

Бассейн Вахша находится в наиболее высокой части Средней Азии, в пределах двух крупнейших горных систем: Тяньшанской и Памиро-Алайской, с высотой хребтов от 2000 до 5500 м, с отдельными вершинами до 7000 м. Около 30% площади бассейна располагается выше отметки 4000 м в зоне

ледников и вечного снежного покрова. В районе строительства Рогунской ГЭС бассейн реки ограничен Вахшским и Каратегинским хребтами с отметками высот до 2000 м.

Изучение гидрологического режима реки Вахш началось в 30-40 годы, когда были открыты гидрометрические станции в районе кишлака Туткаул и пос. Комсомолабад. Затем в 1960-70 гг. гидрометрическая сеть была расширена, но наблюдения на некоторых постах были кратковременны и часть постов в последствии закрыли [91].

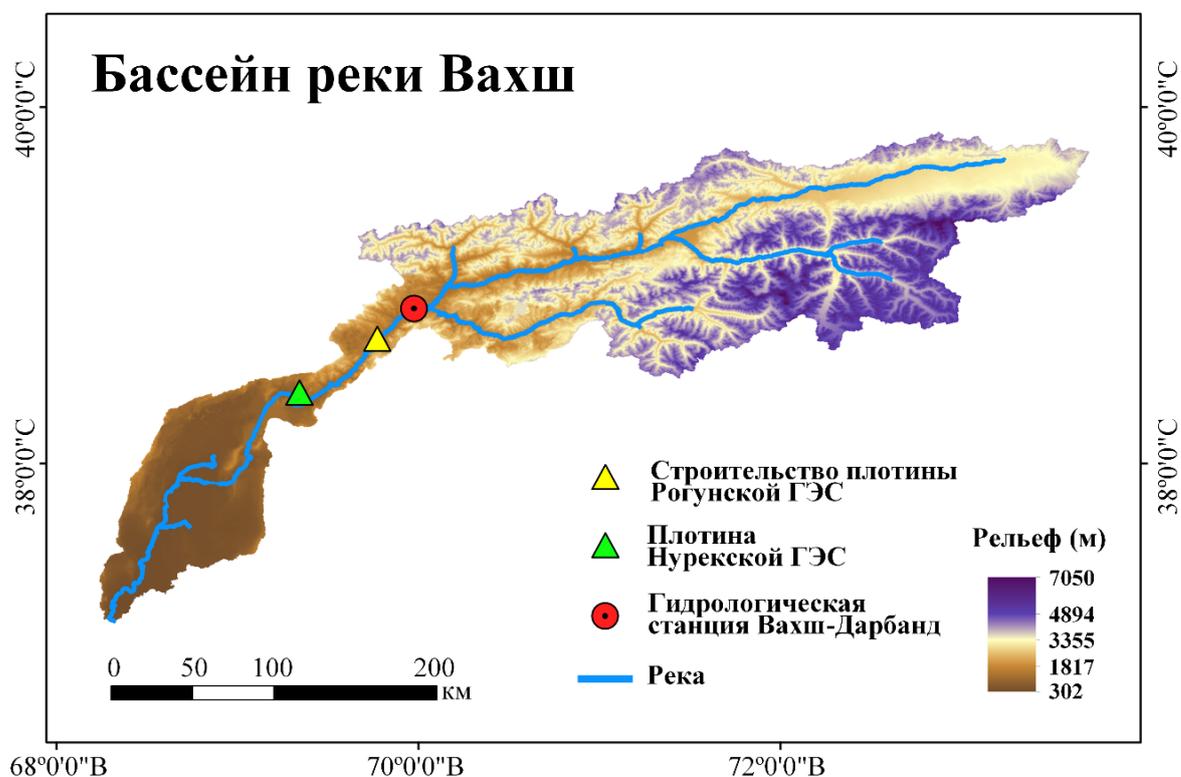


Рисунок 1.8 – Бассейн реки Вахш

Для реки Вахш характерно низкое состояние уровней и расходов в осенне-зимний период, когда питание реки осуществляется в основном грунтовыми водами и периодически выпадающими осадками. Подъем расходов воды начинается в апреле, наибольшие расходы воды наблюдаются в июле, иногда в конце или начале августа, с середины августа начинается спад, продолжающийся до октября. В середине октября устанавливается меженное состояние реки, с расходами порядка 150-250 м³/сек. Максимальные расходы воды на р. Вахш – могут изменяться от 1780 м³/с (30. 05. 1951 г.) до

3730 м³/с. (10. 07. 1953 г.). Зимняя межень устойчива. Минимальные расходы воды наблюдаются в основном в период зимней межени в январе-феврале и составляют 110-140 м³/с.

Среднегодовые расходы воды изменяются от 511 м³/с до 729 м³/с при среднемноголетнем значении 635 м³/с. Основной сток воды р. Вахш проходит на период с мая по сентябрь и составляет 76,0 % от годового стока [92, 93, 11-А]. Среднемноголетний сток в створе плотины Нурекской ГЭС составляет 20,5 км³. На рисунке 1.9 показана исторические среднегодовые расходы реки Вахш.

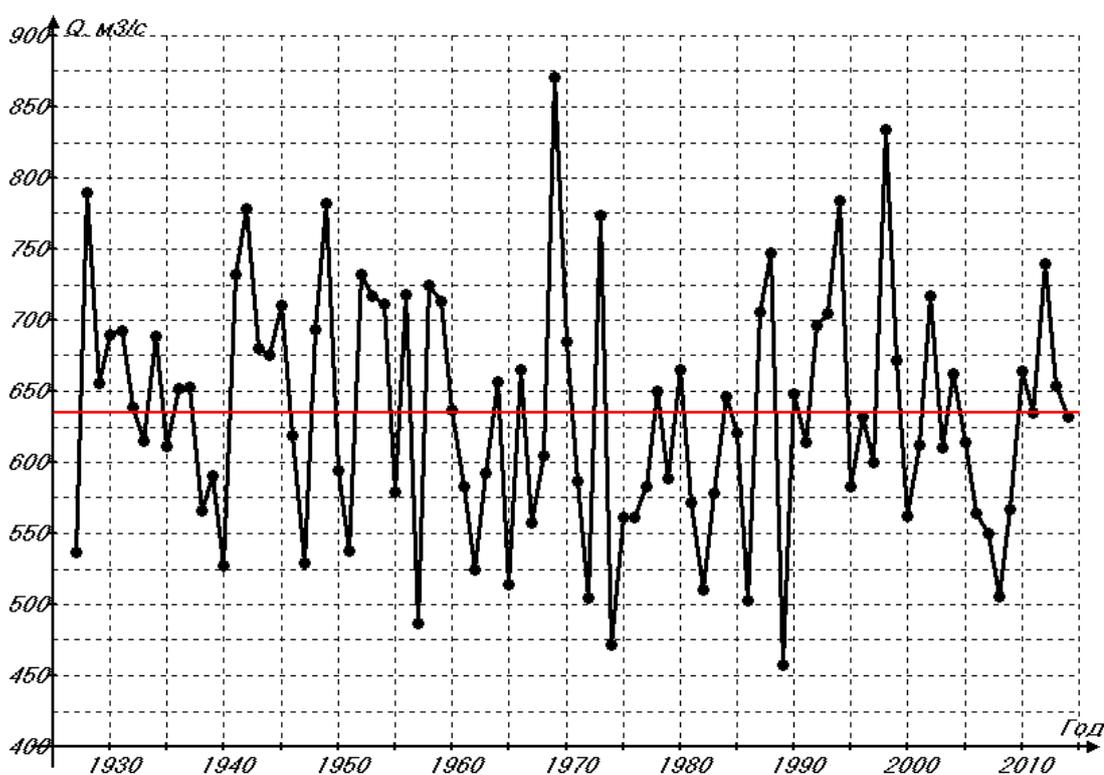


Рисунок 1.9 – Среднегодовые расходы реки Вахш

Изменение уровня воды в водохранилищах, расположенных выше по течению, повлияет на выработку электроэнергии гидроэлектростанциями, расположенными ниже по течению. Каскадное расположение ГЭС переопределяет взаимосвязь режимов водохранилищ ГЭС по расходам воды, а очень часто и по напорам, что должно учитываться в математических

моделях расчета и анализа режимов ГЭС. Внутри года сток распределен крайне неравномерно.

Согласно Национальной стратегии развития, несмотря на значительный гидроэнергетический потенциал и наличие ресурсов ВИЭ, одной из ключевых проблем реального сектора экономики Таджикистана остаётся сезонный дефицит электроэнергии, достигающий 4–4,5 млрд кВт*ч в осенне-зимний период. Это приводит к снижению надёжности энергоснабжения и ограничивает подключение новых потребителей. Указанный дефицит обусловлен совокупностью следующих факторов:

- изолированностью национальной энергосистемы от объединённой энергосистемы Центральной Азии, что ограничивает как импорт в дефицитный период, так и экспорт в период избытка генерации;
- доминированием гидрогенерации (более 98 % в структуре производства), при слабом освоении альтернативных источников энергии;
- недостаточной координацией в управлении водными ресурсами, особенно в АПК, где отсутствует интегрированный водохозяйственный подход, обозначенный как приоритет в государственной стратегии.

На стадии реализации находятся инвестиционные проекты «Реконструкция Нурекской ГЭС», что позволит увеличить мощность станции с 3000 МВт на 10%, что в итоге составит 3316,5 МВт; также реализован проект «Реконструкция ГЭС «Сарбанд» с увеличением мощности с 240 МВт до 270 МВт, и Проект «Реконструкции Кайраккумской ГЭС», который позволили повысить эффективность работы станции и увеличение её мощности с 126 МВт до 174 МВт после полной реконструкции.

Вопросы устойчивого развития энергетического комплекса и энергетической безопасности Таджикистана в экономической аспекте рассмотрены в [94]. Проблемы комплексного использования и регулирования гидроэнергетических ресурсов трансграничных рек и пути их решения, также разработка модели режимов ГЭС рассмотрены в работах [95, 96, 97].

В энергосистеме Республики Таджикистан успешно реализуется Программа снижения потерь электроэнергии. Одним из основных направлений данной Программы является разработка автоматизированной информационно-измерительной системы учёта электроэнергии с использованием современных технологий и средств. Внедрение данной системы в г. Душанбе позволило сократить технические и коммерческие потери электроэнергии и существенно повысить сбор платежей за потреблённую электроэнергию.

В настоящее время в энергосистеме Республики Таджикистан осуществляется внедрение Автоматизированной информационно-измерительной системы учёта электроэнергии верхнего уровня, предусматривающей использование современного парка приборов учёта, эффективной системы сбора и передачи данных, позволяющих обеспечить единство измерений и анализ данных на этапах производства, передачи и распределения электроэнергии формируемого оптового рынка.

1.2.3 Анализ режимов ГЭС каскада Вахш

Регулирование речного стока является необходимым условием рационального использования гидроресурсов и осуществляется водохранилищами путем перераспределения во времени объема естественного стока в соответствии с требованиями водопользователей и водопотребителей. Объем водохранилища прямо влияет на степень регулирования стока.

Водохранилища классифицируются по способности регулирования стока во времени и подразделяются на следующие типы: многолетнего, годового, сезонного, недельного и суточного регулирования. Многолетние водохранилища обеспечивают межгодовое перераспределение водных ресурсов, позволяя аккумулировать сток в водообильные годы и использовать его в маловодные периоды. Подробно типы регулирования водохранилищ описаны в [98, 11]. Годовое регулирование предполагает полный цикл накопления и использования объёма в течение одного года. Сезонные

водохранилища функционируют с учётом сезонных колебаний: накапливая воду в период паводков, они обеспечивают сработку в остальное время. Недельное и суточное регулирование, как правило, используется в электроэнергетике для сглаживания колебаний суточного или недельного графика электропотребления, что способствует снижению перепусков воды и повышению эффективности работы энергосистемы, включая уменьшение износа оборудования тепловых станций. Сложная природа водного баланса рек приводит к необходимости разрабатывать комплексную имитационную модель электроэнергетической системы с каскадами ГЭС [85].

Для учета специфических характеристик функционирования гидроэнергетических объектов необходим специализированный алгоритмический подход, включающий комплекс информационных, математических и статистических инструментов. В него входят: обеспечение данными о стоке, модели водного притока, имитационные и адаптивные методы, статистическая обработка и элементы интерактивного принятия решений. Комплексное представление и анализ технологических режимов каскада ГЭС в составе энергосистемы, способствуя более обоснованному управлению водными и энергетическими ресурсами [85].

На реке Вахш действуют гидростанции суммарной установленной мощностью 5540 МВт. «... Вахшский каскад включает в себя восемь ГЭС, существующих в настоящее время, и находящихся в процессе строительства. Шесть из них находятся на самой реке Вахш: Рогунская, Нурекская, Байпазинская, Сангтудинская ГЭС 1, Сангтудинская ГЭС 2 и Головная. А две из них на Магистральном Вахшском канале: Центральная и Перепадная» [99, 10-А]. Схема ГЭС Вахшского каскада показана на рисунке 1.10.

Каждая электростанция может предоставлять и электричество, и гарантированную мощность для удовлетворения почасового спроса и резерва мощности, соответственно. Последний будет функцией доступности ресурсов и технического обслуживания. Вклад каждой электростанции в резерв мощности будет определен его доступностью во время пика. Ненадежность

определенных ресурсов, включая периодические возобновляемые источники энергии, будет отражена снижением их вклада в резерв мощности.

При оптимизации режимов работы ГЭС определяются также мощности ГЭС, расход воды через ГЭС, расход в нижний бьеф, холостые сбросы, уровни бьефов и другие энергетические и гидравлические показатели. Все эти параметры необходимы для анализа эффективности использования водных ресурсов ГЭС и информационного обеспечения расчета режимов работы ГЭС.

Водно-энергетическое регулирование стока осуществляется по принципу максимальной эффективности всего каскада. В каскаде осуществляется совместное регулирование стока исходя из требований потребителей электроэнергии и мощности каждой станции каскада с учетом их возможностей [100].



Рисунок 1.10 – Схема Вахшского каскада ГЭС

Таким образом, для расчетов длительных режимов энергосистем с каскадом ГЭС должна быть разработана функциональная модель,

связывающая между собой все основные среднеинтервальные параметры режима станций. Она должна базироваться на технологической модели каскада и учитывать особенности расчетов при больших интервалах осреднения параметров – декада, месяц. Модель должна учитывать и взаимосвязь режимов каскада ГЭС в энергосистеме как при наличии, так и при отсутствии гидравлической связи между ними [1-А].

При составлении баланса расхода для каскада ГЭС необходимо учитывать:

- изменение бытовой приточности от верхней ГЭС каскада до нижней за счет боковой приточности в зоне водохранилища каждой ГЭС;
- динамическую емкость водохранилища, которая может и срабатываться, и заполняться;
- время добегания воды от вышележащей станции к нижележащей.

Каскады ГЭС могут иметь как гидравлическую связь по водотоку, так и энергетическую по напору (разомкнутые и сомкнутые каскады). Все эти условия должны учитываться при разработке правил управления режимами работы каскада ГЭС.

Необходимо отметить, что из рассматриваемых ГЭС с водохранилищами только водохранилище Нурекской ГЭС имеет способность годового (сезонного) регулирования стока, а остальные ГЭС, расположенные ниже по течению, обеспечивают лишь суточное регулирование [11-А]. Оптимальное распределение стока в данной работе рассматривается для ГЭС Вахшского каскада, которые имеют водохранилище. Рогунская ГЭС, расположенная перед Нурекской ГЭС, которая на данный момент эксплуатируется не на полную мощность, и у которой водохранилище еще не заполнено до нормального подпорного уровня (НПУ) работает в основном на транзитном стоке реке Вахш.

В таблице 1.1 приведены основные параметры водохранилищ ГЭС Вахшского каскада.

Таблица 1.1 – Параметры водохранилищ ГЭС Вахшского каскада

Гидростанция	НПУ, м.н.у.м.	УМО, м.н.у.м.	Объём водохранилища, км ³			Вид регулирования	Напор, м
			полный	мертвый	полезный		
Рогунская*	1290,0	1185,0	13,30	3,00	10,30	<i>Многолетнее</i>	245
Шуробская**	977,0	973,0	0,08	0,07	0,01		
Нурекская	977,0	857,0	10,50	6,00	4,50	<i>Годовое</i>	223
Байпазинская	630,0	617,0	0,13	0,04	0,09	<i>суточное</i>	54
Сангтудинская 1	571,5	569,6	0,02	0,01	0,01	<i>суточное</i>	58
Сангтудинская 2	508,5	507,8	0,08	0,07	0,01	<i>суточное</i>	21
Головная	485,0	482,0	0,10	0,08	0,02	<i>суточное</i>	23,3

* *строящаяся*; ** *проектная*.

1.2.4 Режимы работы Рогункой ГЭС в ЭЭС РТ

Задача управления каскадом водохранилищ с точки зрения теории оптимального управления представляет собой задачу управления подверженной случайным воздействием динамической системы на фазовые и управляющие переменные, на которые наложены сложные ограничения. Основная трудность, стоящая на пути решения этой задачи, заключается в том, что рассматриваемые системы обычно имеют слишком большую размерность и сложную структуру. Каскады водохранилищ создаются преимущественно для удовлетворения нужд ирригации и энергетики [101, 11, 1-А].

Основой для расчетов режимов является модель ГЭС и каскада, которая формируется с учетом индивидуальных особенностей конкретной ГЭС и условий эксплуатации. Параметры модели включают топологические, гидрологические и технологические особенности ГЭС. Описание каскада учитывает расположение отдельных ГЭС в каскаде и их взаимосвязь по напору и расходу воды. Учет последнего определяется наличием подпора уровня нижнего бьефа ГЭС за счет верхнего бьефа нижележащей станции. Уровень верхнего бьефа определяется по статическим значениям емкости водохранилищ с учетом времени добегания воды от вышележащей станции [102].

В условиях функционирования Рогунской ГЭС обеспечивается возможность поддержания стабильного уровня воды в водохранилище Нурекской ГЭС, при этом основная функция сезонного регулирования стока будет возложена на водохранилище Рогунской ГЭС, уровень воды в котором может колебаться до 30 метров. В работе [103] оценено влияние водохранилища Рогунской ГЭС на водный режим реки Амударья.

Рогунская ГЭС – это масштабный гидроэнергетический проект, разработанный в 1950–1960-х годах в период существования Советского Союза в рамках стратегического плана комплексного развития Центральной Азии, ныне разделённой между независимыми государствами. Проект обладает многоцелевой направленностью: наряду с выработкой электроэнергии, он предусматривает регулирование стока реки Вахш, снижение рисков наводнений и управление наносами, что делает его ключевым элементом в системе устойчивого управления водно-энергетическими ресурсами региона [4-А].

Рогунская ГЭС, представляет собой земляную, камено-набросную плотину высотой 335 метров, с отметкой гребня плотины на отметке 1300 метров над уровнем моря (м.н.у.м), с водохранилищем, где уровень воды, так называемый «нормальный подпорный уровень» (НПУ) расположен на отметке 1290 м.н.у.м. [99]. Водоохранилище Рогунской ГЭС будет иметь годовое регулирование стока, которое может запасать большой объем воды в летнее время и сбрасывать в зимнее время.

Рогунская ГЭС является наиболее крупным на р. Вахш, обеспечивающий наиболее эффективную работу всего Вахшского каскада. С вводом этой станции на полную мощность возможно практически полное освоение водно-энергетического потенциала всей реки Вахш, а также зарегулирование стока реки Амударья [4-А].

Предусматривается состав агрегатов:

- Временное рабочее колесо $D_1 = 4835$ мм и временный генератор мощностью 400 МВт с частотой вращения 125 об/мин.

- Постоянное рабочее колесо $D_1 = 6000$ мм и временный генератор мощностью 400 МВт с частотой вращения 125 об/мин.
- Постоянное рабочее колесо $D_1 = 6000$ мм и постоянный генератор мощностью 600 МВт с частотой вращения 166,7 об/мин.

Пуск первых двух агрегатов предполагается осуществить на пониженном напоре с временными рабочими колесами и временными генераторами на отметке УВБ 1055 м.

Работа гидротурбинного оборудования пускового комплекса (агрегаты №6 и 5) при частоте вращения агрегата 125 об/мин предусматривается в два этапа:

1) При напорах от 80 до 120 м – пуск первых двух агрегатов с временными рабочими колесами, временными генераторами и устройством временного водоподводящего тракта.

2) При напорах от 120 до 185 м выполняется замена временных рабочих колес на постоянные с продолжением работы временных генераторов и подвода воды от временного водоприемника.

При достижении напора 185 м (УВБ 1165 м) производится пуск агрегатов № 4 и 3 с установкой постоянных рабочих колес и генераторов с частотой вращения 166,7 об/мин, работающие от постоянного водоприемника с пониженным порогом на отм. 1152,000 м.

При достижении напора 200 м (УВБ 1185 м) производится пуск агрегатов № 2 и 1 с установкой постоянных рабочих колес и генераторов с частотой вращения 166,7 об/мин, работающие от постоянного водоприемника с нормальным порогом входа на отм. 1172 м.

На агрегатах № 6 и 5 производится замена обмотки статора и полюсов ротора на постоянные и далее они продолжают работу по постоянной схеме.

В диапазоне напоров 120 - 185 м работает постоянное рабочее колесо P0310/1107-B-600 с временным генератором и частотой вращения 125 об/мин.

Начиная с напора 185 м, турбины с постоянным рабочим колесом переключаются на постоянный генератор с частотой вращения 166,7 об/мин.

При эксплуатации гидротурбинной установки в заданных режимах интенсивность кавитационной эрозии не должна вызывать вынос металла проточной части более 60 кг за 8000 ч работы.

Как уже было отмечено на сегодняшний день введены в эксплуатацию два гидроагрегата Рогунской ГЭС. Первый агрегат (ГА №6) мощностью 360 МВт был введен в эксплуатацию 16 ноября 2018 года, второй (ГА №5), мощностью 400 МВт 9 сентября 2019 года. Параметры гидрогенераторов Рогунской ГЭС приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры гидрогенераторов Рогунской ГЭС

№	Наименование	Постоянный генератор	Временный генератор №5	Временный генератор №6
1	Тип	СВ 1140/320-36УХЛ4	СВ 1140/320-48УХЛ4	СВ 1140/280-48УХЛ4
2	Мощность: – Номинальная – Максимальная	666 МВА/600 МВт 700 МВА/630 МВт	444 МВА/400 МВт	379 МВА/360 МВт
3	Номинальное напряжение	15750 В	15750 В	15750 В
4	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,9	0,9	0,95

В связи с большим диапазоном напоров, при которых работают агрегаты ГЭС в период строительства и временной эксплуатации, изменяющегося от 80 м при пуске первых агрегатов (УВБ 1055,00 м) до 320 м (НПУ 1290,00 м), выполняется поэтапный ввод гидроэнергетического оборудования.

Введённые в эксплуатацию первые два агрегата (ГА №6 и №5) с временными рабочими колёсами и временными гидрогенераторами на отметке УВБ 1055 м работают на пониженных напорах (от 80 до 120 м). При напорах от 120 до 185 м выполняется замена временных рабочих колёс на постоянные с продолжением работы временными генераторами [4-А].

При достижении напора 185 м (УВБ 1165 м) планируется пуск агрегатов № 4 и 3 с установкой постоянных рабочих колёс и генераторов с частотой вращения 166,7 об/мин, работающие от постоянного водоприемника с пониженным порогом на отм. 1152,000 м.

При достижении напора 200 м (УВБ 1185 м) производится пуск агрегатов № 2 и 1 с установкой постоянных рабочих колес и генераторов с частотой вращения 166,7 об/мин, работающие от постоянного водоприемника с нормальным порогом входа на отм. 1172 м.

На Рогунской ГЭС по схеме блок генератор-трансформатор введены в эксплуатацию два трансформатора мощностью 700МВА, напряжением 525/15,75кВ. Также установлены две группы однофазных автотрансформаторов 3х167 МВА, напряжением 500/220кВ, введена распределительная 220кВ с двумя отходящими линиями на районную подстанцию Рогун 220/110/35кВ.

Выдача мощности на данный момент при работе первых двух агрегатов выполняются по двум ВЛ 500кВ на ПС «Душанбе-500» и двумя ВЛ 220кВ на ПС 220/110/35кВ «Рогун».

Выдача мощности Рогунской ГЭС при полном развитии должна выполняться по пяти ВЛ 500кВ (Душанбе – 2 ВЛ 500кВ; Сангтудинская ГЭС-1 – 1 ВЛ 500кВ; п/с «Южный» - 1ВЛ 500кВ и Ош – 1 ВЛ 500кВ) и по двум ВЛ 220кВ на п/с 220/110/35кВ «Рогун». Связь ОРУ 500кВ и ОРУ 220кВ должна выполняться двумя автотрансформаторными группами 3х167 МВА.

По предельно допустимой отключаемой мощности ГЭС 600 МВт принята выдача мощности Рогунской ГЭС в систему шестью одиночными блоками генератор – трансформатор 500/15,75кВ, с установкой выключателей между генератором и трансформатором.

Связь генератора с блочным трансформатором выполняется пофазно экранированным токопроводом 20кВ, 25700 А с естественным охлаждением и увеличенным диаметром оболочки. В токопровод встраиваются генераторный модуль 30кВ, 28000 А с выключателем, разъединителем, заземлителем, трансформаторами тока и напряжения, защитной емкостью и ОПН, а также дополнительные трансформаторы тока и разъединитель электрического торможения.

На открытой площадке, отм.1019.00, примерно в 650 метрах от выходного портала кабельного туннеля 500кВ, сооружаются здание КРУЭ 500кВ и 220кВ и здание технологического корпуса.

Связь КРУЭ 500кВ и КРУЭ 220кВ выполняется двумя группами однофазных автотрансформаторов 3х167 МВА 525/220/15,75кВ. Обмотки НН автотрансформаторов используются для питания трансформаторов собственных нужд 15,75/6,3кВ.

Задачи управления режимами гидроэнергетических систем являются комплексными и должны учитывать многообразие критериев эффективности режимов работы. Режим работы ГЭС как отдельной, так и их каскадов, как правило, участвуют в энергосистеме не отдельно, а совместно с другими видами станций. Так, в зависимости от характера покрытия графика нагрузки энергосистемы - участие ГЭС может находиться в разной ее части: базисной, полупиковой или пиковой части [104].

В этих условиях основными энергетическими и режимными функциями ГЭС на сегодняшний день стало приниматься:

- участие в покрытии пиковой части графиков нагрузки объединенных энергосистем;
- регулирование частоты и мощности в энергосистемах и перетоков мощности по межсистемным линиям электропередачи;
- выполнение роли аварийного и нагрузочного резерва энергосистемы.

Оптимизация долгосрочных режимов включает в себя нахождение оптимальных режимов работы ГЭС для всего цикла регулирования. Сначала разрабатываются долгосрочные режимы работы ГЭС, где определяется оптимальное распределение гидроресурсов за весь период регулирования. Назначаются оптимальные режимы ГЭС в энергосистеме в долгосрочном периоде (год, несколько лет), а затем эти данные используются в определении оптимальных краткосрочных режимов ГЭС в энергосистеме. Например, если ГЭС имеет водохранилище с годовым регулированием стока, то должны быть определены ограничения по расходам воды за месяц, неделю, сутки [104, 11].

Функции гидроэлектростанций в системе различны и зависят они от технических возможностей станций. Основными из них являются:

1. Выдача рабочей мощности и энергии в требуемом по балансу ЭЭС режиме.
2. Обеспечение резерва активной мощности. Резерв может располагаться как на включенном, но недогруженном генерирующем оборудовании, так и на отключенном от сети.
3. Выдача реактивной мощности.
4. Обеспечение резерва реактивной мощности, которая осуществляется как за счет гидроагрегатов в генераторном режиме, так и за счет их перевода в режим синхронного компенсатора при наличии конструктивной и технической возможностей.
5. Поддержание качества электроэнергии по частоте.
6. Регулирование напряжение на шинах станции.

Ниже приведены графики расхода воды на выработку электроэнергии, расходы на холостые сбросы и расходы на Рогунской ГЭС в целом для 2019, 2020 и 2021 годов на рисунках 1.11, 1.12, 1.13.

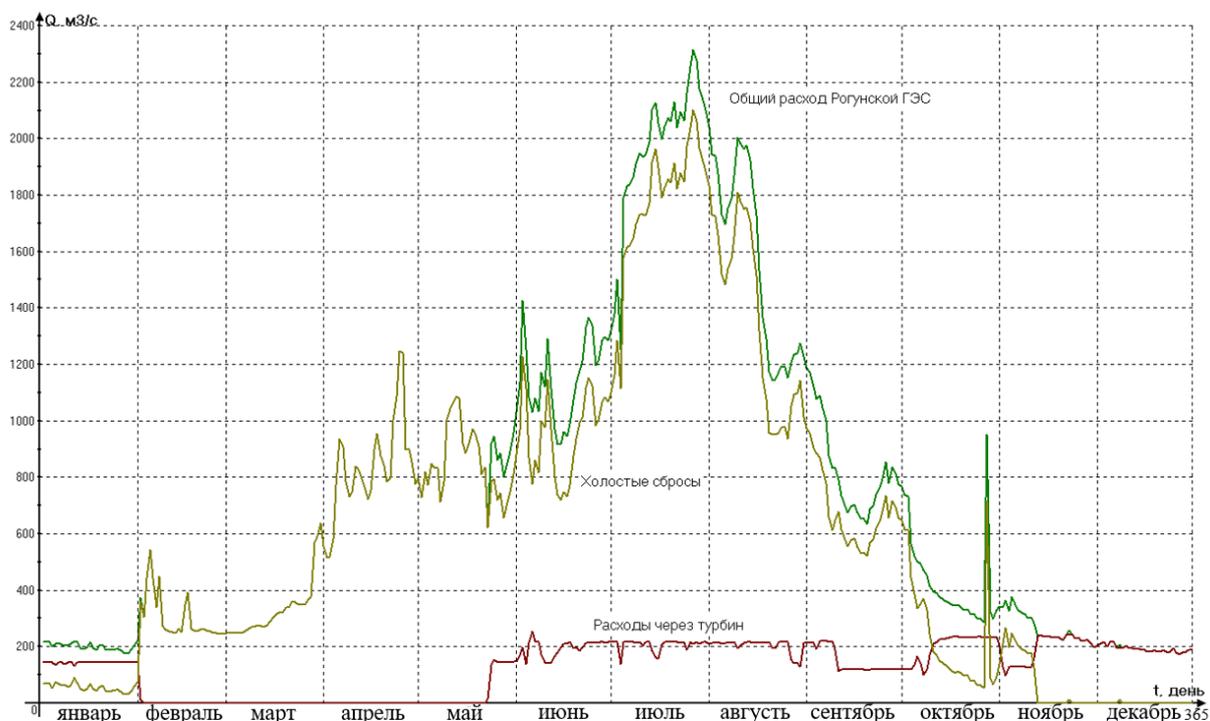


Рисунок 1.11 – Расходы Рогунской ГЭС в 2019 году

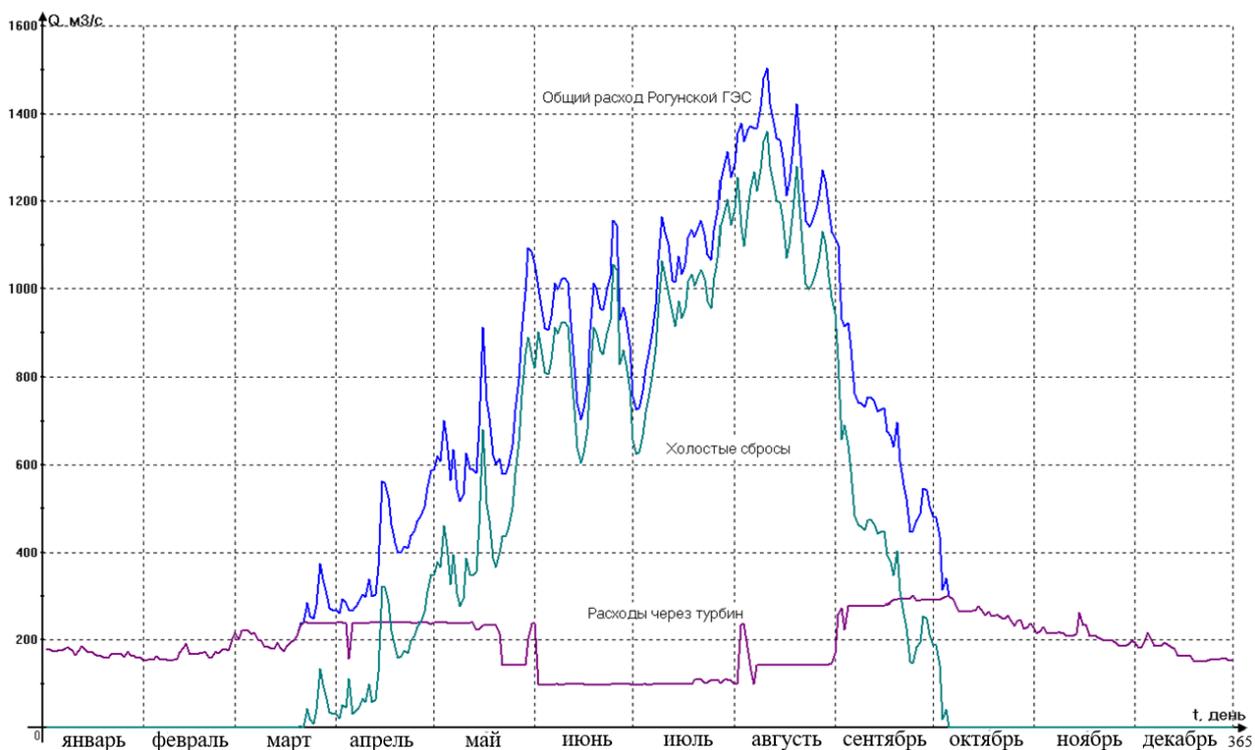


Рисунок 1.12 – Расходы Рогунской ГЭС в 2020 году

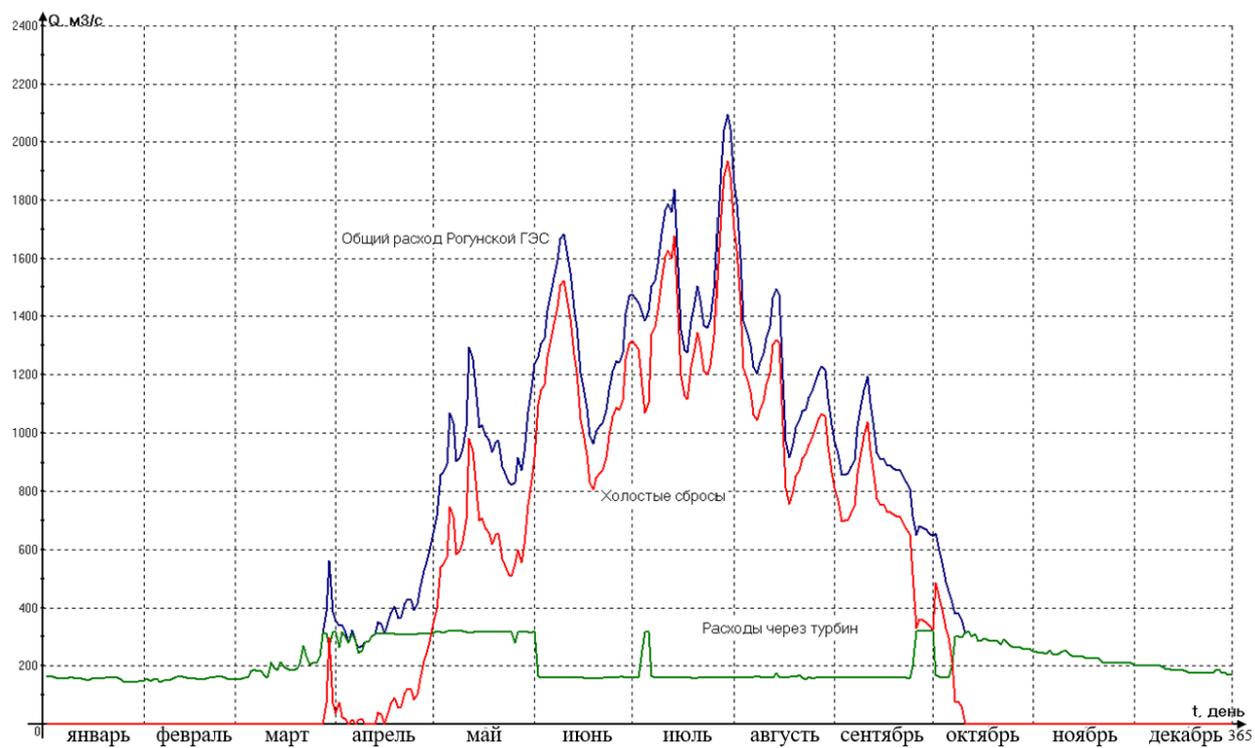


Рисунок 1.13 – Расходы Рогунской ГЭС в 2021 году

На рисунке 1.14 показаны расходы воды на Рогунской ГЭС с 2019 по 2022 гг.

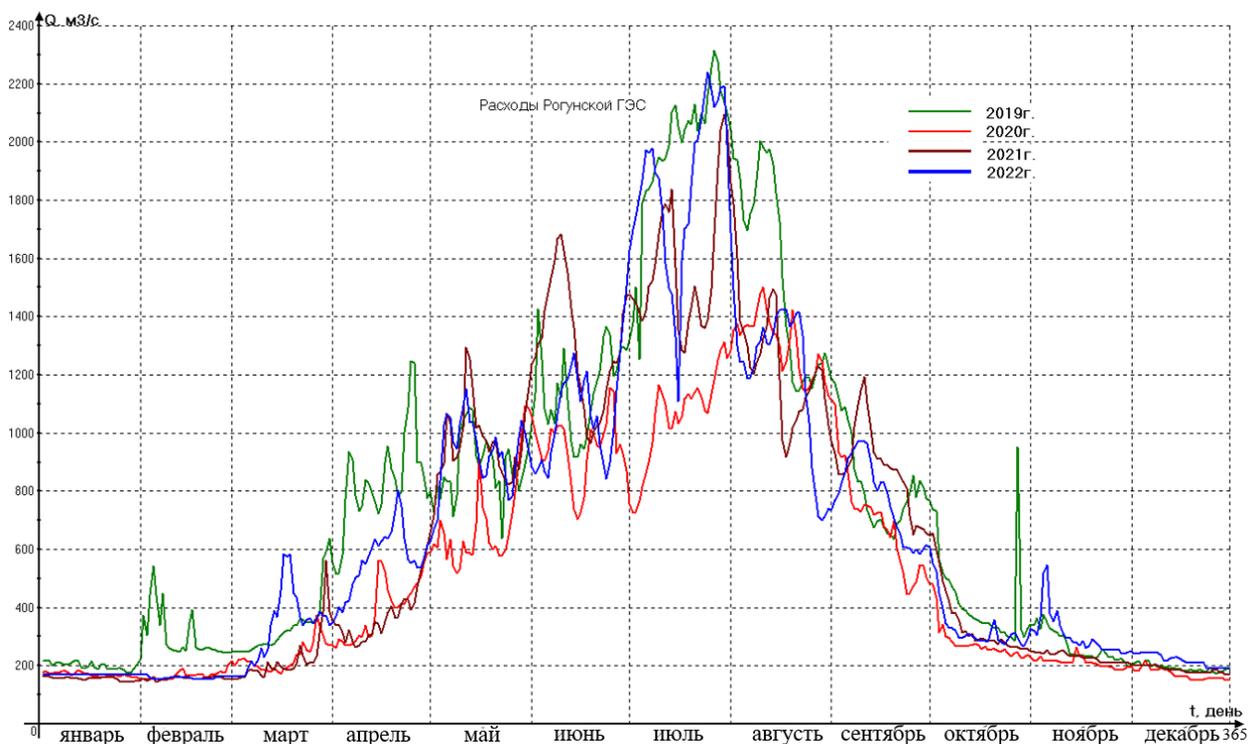


Рисунок 1.14 – Расходы воды на Рогунской ГЭС с 2019 по 2022 гг.

Заполнение водохранилища Рогунской ГЭС на данный момент зависит от уровня строящейся плотины. При высоте плотины до 1065 м.н.у.м., выполнялось наполнение водохранилища до отметки верхнего бьефа 1055 м.н.у.м., что являлась пусковой отметкой для ввода в эксплуатацию первых двух гидроагрегатов станции, оборудованных временными колесами. Примерно после 2 года эксплуатации ГЭС уровень верхнего бьефа водохранилища поднимется до 1070 м.н.у.м., при высоте плотины 1100 м.н.у.м.

Поскольку река Вахш является ключевым притоком Амударьи, процессы оптимизации эксплуатации её гидроэнергетического каскада должны осуществляться с учетом существующих международных соглашений и практик по совместному управлению водными ресурсами региона. Водные ресурсы бассейна Амударьи распределяются между Афганистаном, Таджикистаном, Туркменистаном, Узбекистаном, а также бассейном Аральского моря, при координирующей роли Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии (МКВК), действующей в соответствии с положениями Нукусской декларации и Протокола № 566 [8].

Для начального заполнения Рогунского водохранилища, Таджикистан будет использовать неиспользованную долю воды, выделенную ему МКВК, оставаясь при этом в рамках Нукусской Декларации, Протокола 566 и средних лимитов, установленных МКВК.

График выработки мощности Рогунской ГЭС приведена на рисунке 1.16. При работе на низких напорах, доля выработки электроэнергии Рогунской ГЭС составляет около 7,5 % от общей выработки электроэнергии в Республике Таджикистан [4-А].

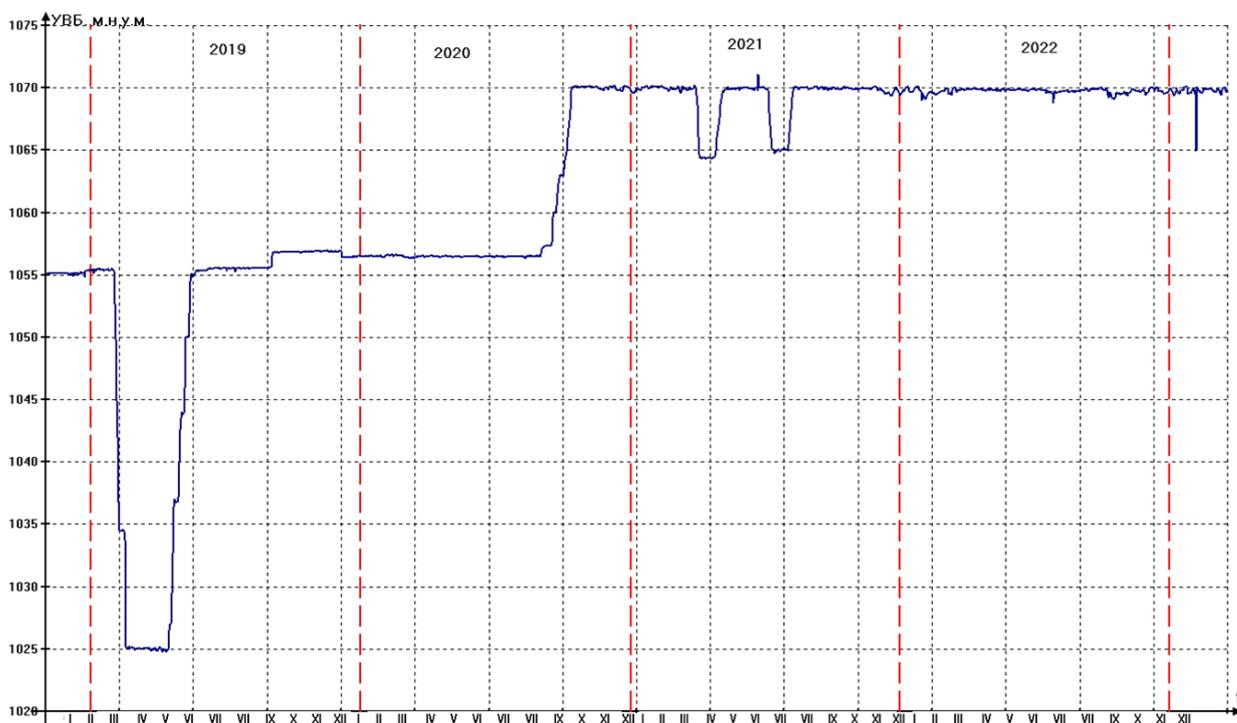


Рисунок 1.15 – Заполнение водохранилища Рогунской ГЭС

Ниже приведены основные характеристики Рогунской ГЭС:

- Тип станции подземная;
- Установленная мощность МВт 3600;
- Максимальная мощность ГЭС, при напоре больше 252,5 м, МВт 3780;
- Количество агрегатов 6;
- Полезная емкость водохранилища, км³ 8,6;
- Число часов использования установленной мощности, ч 3700;
- Выработка электроэнергии, ГВт·ч/год 13300;

- Расчетные уровни (отметки) в верхнем бьефе:
 - Наибольший форсированный, м 1294,3;*
 - Нормальный (НПУ), м 1290,0;*
 - Минимальная отметка уровня сработки водохранилища после заиления, м 1185,0;*
 - Пусковой - Отметка уровня сработки водохранилища в начальный период эксплуатации (до заиления) – 1215,00 м.*
 - Расчетный уровень НБ при работе всех агрегатов, м 979,80;*
- Напоры нетто:
 - Наибольший, м 320,0;*
 - Расчетный, м 245,0;*
 - Наименьший, м 185,0;*
 - Пусковой (турбина с временным рабочим колесом), м 80,0;*
 - Средневзвешенный, м 268,0;*
- Расходы Воды:
 - Максимальный расчётный расход одного агрегата – 271 м³/с;*
 - Максимальный расход ГЭС, м³/сек 1644;*
 - Среднеэнергетический расход, м³/сек 1225.*

Условия регулирования следующие: полная сработка полезного объёма водохранилища до отметки УМО 1185,00 м осуществляется не чаще одного раза в период от 10 до 35 лет. Сработка водохранилища в начальный период эксплуатации возможна до отм. 1215,00 м, в отдельные периоды может осуществляться ежегодно, но могут быть и перерывы продолжительностью от 3 до 8 лет, а в отдельных случаях, перерывы могут достигать 15 - 17 лет в зависимости от водности периода.

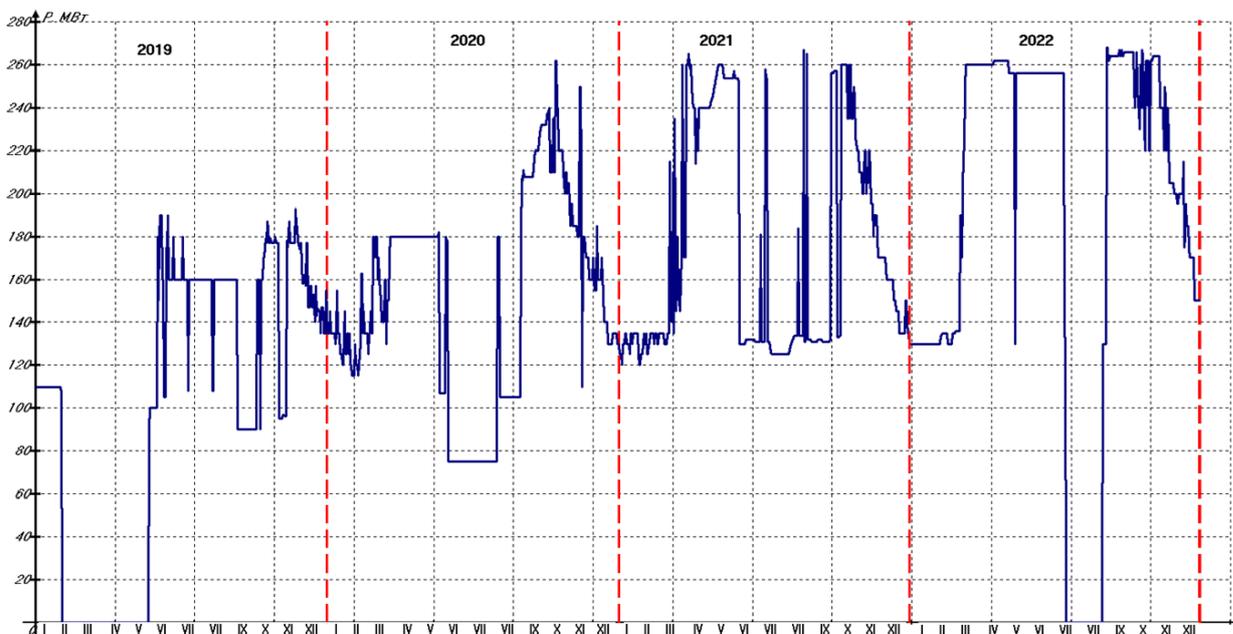


Рисунок 1.16 – Выработка мощности Рогунской ГЭС

Таким образом, введенная в эксплуатацию первая очередь строительства Рогунской ГЭС позволила увеличить выработку электроэнергии в Республике почти на 8%. На данный момент идет строительство плотины, подготовка к вводу в эксплуатацию третьего гидроагрегата (ГА №4), и параллельное заполнение водохранилища. По мере заполнения водохранилища, т.е., с повышением уровня верхнего бьефа на ГЭС повышается напор, что приведет к увеличению вырабатываемой мощности. После ввода на полную мощность Рогунская ГЭС способствует снижению дефицита электроэнергии в зимнем периоде, а также позволит экспортировать электрическую энергию в соседние страны, такие как Афганистан и Пакистан в летний период в большом объеме. Водоохранилище Рогунской ГЭС с годовым регулированием стока реки позволяет повысить эффективность функционирования каскада ГЭС на реке Вахш, рационально использовать водные ресурсы бассейна. Особенно оптимальное управление долгосрочными и краткосрочными режимами Рогунской и Нурекской ГЭС позволяет увеличить выработку электроэнергии для ГЭС всего каскада. Кроме того, водохранилище Рогунской ГЭС располагаясь перед Нурекской ГЭС, удерживает наносы, тем самым смягчает

процесс заиливания водохранилища Нурекской ГЭС. Это позволяет сохранить полезный объём водохранилища Нурекской ГЭС.

Влияние изменения климата и таяния ледников на сток реки Вахш представляет собой долгосрочную угрозу для гидроэнергетики и водной безопасности, что требует адаптивных стратегий и усиленного регионального сотрудничества для смягчения будущих рисков. В целом, Вахшский каскад ГЭС представляет собой сложную систему, успешное функционирование которой зависит от постоянного инженерного совершенствования, эффективного управления природными рисками и гармонизации интересов всех заинтересованных сторон в регионе.

1.2.5 Влияние изменения климата на гидроэнергетику Таджикистана и меры адаптации

Во всем мире за последнее десятилетие проведено множество исследований, посвященных влиянию изменения климата на гидроэнергетику. Таджикистан, будучи «водной башней» Центральной Азии, критически зависим от гидроэнергетики, которая составляет более 90% его энергобаланса. Это делает страну чрезвычайно уязвимой к климатическим изменениям, особенно к тем, что затрагивают водные ресурсы. Основными климатическими факторами являются ускоренное таяние ледников, изменение режима осадков и увеличение частоты экстремальных погодных явлений. Прямые последствия этих изменений для гидроэнергетики включают снижение уровня водохранилищ из-за засух и непостоянства снегопадов, что приводит к сокращению выработки электроэнергии, особенно в зимние месяцы.

Изменение климата оказывает комплексное воздействие на функционирование ГЭС. Это требует перехода от традиционного управления водными ресурсами к адаптивным стратегиям с применением прогнозных моделей, устойчивого проектирования и регионального сотрудничества. Наиболее критичными климатическими рисками для гидроэнергетики Таджикистана являются: сезонный дефицит воды зимой, возможное общее

уменьшение стока рек к концу века, риск более частых засух/паводков и нагрузка на старую инфраструктуру. Однако у страны есть и сильные стороны: наличие горных водохранилищ для многолетнего регулирования (Нурек, в будущем Рогун), большой неиспользованный гидропотенциал.

Наблюдается кажущееся противоречие между огромным неиспользованным гидроэнергетическим потенциалом Таджикистана и его хронической нехваткой энергии, а также крайней климатической уязвимостью. Это объясняется тем, что гидроэнергетика, хотя и считается "зеленым" источником энергии, по своей природе чувствительна к гидрологической изменчивости. Ресурс, который мог бы обеспечить энергетическую независимость – вода – одновременно является основным каналом воздействия изменения климата. Таким образом, наличие обильных водных ресурсов само по себе недостаточно; их надежность и предсказуемость имеют первостепенное значение для энергетической безопасности. Это означает, что "зеленый энергетический переход", сосредоточенный исключительно на расширении гидроэнергетики без надежных мер по повышению климатической устойчивости, рискует усугубить существующие уязвимости, а не разрешить их. Будущее развитие энергетики должно отдавать приоритет адаптивной способности и диверсификации для смягчения присущих климатических рисков, связанных с энергосистемой, зависящей от одного источника.

Учитывая высокую климатическую уязвимость гидроэнергетических систем в Центральной Азии, особенно в горных странах, таких как Республика Таджикистан, обеспечение устойчивости энергосистемы становится приоритетной задачей государственной и отраслевой политики. Адаптационные меры в энергетическом секторе Таджикистана направлены на снижение уязвимости инфраструктуры и устойчивое функционирование ГЭС, распределительных сетей и иных объектов, особенно в условиях изменений гидрологического режима, учащения засух, паводков и экстремальных погодных явлений.

Согласно прогнозам Программы ООН по окружающей среде, к 2050 году более 50% ледников Центральной Азии могут исчезнуть [105]. Только в Таджикистане за последние три десятилетия уже растаяло свыше 1 000 ледников из общего числа около 14 000. Эти процессы оказывают разрушительное воздействие на хрупкие горные экосистемы и создают серьёзную угрозу устойчивому водоснабжению в регионе. Уменьшение ледниковых запасов воды ведёт к сезонному дефициту стока, что особенно критично для сельского хозяйства, водохранилищ и гидроэнергетики стран, зависящих от таяния снежно-ледниковых ресурсов.

Согласованные с национальной климатической политикой, Целями устойчивого развития ООН и международными обязательствами (в частности, Парижским соглашением), ключевые направления адаптации включают следующие аспекты.

Одним из приоритетных направлений является повышение устойчивости существующих и проектируемых ГЭС, включая крупнейшие объекты, такие как Рогунская и Нурекская ГЭС. К основным мерам относятся:

- модернизация и сейсмостойкое усиление плотин и водосбросных сооружений;
- защита гидроузлов от селевых потоков и паводков;
- обеспечение работоспособности гидротехнической инфраструктуры при экстремальных климатических сценариях;
- разработка сценариев адаптивного управления водными ресурсами в каскаде ГЭС реки Вахш с учетом прогнозов долгосрочных изменений стока.

Энергетический сектор Таджикистана является одновременно критически уязвимым и ключевым для реализации национальных мер по адаптации к изменению климата. Основные направления включают:

- устойчивое управление каскадом ГЭС;
- модернизацию и цифровизацию энергетических систем;
- развитие возобновляемой энергетики;

- повышение энергоэффективности и снижение технических потерь;
- институциональное развитие и подготовку кадров;
- привлечение международного финансирования.

Реализация этих мер позволит не только адаптироваться к текущим и прогнозируемым климатическим изменениям, но и обеспечить долгосрочную энергетическую безопасность и устойчивое развитие страны.

Изменение температуры, количества осадков, снеготаяния и испарения напрямую влияет на речной сток, от которого зависит выработка электроэнергии на ГЭС:

- *Увеличение засушливых периодов снижает приток воды в водохранилища и ограничивает возможности генерации.*
- *Интенсивные осадки и наводнения могут привести к необходимости сброса воды без выработки электроэнергии.*
- *Смещение сезона снеготаяния (весной на более ранние сроки) приводит к изменению годового распределения водных ресурсов.*

Строящаяся Рогунская ГЭС с проектной плотиной 335 м и объемом водохранилища ~13,3 км³ – центральный элемент стратегии Таджикистана как по обеспечению энергетической независимости, так и по адаптации к климатическим изменениям. Благодаря гигантской емкости, Рогун сможет аккумулировать избыточный сток влажных лет и отдавать его в засухи.

Таким образом, гидроэнергетике приходится одновременно справляться с недостатком и избытком воды, что требует высокой адаптивности инфраструктуры, точного гидрологического прогнозирования и гибких эксплуатационных стратегий. Для устойчивого управления водными ресурсами необходимы крупные регулирующие емкости, такие как у Рогунской ГЭС, обеспечивающие не только генерацию энергии, но и эффективный контроль паводков и повышение водной безопасности в долгосрочной перспективе.

1.3 Выводы по первой главе

Анализ и обзор существующих методов оптимизации в электроэнергетике показывают, что: Классические математические методы сохраняют значимость для задач с детерминированной структурой и ограниченным числом переменных, однако теряют эффективность при высокой размерности и неопределённости. Метаэвристические методы, обладая высокой гибкостью, демонстрируют хорошие результаты при решении сложных задач, включая учёт экологических и экономических факторов, несмотря на отсутствие строгих гарантий глобального оптимума. Методы машинного обучения выделяются способностью обрабатывать большие массивы разнородных данных и адаптироваться к динамическим условиям, что делает их особенно перспективными в контексте цифровизации и интеграции ВИЭ [7-А, 13-А, 17-А].

Таким образом, оптимальный подход заключается в использовании этих методов в зависимости от природы задачи, сложности системы и доступности данных. Для задач прогнозирования речного стока, где требуется анализ больших объёмов данных, наилучшие результаты обеспечивают методы машинного обучения благодаря высокой точности и способности выявлять скрытые зависимости. В то же время, при оптимизации режимов работы каскада ГЭС, где формализована математическая модель с ограничениями, более целесообразно применять классические методы оптимизации. Выбор подхода должен соответствовать специфике задачи и характеру исходных данных.

Ввод в эксплуатацию первой очереди Рогунской ГЭС обеспечил рост выработки электроэнергии в Таджикистане на 8%. После выхода на полную мощность Рогунская ГЭС позволит снизить зимний дефицит электроэнергии и расширить экспорт в страны региона в летний период. Многолетнее регулирование стока Рогунского водохранилища повышает эффективность всего каскада ГЭС на реке Вахш [1-А, 4-А, 14-А, 18-А].

Учитывая вышеизложенное, необходимо решить следующие приоритетные задачи:

Разработка и внедрение моделей прогнозирования речного стока реки Вахш на основе методов машинного обучения, позволяющих обрабатывать большие объёмы гидрометеорологических данных в условиях изменения климата.

Построение комплексных моделей краткосрочной и долгосрочной оптимизации режимов работы каскада ГЭС, учитывающих водный баланс, энергетические потребности, технические ограничения оборудования и возможные сценарии водности реки. Такие модели должны обеспечивать максимальную эффективность, надёжность и устойчивость функционирования каскада в текущих и перспективных климатических условиях [8-А, 12-А].

Интеграция интеллектуальных прогнозных и оптимизационных подходов в управление каскадом ГЭС на реке Вахш представляет собой стратегическое направление для обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития гидроэнергетики Таджикистана.

ГЛАВА 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕКИ ВАХШ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РОГУНСКОЙ ГЭС

2.1. Регулирование речного стока

Регулирование речного стока – это процесс перераспределения водных ресурсов во времени и в пространстве, которая осуществляется использованием водохранилища. В период, когда объем стока воды в реках наибольший (период паводка или межени) вода запасается в водохранилищах и расходуется, когда сток реки уменьшается. Таким образом удовлетворяется потребности различных водопотребителей и водопользователей. Отсюда появляются различные назначения водохранилищ – энергетическая, водохозяйственная (ирригационная) и др. [106]. Например, если водохранилища имеет ирригационное назначение, как Кайрокумское водохранилища, то оно будет запасать воды для орошения земель в летнем периоде, если водохранилища имеет энергетическое назначение, то она будет запасать воду в водохранилище в весенне-летнем периоде, когда сток реки наибольший и будет срабатывать ее для получения электрической энергии в осенне-зимнем периоде, когда сток воды в реках наименьший, например, Нурекское водохранилище.

Речной сток имеет стохастический и вероятностный характер, которая зависит он многих природных и атмосферных факторов. Он меняется как по месяцам, сезонам года и год за годом в зависимости от питания реки, то есть, сток реки характеризуется неравномерностью [17]. Сезонная и суточная динамика речного стока резко расходится с характером потребления воды в различных секторах народного хозяйства. Для энергетики, в частности, оптимальным является максимально равномерный водный режим в многолетнем аспекте. В годовом разрезе наибольшая потребность в водных ресурсах для гидроэнергетики приходится на осенне-зимний период, когда приточность рек достигает минимальных значений. Суточный график электрических нагрузок также отличается выраженной неравномерностью, в то время как суточные колебания естественного стока, особенно на равнинных

реках со снеговым питанием, являются незначительными и относительно стабильными [11].

Эффективность и степень регулирования речного стока количественно характеризуют с помощью специальных показателей.

Степень зарегулированности стока определяется относительным объемом водохранилища – коэффициентом емкости β , который определяется отношением полезного объема водохранилища $V_{\text{полез}}$ к среднему за многолетний период объему годового стока W_0 в створе плотины:

$$\beta = \frac{V_{\text{полез}}}{W_0} \quad (2.1)$$

В современных условиях любое гидротехническое сооружение, участвующее в регулировании речного стока, выполняет, как правило, многоцелевую функцию. Такие сооружения проектируются и эксплуатируются с учетом комплексного назначения, включающего не только обеспечение водоснабжения и выработку электроэнергии, но и задачи, связанные с ирригацией, противопаводковой защитой, экологическим управлением, судоходством, а также поддержанием санитарно-гигиенических норм водоёмов. Реализация этих целей требует согласованного управления водными ресурсами, с использованием современных методов моделирования, прогнозирования и оптимизации режимов эксплуатации водохранилищ [11].

Как была отмечено ранее, регулирование стока подразделяется на водноэнергетическое и водохозяйственное, в зависимости от целевой направленности управления водными ресурсами. Водноэнергетическое регулирование как правило - это перераспределение стока реки для назначения рабочих режимов ГЭС, то есть с целью максимальной эффективной выработки электроэнергии на них. В этом случае, приоритетом регулирования водохранилища, является энергетика.

Водно-хозяйственное регулирование, напротив, ориентировано на удовлетворение потребностей в водоснабжении, ирригации и других несвязанных с выработкой электроэнергии задач. Здесь объектом регулирования выступает преимущественно расход, а напор не считается управляющим параметром.

Продолжительность критического маловодного периода напрямую зависит от типа водохранилищного регулирования. При сезонном регулировании оно, как правило, ограничивается одним гидрологическим сезоном. В случае многолетнего регулирования стока продолжительность критического периода может составлять от 1,5 до 10–20 и более лет, в зависимости от гидрологических условий и объема полезного регулирования. Наиболее короткие критические периоды характерны для водохранилищ Рыбинской, Красноярской, Нурекской и Рогунской ГЭС, благодаря их сравнительно высокому уровню надежности водообеспечения. В то же время Иркутская, Братская и Токтогульская ГЭС характеризуются значительно более длительными периодами регулирования, что обусловлено как природными особенностями бассейнов, так и масштабами сезонной и многолетней неравномерности притока [17].

Необходимость регулирования речного стока характеризуется неравномерностью между притоком воды в реках и режимом потребления водопотребителей и водопользователей. В период, когда приток реки превышает потребление воды, избыток воды накапливается в водохранилищах, а в период, когда приток реки будет меньше, чем спрос водопользователей и водопользователей ранее накопленная вода будет использоваться.

Такой принцип перераспределения речного стока обеспечивает надёжное функционирование ГЭС в условиях сезонной и межгодовой изменчивости гидрологических режимов речного стока. Оптимальное управление режимами сработки и заполнения водохранилищами является основой эффективного водноэнергетического планирования.

Промежуток времени от начала какого-либо одного периода полной сработки водохранилища от НПУ до начала аналогичного следующего периода после очередного заполнения называется циклом регулирования (рисунок 2.1).

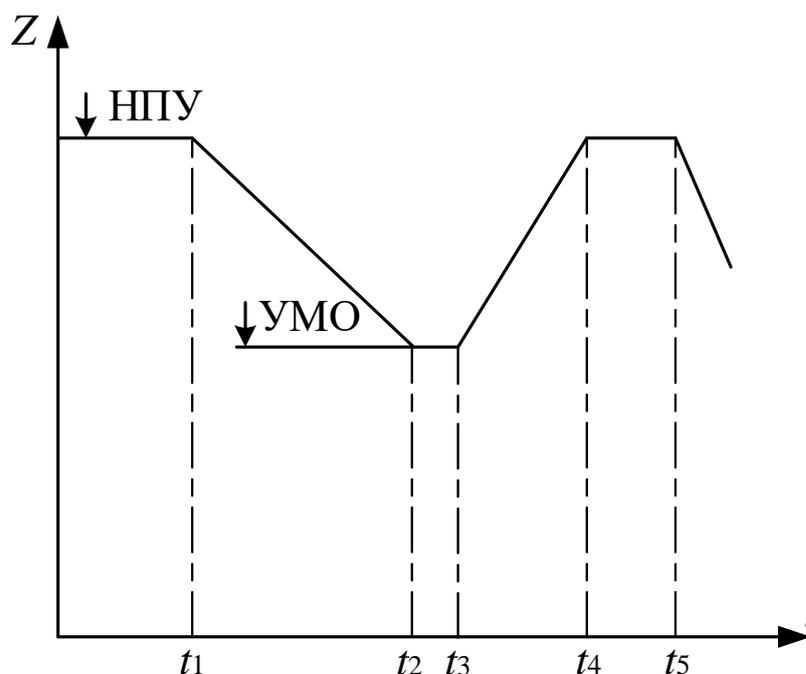


Рисунок 2.1 – Схема регулирования стока водохранилищем:

t_1-t_2 – режим сработки; t_2-t_3 ; t_4-t_5 – режим по водотоку;

В зависимости от длительности периода регулирования речного стока делятся на: долгосрочные – сезонное, годовое и многолетнее; и краткосрочные – суточные, недельные и месячные. При любом виде регулирования имеют место периоды, когда приток воды совпадает с потреблением, в результате чего уровень водохранилища сохраняется постоянным, в том числе на нормальном подпорном уровне (НПУ) или уровне мёртвого объема (УМО). В случае, если сток реки будет больше, чем водопотребление, то в водохранилищах может иметь место холостые сбросы, если уровень воды достиг НПУ или уже набрана суточная норма повышения отметки ВБ. В этом случае, когда холостые сбросы неизбежны, имеют место ограниченные виды регулирования – ограниченное суточное, недельное, сезонное и многолетнее [11].

В соответствии с характером и продолжительностью воздействия на режим речного стока, водохранилища подразделяются на:

- суточного регулирования,
- недельного регулирования,
- сезонного (годового) регулирования,
- многолетнего регулирования.

Каждый тип водохранилища предназначен для решения определённых задач по сглаживанию неравномерности водного притока и адаптации водоэнергетических режимов к потребностям энергосистемы и водопользователей. Чем выше степень регулирования, тем больше способность компенсировать сезонную и межгодовую изменчивость стока [98].

Каждая последующая степень регулирования речного стока включает в себя функциональные возможности предыдущих. В частности, водохранилище многолетнего регулирования способно выполнять не только межгодовое сглаживание стока, но и эффективно обеспечивать годовое, сезонное, недельное и даже суточное регулирование.

ГЭС без регулирования

В малой энергетике имеются ГЭС без регулирования, у которых полезный объем водохранилища равен $V_{\text{полез}} = 0$, соответственно $\beta = 0$.

Такие станции функционируют в вынужденном режиме, определяемом исключительно текущей приточностью и установленной мощностью оборудования. В периоды, когда приток превышает пропускную способность турбин, избыточный объём воды сбрасывается в обход агрегатов, что снижает общую эффективность использования водных ресурсов [11].

Суточное регулирование стока

Суточное регулирование – перераспределение стока в пределах суток. Водоохранилище суточного регулирования, как правило, небольшого объёма (полезная ёмкость обычно составляет порядка 15–25% среднесуточного притока). Оно сглаживает колебания потребления внутри дня: заполняется в

часы минимального расхода воды/потребления энергии и срабатывает в часы пиков. В результате суточный график расхода через гидроузел становится неравномерным по сравнению с практически равномерным природным притоком. Для суточного регулирования необходимый объем водохранилища обычно составляет 0,5 от объема суточного стока маловодного года расчетной обеспеченности. У этих водохранилищ коэффициент емкости обычно составляет $\beta = 0,005 \dots 0,01$.

Виды графиков при суточном регулировании стока показаны на рисунке 2.2. $N_{ГЭС}$ – средняя величина, $N_{ГЭС}(t)$ – рабочая мощность.

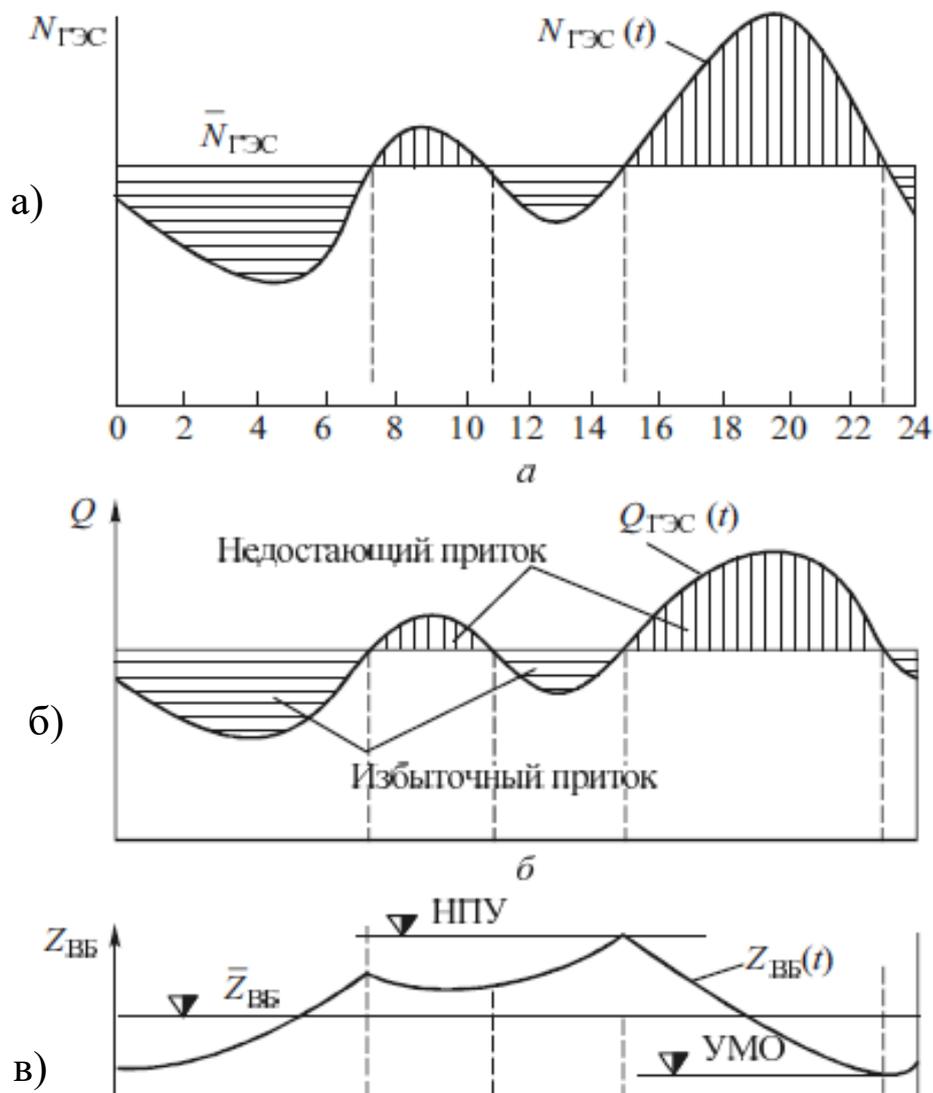


Рисунок 2.2 – График суточного регулирования

а – мощности ГЭС, б – расходов, в – уровня верхнего бьефа

Основной эффект за счет суточного регулирования – ГЭС работает не по вынужденному режиму водотока, а по требуемому потребителями графику.

Недельное регулирование стока реки

Недельное регулирование – перераспределение воды в масштабе нескольких дней до одной недели. Принцип аналогичен: в рабочие дни (когда энергопотребление выше) водохранилище срабатывается, а в выходные – пополняется притоком (рисунок 2.3). Для недельного регулирования стока требуется дополнительно к суточному иметь недельный объем водохранилища $V_{нед}$, но он также невелик и $\beta = 0,1.....0,3$ [11].

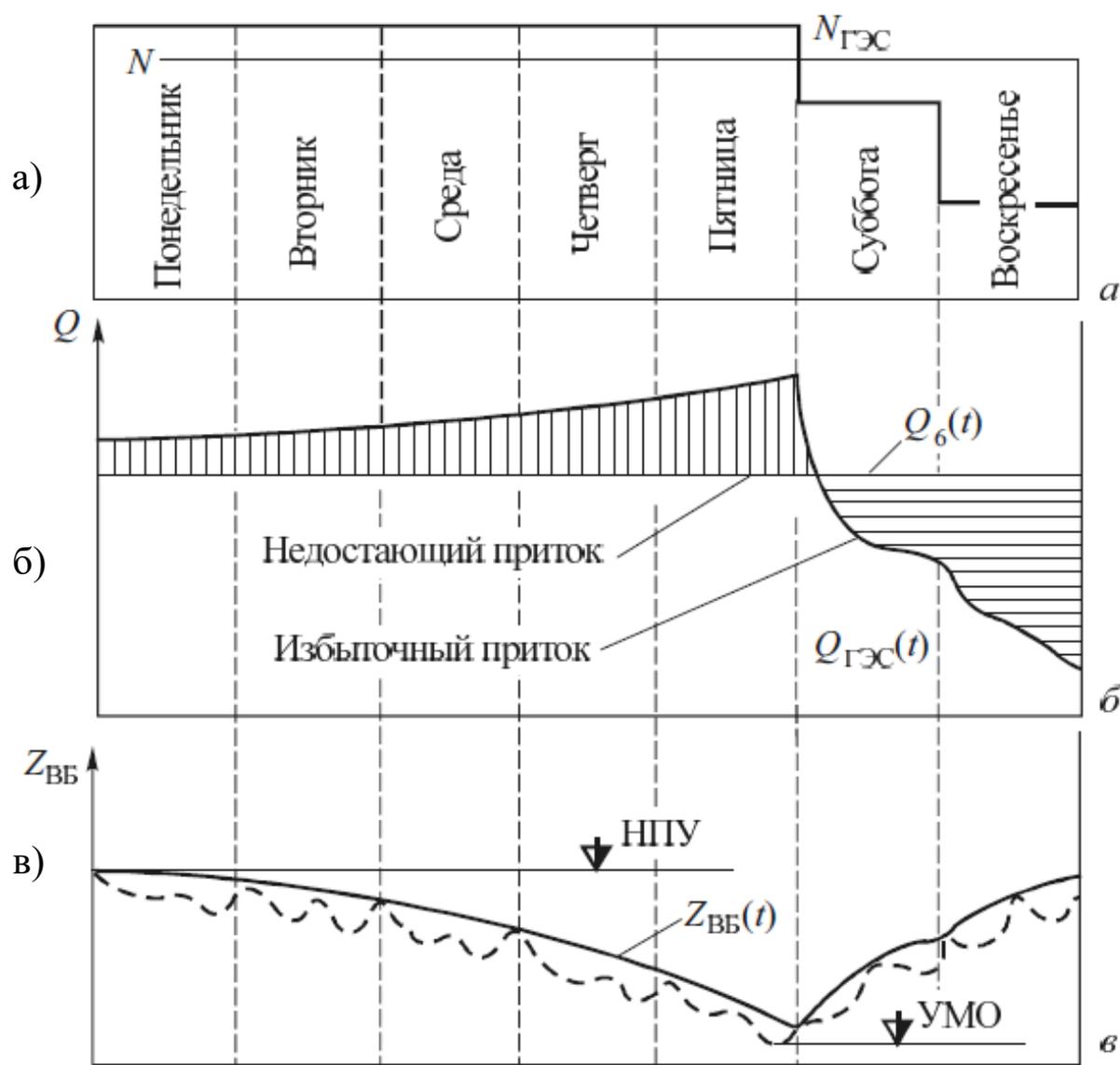


Рисунок 2.3 – График недельного регулирования

а – мощности ГЭС, б – расходов, в – уровня верхнего бьефа

При недельном регулировании водохранилище ГЭС заполняется с уровня условного минимального объёма (УМО) до нормального подпорного уровня (НПУ) в периоды пониженного энергопотребления (например, в выходные дни), а в рабочие дни происходит его поэтапная сработка. Одновременно реализуется суточное регулирование, при котором уровень водохранилища изменяется в пределах недельного диапазона в течение суток. Однако подобное управление режимами сопровождается потерями напора и снижением выработки электроэнергии, обусловленными колебаниями уровня воды [11].

Годовое и сезонное регулирование стока реки

Сезонное (годовое) регулирование – перераспределение стока в рамках года, между влажным и сухим сезонами. Водоохранилище сезонного регулирования обычно наполняется в период половодья (весной/летом) и срабатывается в межень (осень-зима). Полноценное годовичное регулирование требует значительно большей ёмкости: полезный объём составляет значительную долю годового стока реки (как правило, от ~10% до 30% в зависимости от изменчивости стока) [98].

Если осуществляется частичное перераспределение стока, то такое регулирование называется сезонным. Весь цикл регулирования заканчивается в течение года. Он повторяется от года к году. Продолжительность заполнения и сработки водохранилища меняется по годам и зависит от гидрографа [11]. Объем водохранилища годовичного регулирования значительно больше, чем суточного и недельного. Он составляет для разных станций 10...30 % среднего многолетнего стока реки и $\beta = 0,1...0,3$. На рисунке 2.4 показан графики сезонного регулирования стока водохранилища Нурекской ГЭС.

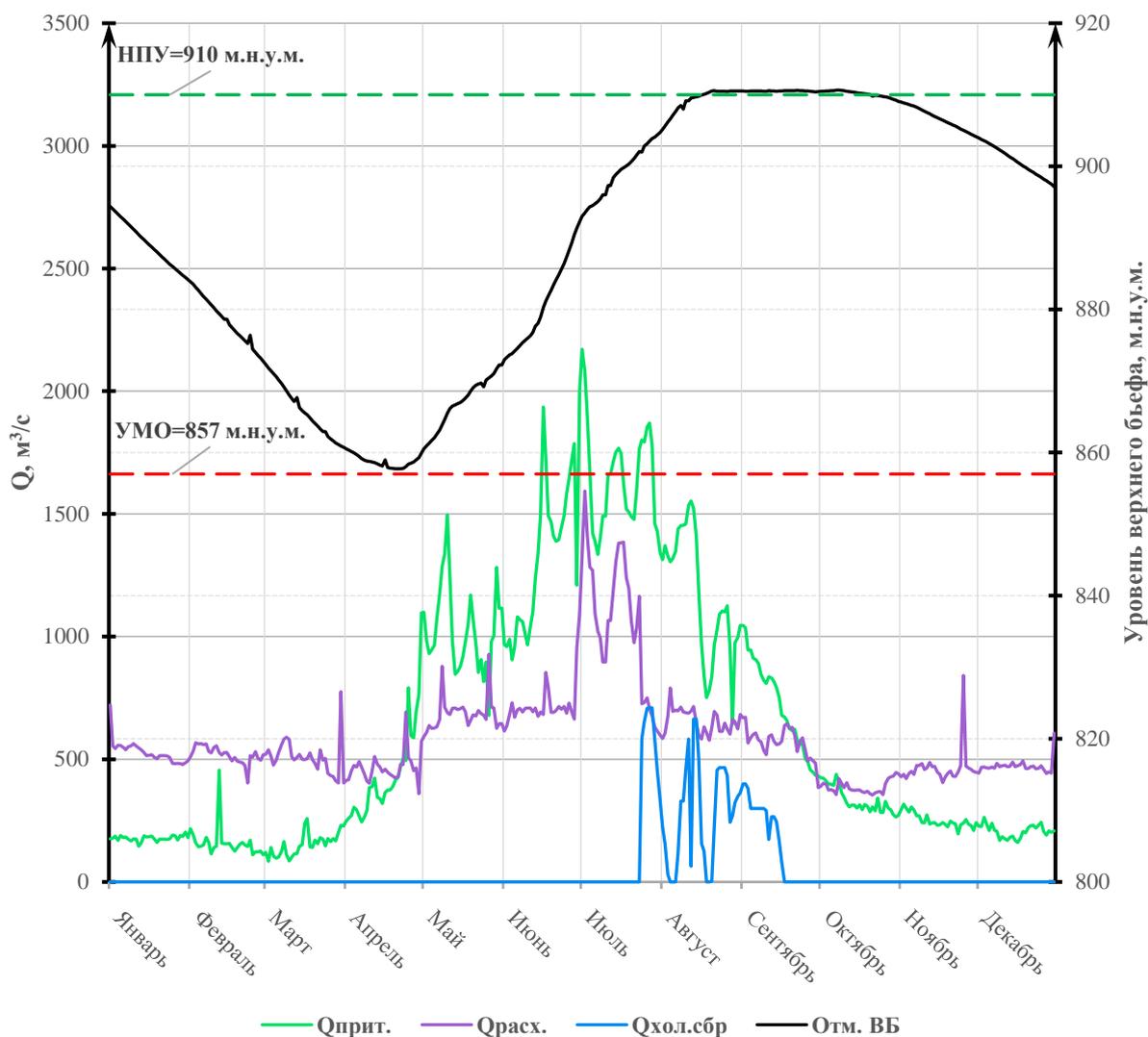


Рисунок 2.4 – Графики сезонного регулирования стока и уровней водохранилища Нурекской ГЭС

Многолетнее регулирование стока реки

Многолетнее регулирование стока – это такой вид регулирования, который предназначен для перераспределения водных ресурсов не только внутри года, но и между несколькими годами (из средневодных и многоводных на маловодные годы) [107]. То есть задача этого типа регулирования является накапливать избыточный объем стока воды в многоводные годы и сбрасывать её в маловодные годы.

Для того чтобы водохранилище могло вести многолетнее регулирование стока, его объем должен быть достаточно большим. Как правило, он

составляет 30...50% величины годового стока за среднемноголетний период.
 Величина $\beta = 0,3...0,5$.

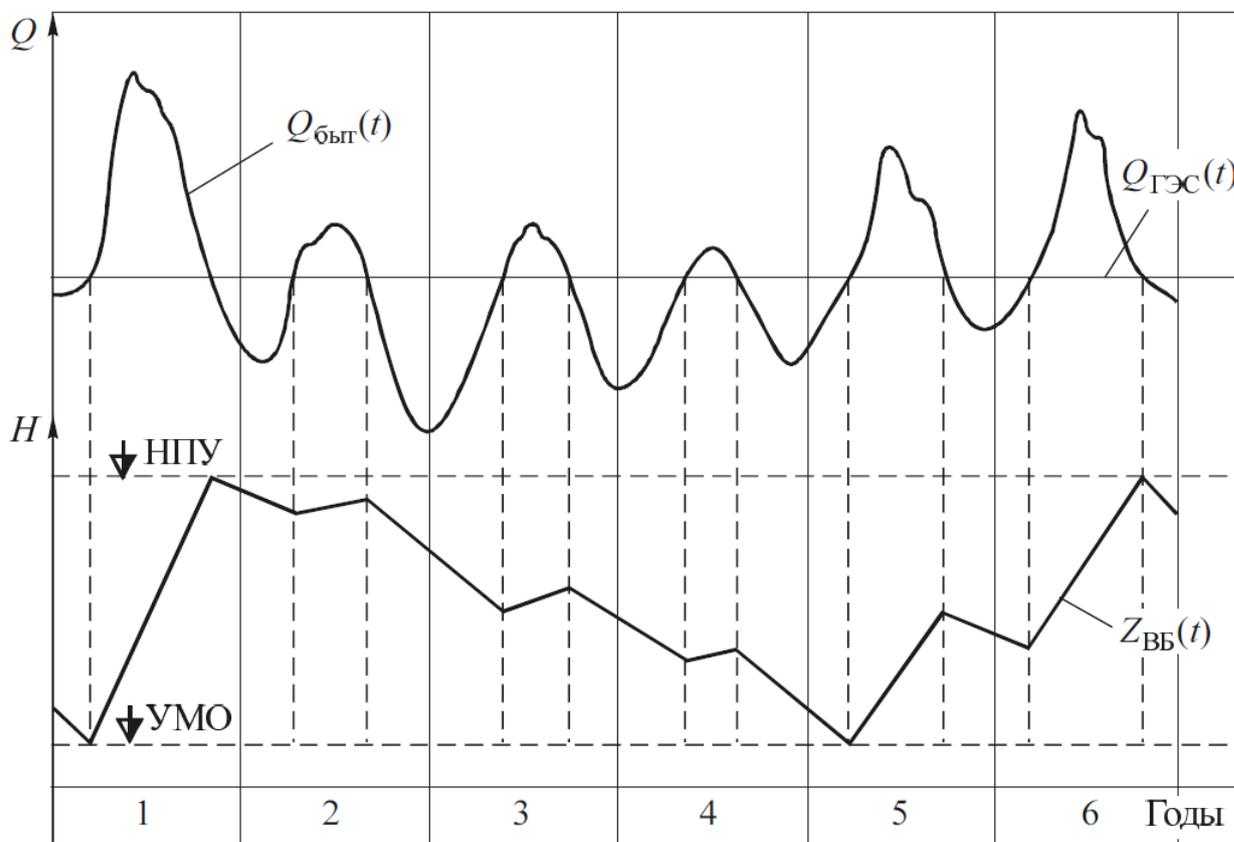


Рисунок 2.5 – График многолетнего регулирования стока на ГЭС

Как уже была отмечено ранее, в отличие от годового регулирования, при котором сток перераспределяется в пределах одного года, в многолетнем регулировании есть возможность увеличения среднегодового расхода за счет накопления избыточного стока. Полный цикл регулирования у водохранилищ с многолетним регулированием может продолжаться до нескольких лет (иногда до 10 лет) в зависимости от объема водохранилищ и гидрологических условий. Если водохранилище имеет многолетнее регулирование, то оно имеет способность осуществить все остальные виды регулирования, годовое, сезонное, месячное, недельное и суточное.

Примером ГЭС с водохранилищем многолетнего регулирования могут быть Иркутская и Братская ГЭС расположенные на реке Ангара, Российская Федерация, с коэффициентом $\beta = 0,76$ и $\beta = 0,55$ соответственно.

Необходимо отметить, что из всех ГЭС с водохранилищами, эксплуатируемыми в Таджикистане только водохранилища Нурекской [11-А] и Кайраккумкой ГЭС [12-А] имеют способность годового (сезонного) регулирования стока, а остальные ГЭС, могут обеспечивать лишь суточное регулирование. Регулирующая способность водохранилищ ГЭС, эксплуатируемых в Республике Таджикистан приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры водохранилищ ГЭС Таджикистана

Станции	Регулирование	Полный объем, км ³	Полезный объем, км ³	Коэффициент β
Рогунская	многолетное	13,30	10,30	0,515
Нурекская	сезонное	10,5	4,5	0,225
Кайраккумская	сезонное	4,2	2,3	0,115
Байпазинская	суточное	0,12465	0,0871	0,0043
Сангтудинская 1	суточное	0,258	0,018	0,0009
Сангтудинская 2	суточное	0,0665	0,005	0,00025
Головная	суточное	0,096	0,004	0,0002

2.2. Основы прогнозирования речного стока

На сегодняшний день точность долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных прогнозов имеют прогресс, и используется при назначении оптимальных режимов ГЭС, также при планировании оптимальных режимов сработки и заполнения водохранилищ. При прогнозировании режима сработки и заполнения водохранилищ и планировании режимов ГЭС используют статические прогнозы, которые основаны на исторических гидрологических данных о стоке реки. В настоящее время методы и методологии прогнозирования совершенствуются и достигла хороших результатов в плане повышении точности прогноза и длительного периода прогнозирования [108].

Важным становится дополнение широко используемых статистических прогнозов новыми, своевременными, точными данными и информацией о

гидрологических потоках (дождь, снегопад, таяние снега) и запасах (снежный покров, подповерхностная влага) в режиме, близком к реальному времени.

Прогнозы речного стока на ГЭС с водохранилищами дают возможность заранее информировать об наличии холостых сбросов, и повысить эффективность ГЭС в энергетических системах. Более точные данные прогноза дают возможность назначить оптимальный режим работы водохранилища ГЭС, это достигается путем уменьшения объема холостых сбросов, повышении напора ГЭС, и тем самым увеличению выработки электрической энергии.

Использование точных прогнозов для оптимизации работы водохранилищ может увеличить выработку электроэнергии гидроэлектростанциями, но для этого требуется, чтобы прогнозы осадков/стока были высокоточными и охватывали довольно длительный период [109].

Прогнозирование стока реки является сложной задачей, из-за большого количества факторов, которые влияют на неё: количества осадков, запаса воды в снежном покрове, и других характеристик бассейна.

Гидрологический режим водохранилища формируется исходя из режима работы ГЭС, в соответствии с диспетчерским графиком регулирования, прогнозом стока воды в водохранилище и требованиями к гарантированному расходу воды в нижний бьеф.

В настоящее время гидрологические прогнозы для планирования режимов работы водохранилища делятся на: краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные прогнозы. Долгосрочные прогнозы (год, несколько лет) считается ключевым при оптимизации режимов водохранилищ ГЭС в годовом и сезонном периоде. Долгосрочное оптимальное управление режимами водохранилищ на основе прогнозов состоит из оценки ГЭС в маловодном периоде, прогнозирования уровней бьефов, подготовки и планировании организации технического обслуживания и ремонтов электрооборудования [110].

При решении задач прогнозирования речного стока применяется широкий ряд алгоритмов на основе машинного обучения, их выбор определяется в зависимости от объемов доступных входных и выходных данных, интервала прогнозирования, гидрологических особенностей бассейна рассматриваемой реки и атмосферных факторов. В исследовании [84] рассмотрен подход к построению прогнозных моделей на основе алгоритма *k*-ближайших соседей (*k*-Nearest Neighbors, *k*NN), которые обеспечивают высокую гибкость при моделировании зависимостей в условиях ограниченного объема обучающей выборки.

С учетом выраженной сезонности речного стока, особенно характерной для рек с таянием снегов или ледников, целесообразно применение авторегрессионных моделей, учитывающих сезонные колебания. К таким моделям относятся: ARIMA (autoregressive integrated moving average) и SARIMA (seasonal ARIMA) [111].

Модель ARIMA эффективно справляется с временными рядами, обладающими трендами или автокорреляцией, но при этом не содержащими выраженной сезонности. Она включает:

- Автосвязь с прошлыми значениями (AR),
- Интеграцию (I), то есть разности для устранения трендов,
- Скользящее среднее (MA) на основе ошибок прогноза.

Однако, в случае сезонного характера стока, возможностей ARIMA может быть недостаточно.

SARIMA расширяет классическую ARIMA, добавляя компоненты сезонной авторегрессии, интеграции и скользящего среднего. Эта модель лучше подходит для данных с годовой, полугодовой или иной сезонной повторяемостью, типичной для гидрологических данных. SARIMA учитывает:

- Сезонную компоненту притока;
- Сезонные лаги (например, год назад, месяц назад);
- Возможность моделировать как межгодовую, так и внутригодовую изменчивость стока.

Сезонная структура в гидрологических временных рядах делает модели SARIMA перспективным при прогнозировании речного стока. Применение данной модели улучшает точность при краткосрочном и среднесрочном прогнозировании, что повышает эффективность управления режимами работы ГЭС и водохранилищ.

В исследованиях [112] и [113] приводится, “Прогнозирование стока реки и особенно экстремальных паводков сильно влияют при управлении режимами стока реки Вахш, так как она является источником воды для водохозяйственных нужд и основным производителем электроэнергии на ГЭС в Таджикистане и в странах Центральной Азии.

Таким образом, учитывая особую ключевую роль каскада ГЭС, функционирующих на реке Вахш, по их установленной мощности и по доле выработанной электроэнергии в республике, задача прогнозирования стока реки Вахш приобретает важное значение. Наиболее значимым данная задача является для Рогунской ГЭС, так как она расположена на верхнем течении реки Вахш, и обладает водохранилищем многолетнего регулирования. Необходимо отметить, что, эффективность работы ГЭС, расположенных ниже Рогунской (включая Нурекская, Байпазинская, Сангтудинская 1 и 2, Головная и др.) сильно зависят от режима работы Рогунской ГЭС.

Рогунская ГЭС выполняет функции стратегического резерва: аккумулирует сток в многоводные и средневодные годы и компенсирует его недостаток в маловодные периоды. Это требует долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогнозирования притока, способного учитывать сезонные, годовые и межгодовые колебания речного стока, обусловленные как естественными гидрометеорологическими условиями, так и последствиями изменения климата.

Применение современных алгоритмов на основе методов машинного обучения (МО) в том числе: нейронных сетей, ансамблевых методов, методов интеллектуального анализа данных позволяют разрабатывать более точные и устойчивые модели для прогнозирования речного стока. Эти модели способны

учитывать сложные нелинейные зависимости между климатическими, гидрологическими и атмосферными факторами. Прогнозирование стока реки Вахш позволяет назначить оптимальные режимы сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС, повысить эффективность как Рогунской так и остальных ГЭС функционирующих в каскаде, путём уменьшения объёма холостых сбросов, увеличения выработки и обеспечения устойчивого экспорта электроэнергии в летнем периоде. Таким образом, необходимо отметить, что прогнозирование стока реки Вахш является не только задачей гидрологического планирования, но также является основой рационального и оптимального использования водных ресурсов и управления режимами ГЭС каскада особенно Рогунской. Это обеспечивает устойчивое развитие ЭЭС Таджикистана.

2.3. Моделирование гидрологических временных рядов

Прогнозирование временного ряда – это сложная задача, которая ставится и решается во многих отраслях. Сложность решения такой задачи заключается в том, что временные ряды обычно описывают процессы или явления, которые имеют стохастический характер, и на них влияют множество случайных факторов. В этом случае, для решения данной задачи, то есть для прогнозирования временных рядов используется математический аппарат на основе теории вероятности и математической статистики. Разработка моделей для прогнозирования основывается на статистические анализы и моделирование временных рядов [114]. На сегодняшний день известно много вероятно-статистических методов, которые предназначены для прогнозирования временных рядов [115], но, к сожалению, их использование не всегда дают результаты с требуемой точностью при решении задачи прогнозирования. Также есть много исследований, направленных прогнозированию в задачах управления ЭЭС, теориях и методах энергопотребления, к таким работам можно отнести работы Воропая Н.И., Дьякова А.Ф. [116, 117].

Последовательность процесса прогнозирования с помощью

статистических методов включает: а) формирование выборки статистических данных; б) приведение данных к однородным свойствам; классификация данных по структурным свойствам; в) сглаживание информации; г) изучение динамики процесса; д) ввод дополнительной информации для повышения точности модели.

В современных условиях эффективное управление режимами работы гидроэлектростанций требует учета высокой изменчивости и нерегулярности речного стока, обусловленной как природными факторами, так и климатическими изменениями. Эти характеристики гидрологического режима существенно усложняют процессы планирования и регулирования выработки электроэнергии. Применение математических методов, а также алгоритмов машинного обучения совместно с вычислительными инструментами позволяют повысить точность при прогнозировании и дают возможность использовать их при назначении оптимальных эксплуатационных режимов ГЭС.

В зависимости от длительности периода прогнозирования они делятся на: краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные. Модель прогнозирования представляет собой математическое описание временного ряда, с помощью которого оцениваются значения. Модель прогнозирования состоит из следующих этапов построения модели, калибровки параметров и оценки точности. Она включает:

Модель гидрологических временных рядов

Гидрологический временной ряд представляет собой последовательность наблюдений гидрологических величин, таких как среднесуточный или среднемесячный расход воды $Q(t)$ в ($\text{м}^3/\text{с}$). Современные технологии позволяют получить даже почасовые данные по расходу воды. В энергетике (гидроэнергетике) временные ряды создаются для притоков воды в водохранилище, уровней воды, осадков, испарения, атмосферных погодных параметров и др., которые необходимы при назначении режимов работы ГЭС.

Значения уровней гидрологических временных рядов могут содержать следующие структурные компоненты:

- Тренд $T(t)$ – долговременное изменение (например, уменьшение стока в связи с таянием ледников или изменением климата).
- Сезонная компонента $V(t)$ – повторяющиеся колебания в течение года (паводок весной, межень зимой).
- Циклическая компонента $S(t)$ – изменения, связанные с многолетними циклами (например, чередование многоводных и маловодных лет).
- Случайная компонента $E(t)$ – непредсказуемые колебания, вызванные экстремальными осадками, селями и др.

В зависимости от характера взаимодействия этих компонент выделяют:

- Аддитивная модель: $Q(t) = T(t) + V(t) + S(t) + E(t)$;
- Мультипликативная модель: $Q(t) = T(t) * V(t) * S(t) * E(t)$;
- Смешанная модель: $Q(t) = T(t) * V(t) * S(t) + E(t)$.

Построение моделей сводится к расчету значений T , V , S и E для каждого уровня ряда.

Основные этапы анализа временных рядов:

- Графическое представление и описание поведения временного ряда;
- Выделение и удаление закономерных составляющих временного ряда (тренда, сезонных и циклических компонент);
- Сглаживание и фильтрация временного ряда;
- Исследование случайной компоненты временного ряда, построение и проверка адекватности математической модели для ее описания;
- Прогнозирование развития изучаемого процесса на основе имеющегося временного ряда;
- Исследование взаимосвязи между различными временными рядами.

Анализ автокорреляции в гидрологических временных рядах расхода воды. Если во временном ряде гидрологических наблюдений присутствуют тренд и циклические колебания, то значения расхода воды в каждый момент

времени Q_t зависят от предыдущих наблюдений. Для количественной оценки тесноты такой связи используется коэффициент автокорреляции:

-коэффициент автокорреляции уровней ряда первого порядка:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (Q_t - \bar{Q})(Q_{t+1} - \bar{Q})}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}; \quad (2.2)$$

- коэффициент автокорреляции уровней ряда второго порядка:

$$r_2 = \frac{\sum_{t=1}^{n-2} (Q_t - \bar{Q})(Q_{t+2} - \bar{Q})}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}. \quad (2.3)$$

Для расчета параметров уравнения тренда чаще всего используется метод наименьших квадратов. В качестве независимой переменной выступает время $t=1,2,\dots,n$, а в качестве зависимой переменной – фактические уровни временного ряда Q_t .

При выборе вида функции тренда можно воспользоваться следующими методами.

Метод отклонений от тренда. Сначала вычисляются теоретические значения тренда \hat{Q}_t затем определяются отклонения, которые анализируются для выявления сезонной и случайной компонент:

$$\varepsilon_t = Q_t - \hat{Q}_t, \quad (2.4)$$

где ε_t – ошибка прогноза (остаток) в момент времени t (показывает, насколько прогноз отличается от реального значения.); Q_t – фактическое наблюдаемое значение величины в момент времени t ; \hat{Q}_t – прогнозное (расчётное) значение величины в момент времени.

Метод последовательных разностей

Для линейного тренда используют первые разности:

$$\Delta Q_t = Q_t - Q_{t-1} \quad (2.5)$$

Для параболического тренда – вторые разности:

$$\Delta^2 Q_t = \Delta Q_t - \Delta Q_{t-1} \quad (2.6)$$

Модель тренда. Общая форма модели с учётом фактора времени:

$$Q_t = a + bt + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

Параметры a и b определяются методом наименьших квадратов:

$$\min_{a,b} \sum_{t=1}^n (Q_t - a - bt)^2 \quad (2.8)$$

Автокорреляция остатков и критерий Дарбина–Уотсона

После построения тренда проводят анализ остатков ε_t на наличие автокорреляции.

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})(\varepsilon_{t+1} - \bar{\varepsilon})}{\sum_{t=1}^n (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})^2}, \quad (2.9)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение остатков:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \varepsilon_t. \quad (2.10)$$

Критерий Дарбина–Уотсона:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2}. \quad (2.11)$$

Основной исходной информацией при управлении долгосрочными режимами водохранилищ являются: многолетний гидрологический ряд притока реки; характеристика верхнего бьефа, то есть кривая объема водохранилища от уровня верхнего бьефа; кривая зависимости уровня

нижнего бьефа от расхода воды; уровни воды в водохранилище (НПУ, УМО, ФПУ). Для того, чтобы прогноз долгосрочной последовательности притока реки в водохранилище ГЭС, на основе исторических данных по притоку, и получить характеристики возможного будущего (прогнозирование) притока реки, необходимо разработать гидрологическую имитационную модель, которая должна учитывать асимметричное распределение гидрологических параметров, в том числе сток реки в водохранилище.

2.4. Прогнозирование стока реки Вахш для назначения оптимальных режимов Рогунской ГЭС

Бассейн формирования реки Вахш, особенно в зоне до Рогунской ГЭС географически расположен так, что водохозяйственные (ирригационные) расходы практически очень малы, и они основном используют притоки реки Вахш. Среднегодовые расходы воды на реке Вахш колеблются от 460 м³/с до 870 м³/с в зависимости от водности года, среднемноголетний расход составляет 637 м³/с. Основной объём стока реки Вахш примерно 76% от годового стока приходится с мая по сентябрь, с середины августа начинается спад, продолжающийся до октября, при этом максимальные значения притока наблюдались 30.05.1951 году 1780 м³/с и 10.07.1953 году 3730 м³/с [90, 118, 1-А, 93, 5-А]. Карта бассейна реки Вахш в зоне Дарбанд (основной бассейн формирования реки Вахш) приведена на рисунке 2.6.

Как известно сток воды в реках изменяется по годам и имеет стохастический характер, она может быть представлена в виде кривой обеспеченности стока. На рисунке 2.7 представлены среднемесячные притоки реки Вахш с 1927 года по 2022гг. По графику видно, что максимальные значения расходов приходится на июль, и это характерно для каждого года.

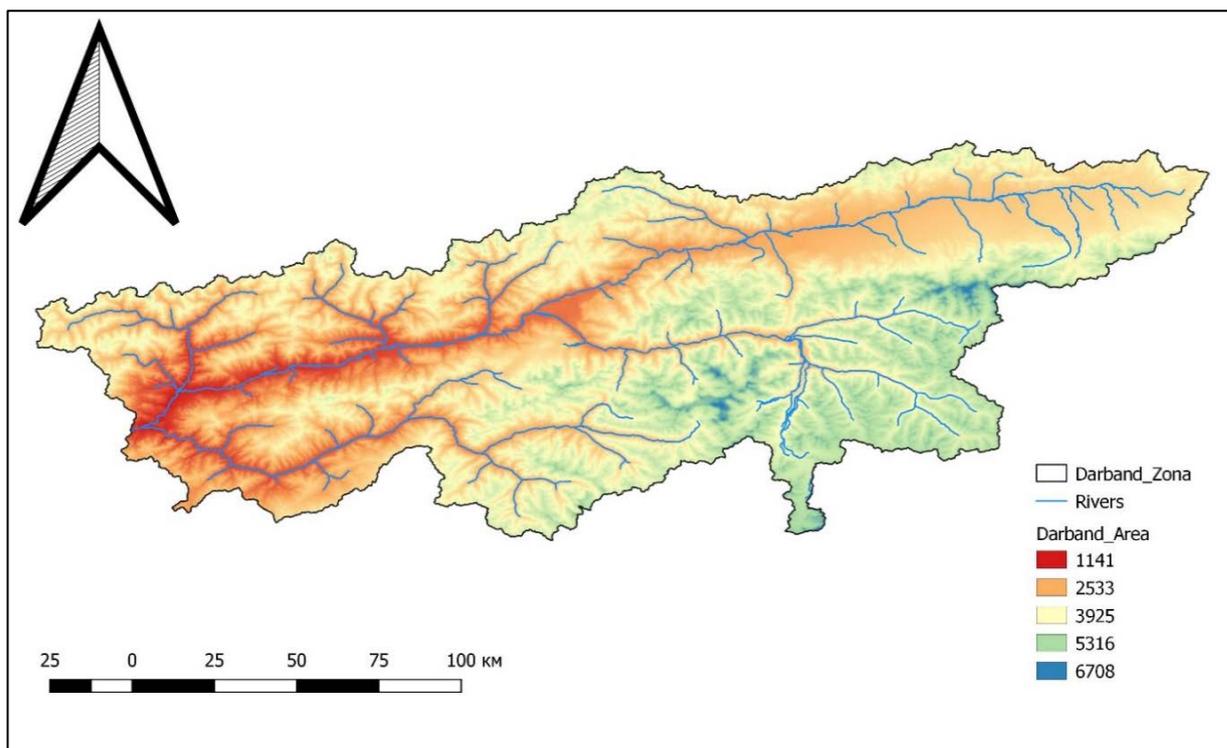


Рисунок 2.6 – Карта бассейна Дарбанд

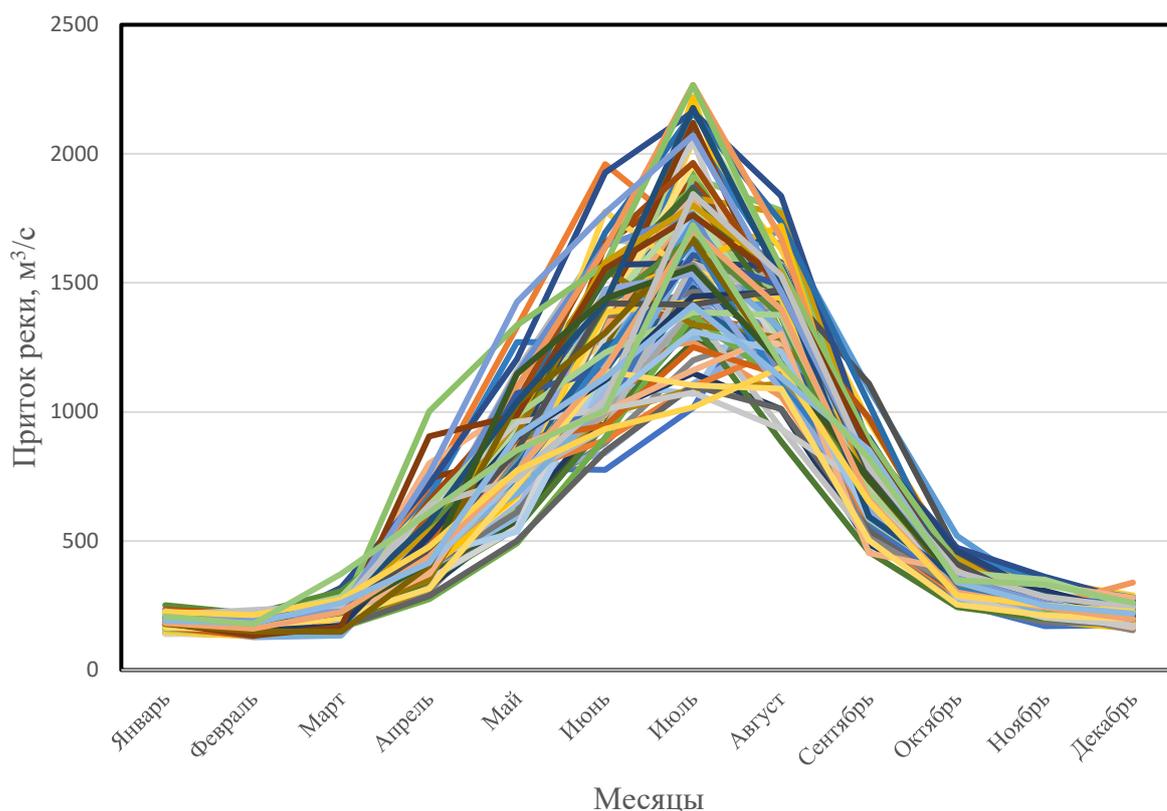


Рисунок 2.7 – Среднемесячные стоки реки Вахш (1927-2022 гг.)

При регулировании стока водохранилищем его отдача по воде или мощности гарантируется с определенной обеспеченностью, под которой

понимается относительное число случаев, когда отдача больше или равна заданной [5-А]. Обеспеченность выражается в процентах от общего числа случаев и определяется по данным ряда наблюдений [101].

Кривые обеспеченности стока реки

В гидрологии широко применяются различные теоретические распределения, каждое из которых имеет свои особенности с числом параметров и эмпирические данные. Наиболее распространёнными распределениями, применяемыми в гидрологической практике, являются трёхпараметрическое гамма-распределение Крицкого–Менкеля, распределение Пирсона типа III, нормальное (Гауссово), логнормальное и некоторые другие. Подробное описание их математических свойств и областей применения приведено в специализированной гидрологической литературе. Точность аппроксимации прежде всего зависит от параметров выбранной модели распределения и от физической сущности рассматриваемого процесса. Гидрологические расчеты направлены на идентификацию параметров рассматриваемой задачи таким образом, чтобы они максимально отражали статическую природу стока реки, которое ожидается в период эксплуатации ГЭС.

Однако следует отметить, что вследствие ограниченности длины исторических рядов наблюдений, все оценки параметров распределения стока обладают случайной природой и сопряжены с определенной степенью неопределенности. Это требует применения статистических методов оценки доверительных интервалов, а также адаптивных подходов, учитывающих возможные изменения климатических и гидрологических условий в будущем. Изменение речного стока в течение года сопровождается значительной неравномерностью, то есть склонность к формированию многолетних группировок, таких как последовательностей маловодных, средневодных или многоводных лет. Такая закономерность можно наблюдать на многих реках, которые охватывают крупные речные бассейны, они обусловлены под влиянием метеорологических, атмосферных и климатических факторов [17].

В гидрологических расчетах для построения теоретических кривых обеспеченности наибольшее распространение получил метод моментов, предполагающий статистическое определение параметров распределения. Основными характеристиками, определяющими форму кривой, являются [11]:

Средняя величина расхода реки

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.12)$$

где n – объем выборки.

Коэффициент вариации, отражающий относительную изменчивость:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{Q^2 (n-1)}} \quad (2.13)$$

Коэффициентом асимметрии, характеризующий смещение распределения:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^3}{\sigma^3 (n-1)(n-2)} \quad (2.14)$$

Коэффициент вариации характеризует отклонения в относительных единицах (в долях от среднего значения), стандарт σ ($\sigma = C_v \cdot \bar{Q}$) характеризует отклонения в тех же единицах, что и колеблющаяся величина (например, для оценки характера колебаний расходов – м³/с, объема стока – км³ и т.д.).

Коэффициент асимметрии характеризует степень асимметричности распределения, то есть, характеризует размах положительных или отрицательных отклонений от среднего. Для надежного вычисления коэффициента асимметрии по формуле 3.14 необходимо располагать весьма

длительным рядом наблюдений, что практически невозможно. Поэтому обычно коэффициент C_s принимается кратным значению C_v :

$$C_s = \alpha \cdot C_v \quad (2.15)$$

Значение α для различных гидрологических характеристик принимается различным. Для среднегодовых расходов, как правило, $C_s = 2C_v$, для максимальных расходов $C_s = (3 \div 4) \cdot C_v$

Применительно к реке Вахш, разностный анализ многолетнего ряда среднегодовых расходов, наблюдаемых в створе Рогунского гидроузла, выявил наличие двух полных гидрологических циклов, каждый из которых включает в себя чередование маловодных и многоводных лет. Это свидетельствует о репрезентативности использованного ряда данных для статистической оценки характеристик стока. Расчеты показали высокую точность: относительная среднеквадратическая ошибка годового расхода составила лишь 1,4%, а ошибка коэффициента вариации – 8,0%, что подтверждает надежность используемой методики и возможность её применения для прогноза стока при проектировании и эксплуатации каскада ГЭС на реке Вахш.

Ряды средних месячных, средних годовых и сезонных расходов воды и объёмы стока р. Вахш в створе плотины Рогунского гидроузла, параметры годового стока и расходы воды различной обеспеченности приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры годового стока и расходы воды различной обеспеченности

Расчётный период	Параметры				Средние расходы воды за сезон, м ³ /с		Расходы воды, м ³ /с, различной обеспеченности					
	Q _{ср.мн.} , м ³ /с	W _{ср.мн.} , км ³	C _v	C _s	IV–IX	X–III	50	75	80	90	95	99
1932/33–2010/11 гг.	640	20,2	0,12	0,24	1045	233	637	586	575	543	520	476

По среднемесячным расходам реки Вахш за 1927-2022гг. построена кривая обеспеченности стока реки в заданном створе Рогунской ГЭС по формуле:

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100, \% \quad (2.16)$$

где m – номер года; n – количество лет.

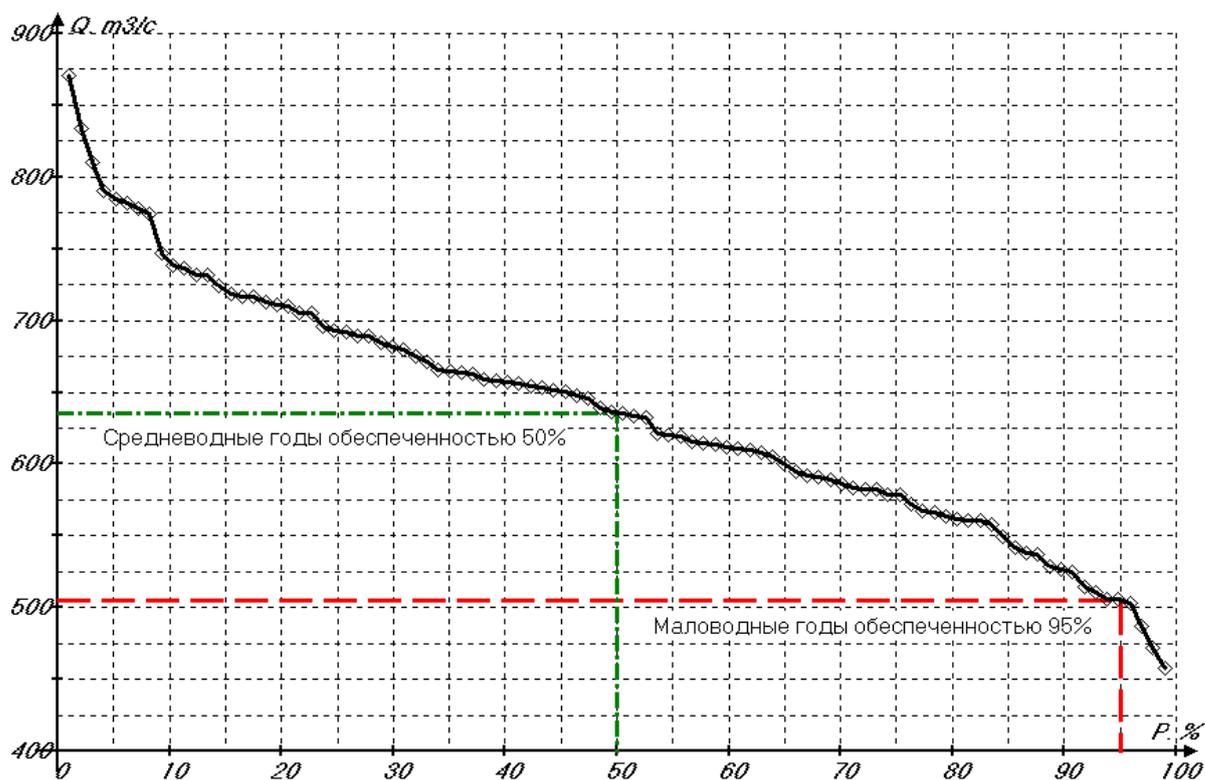


Рисунок 2.8 – Кривая обеспеченности реки Вахш

С помощью кривой обеспеченности можно определить расчетные маловодные – годы, когда обеспеченность реки $P=95\%$, средневодные – годы, когда обеспеченность реки $P=50\%$, и многоводные годы с обеспеченностью $P=3-5\%$, для рассматриваемого интервала времени. По кривой обеспеченностью которое приведена на рисунке 2.8 для реки Вахш среднегодовой расход в маловодном году составляет $Q=505 \text{ м}^3/\text{с}$, а в средневодном году равен $Q=635 \text{ м}^3/\text{с}$ [1-А, 19-А]. Среднемесячные расходы для реки Вахш в расчетных маловодных и средневодных годах приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Среднемесячные расходы для реки Вахш в расчетных маловодных и средневодных годах в 1927-2022гг.

№ п/п	Годы	Месяцы												ср. год м ³ /с
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Расчетные маловодные годы, P≈95 %														
1	1972	153	136	170	322	706	988	1090	1108	667	312	229	184	505
2	1986	166	164	164	275	491	901	1373	1114	646	327	230	190	504
Расчетные средневодные годы, P≈50 %														
1	1960	186	188	207	316	708	1260	1800	1490	678	338	256	211	636,5
2	2011	187	151	170	519	901	1122	1447	1464	789	338	307	220	635,2

Расчетным маловодным или критическим называется гидрологический период, при котором при полной сработке водохранилища до УМО, ГЭС выдаёт гарантированную мощность [17]. Таким образом, кривая обеспеченности стока реки является одним из основных параметров гидрологии, и представляет собой основу вероятностной оценки гидрологических событий, причем чем длиннее наблюдательный ряд, тем выше надёжность оценки. Этот инструмент используется при решении гидроэнергетических задач, в том числе:

- a) Расчет экстремальных характеристик притока, которые позволяют определить вероятность максимальных и минимальных притоков речного стока. Они являются ключевыми при оценке пропускной способности ГТС, и для их безопасной эксплуатации;
- b) Определение установленной и гарантированной мощности ГЭС – выбор уровня обеспеченности (например, 90%, 95%) напрямую влияет на расчёт мощности станции и финансово-экономическую оценку проекта;
- c) Проектирование режимов регулирования стока – кривые обеспеченности служат исходной базой для разработки режимов многолетнего, сезонного и краткосрочного регулирования работы водохранилищ;
- d) Оценка состояния и возможностей водопропускных сооружений, которые при известной вероятности распределения речного стока,

необходимы для правильного проектирования аварийных и эксплуатационных водосбросов;

- е) Сравнение гидрологических характеристик рек различных бассейнов и регионов, которые важны при проектировании и строительстве каскадов ГЭС, и их совместной оптимальной эксплуатации.

Таким образом, учитывая все вышеприведенные, особенности кривой обеспеченности рек [19-А], можно сказать, что она имеет особое место при проектировании, планировании оптимальных режимов и эксплуатации ГЭС. В качестве исходных используются данные разной дискретности (суточные, месячные, квартальные, годовые) об изменении объема притока реки во времени ($\text{м}^3/\text{с}$).

2.5. Разработка программы для прогноза стока реки Вахш методом машинного обучения.

Введение в машинное обучение и библиотеки sklearn и Keras

Машинное обучение, являясь одной из наиболее распространенных и востребованных на сегодняшний день, имеет много инструментов и библиотек, которые облегчают процесс разработки и обучения моделей. Наиболее распространенным из этих библиотек являются Sklearn и Keras.

Sklearn (или scikit-learn) – это библиотека для машинного обучения на языке Python, которая предоставляет простые и эффективные инструменты для анализа данных и моделирования. Она включает в себя ряд алгоритмов для классификации, регрессии и уменьшения размерности данных. Sklearn также предлагает удобные функции для предварительной обработки данных и оценки моделей.

Keras – является высокоуровневой библиотекой для нейронных сетей, и представляет удобный интерфейс для создания и обучения сложных нейронных сетей. Она поддерживает как последовательные, так и функциональные модели, которые позволяют легко построить как простые, так и сложные архитектуры нейронных сетей. Keras из-за своей гибкости и

простоте при использовании является одной из широкоприменяемых библиотек для глубокого обучения

Этапы подготовки данных для обучения модели

Обучение модели начинается с подготовки данных, которое состоит из сбора данных, очистки, нормализации и разделение на обучающие и тестовые выборки. Этот этап является ключевым, так как от этих данных зависит достоверность разработанной модели.

Шаг 1: Сбор данных

Данные могут быть собраны из различных источников, таких как базы данных, CSV-файлы или API. Например, для задачи классификации изображений можно использовать набор данных CIFAR-10, который содержит 60 000 цветных изображений размером 32x32 пикселя, разделённых на 10 классов. Другие популярные наборы данных включают MNIST для распознавания рукописных цифр и Iris для классификации видов ирисов.

Шаг 2: Очистка данных

Очистка данных включает удаление пропущенных значений, обработку выбросов и преобразование категориальных данных в числовые. Она может состоять из удаления дубликатов, коррекции ошибок, и обработку выбросов.

Шаг 3: Нормализация данных

Нормализация данных помогает улучшить производительность модели, особенно если данные содержат признаки с разными масштабами. В sklearn это можно сделать с помощью StandardScaler:

Нормализация данных может включать стандартизацию (приведение данных к нулевому среднему и единичному стандартному отклонению) или минимальное масштабирование (приведение данных к диапазону от 0 до 1). Выбор метода нормализации зависит от конкретной задачи и используемого алгоритма.

Шаг 4: Разделение данных

Данные необходимо разделить на обучающую и тестовую выборки, чтобы можно было оценить производительность модели на новых данных. В

sklearn это можно сделать с помощью `train_test_split`, которое позволяет избежать переобучение модели и обеспечивает объективную оценку её производительности.

Обучение модели с использованием sklearn

Sklearn предоставляет множество алгоритмов для обучения моделей, таких как линейная регрессия, дерево решений и случайный лес. Эти алгоритмы легко использовать и настраивать, что делает sklearn отличным выбором для начинающих специалистов.

Пример: Линейная регрессия

Линейная регрессия является простым алгоритмом для прогнозирования данных, и основывается на том, что независимые и зависимые переменные связаны между собой линейно. Линейная регрессия может быть использована для решения задач, таких как предсказание цен на недвижимость, прогнозирование спроса на продукцию и анализ временных рядов. Важно отметить, что линейная регрессия чувствительна к выбросам и мультиколлинеарности признаков, поэтому перед её использованием необходимо провести тщательный анализ данных.

Пример: Дерево решений

Алгоритм дерево решений использует деревообразную модель при принятии решений и разбивает данные на основе признаков. Используя которых строит дерево, где каждый узел показывает условие, а лист – прогноз. Дерево решений обычно используют в сочетании с ансамблевыми методами, такие как градиентный бустинг или случайный лес, потому что они склонны к переобучению.

Обучение модели с использованием библиотеки Keras

Keras являются удобным для создания и обучения нейронных сетей и поддерживают последовательные и функциональные модели, которые позволяют легко строить простые, и сложные архитектуры нейронных сетей.

Пример: Полносвязная нейронная сеть

Полносвязная нейронная сеть (Fully Connected Neural Network) – это базовый тип нейронной сети, где каждый нейрон связан с каждым нейроном следующего слоя. Она состоит из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя.

Полносвязные нейронные сети могут быть использованы для решения задач классификации и регрессии. Они хорошо подходят для обработки табличных данных и временных рядов. Однако для обработки изображений и текстов часто используются более сложные архитектуры, такие как свёрточные и рекуррентные нейронные сети.

Пример: Свёрточная нейронная сеть

Свёрточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN) – это тип нейронной сети, который хорошо подходит для обработки изображений. Она использует свёрточные слои для извлечения признаков из изображений и полносвязные слои для принятия решений.

Сравнение и оценка моделей

Для того чтобы выбрать наилучшую и оптимальную модель для поставленной задачи и выявить области, которые требуют улучшения, путём сравнения их результатов оценки их производительности. Сравнение делается для определения преимуществ и недостатков каждой модели и выбрать оптимальной для поставленной задачи, также позволяет определить какие части моделей требуют улучшения или добавления новых параметров.

Оценка эффективности возможных гидрологических прогнозов и их вероятностный характер можно осуществлять применением критериев, которые разработаны для верификации вероятностных прогнозов [119].

Разница в годовом среднем стоке для реки Вахш за 51-летний период составила порядка 5%, если разделение влажных и сухих лет началось в декабре. Эта разница также будет мерой возможной относительной ошибки прогноза, которая может возникнуть в среднем значении стока, если пренебречь двухлетней периодичностью в доступности воды в результате колебаний климата.

Разработанная в этом исследовании модельная методология может быть использована для оценки воздействия таких колебаний на производство гидроэлектроэнергии и улучшения управления эксплуатацией гидроэлектростанций, чтобы помочь оператору гидроэлектростанции лучше планировать водные и энергетические ресурсы.

В рамках настоящего исследования реализована задача прогнозирования стока реки Вахш с использованием нейросетевого моделирования в программной среде MATLAB/Simulink [17-A]. Для решения поставленной задачи применён специализированный модуль Neural Network Toolbox, являющийся частью MATLAB, который обеспечивает широкие возможности по построению, обучению и тестированию нейронных сетей различной архитектуры [120, 121]. Neural Network Toolbox представляет собой графический интерфейс и шаблоны, которые позволяют ускорять процесс разработки модели и её адаптации к специфике входных гидрологических данных. В данном исследовании используется архитектура нейронных сетей в среде MATLAB, которые имеют прямое распространение сигнала и обратное распространение ошибок (*Feedforward Backpropagation*). Структура применяемая в среде MATLAB, Neural Network Toolbox приведена на рисунке 2.9.

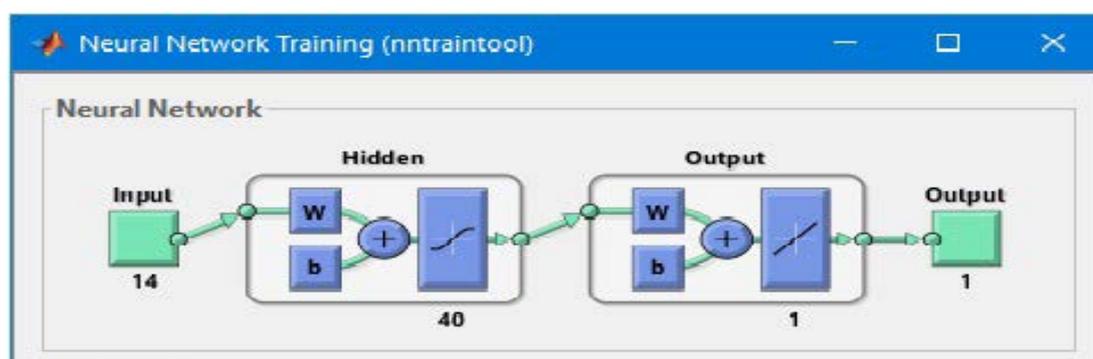


Рисунок 2.9 – Схема нейронных сетей прямого распространения данных и обратного распространения ошибки

Результаты прогнозирования стока реки с применением нейронных сетей и методом регрессионного анализа приведены на рисунках 2.10 и 2.11.

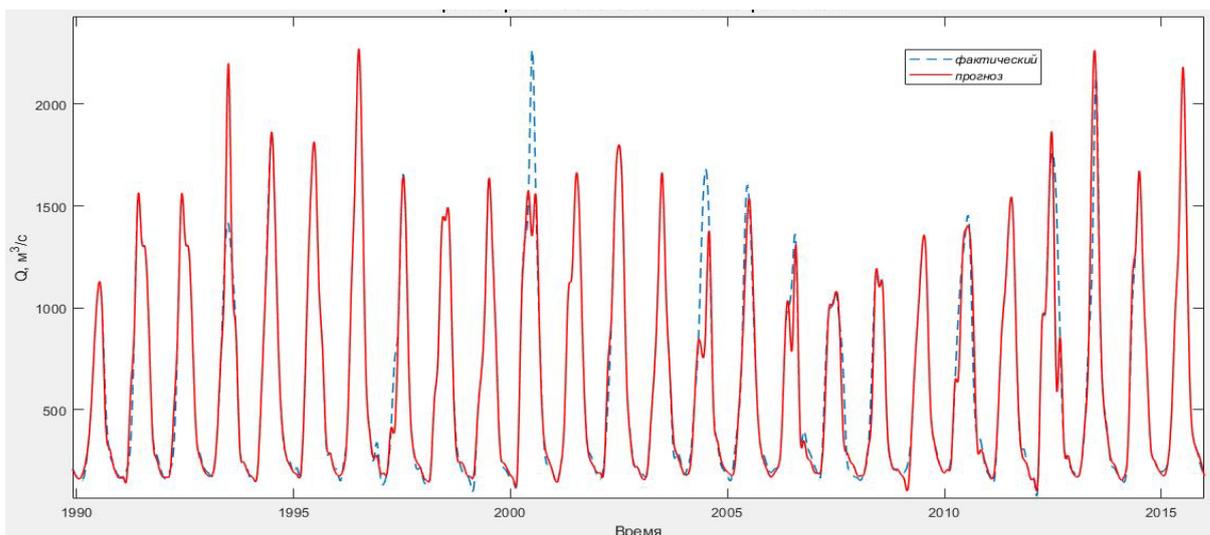


Рисунок 2.10 – Прогнозирование с использованием нейронных сетей

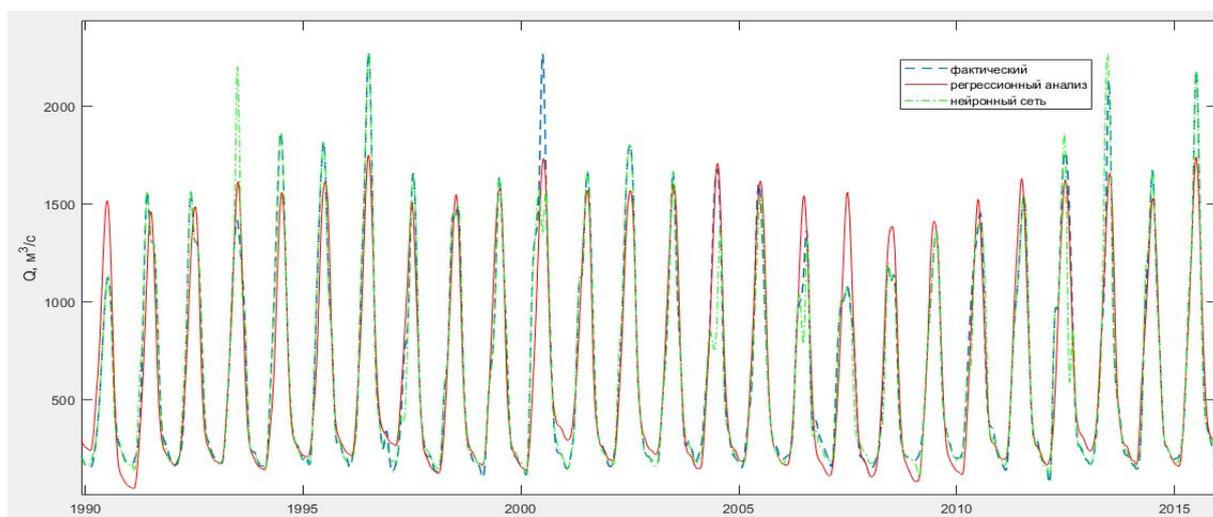


Рисунок 2.11 – Сравнение результатов прогнозирования стока реки Вахш на основе методов нейронных сетей и регрессионного анализа

Применением алгоритмов машинного обучения на языке Python авторами был разработан программный комплекс “База данных ML-VakhshRiver: Прогнозирование стока реки Вахш на основе методов машинного обучения”, для которой получено Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №1202400516 от 05.06.2024 года [20-А]. Программный комплекс представляет собой базу данных по гидрологическим рядам реки Вахш, и позволяет проанализировать среднемесячные расходы реки по месяцам, сезонам и по годам, также она позволяет прогнозировать стока реки Вахш в долгосрочном периоде.

Интерфейс программы включает ряд модулей, каждый из которых показывает, анализирует и решает те или иные задачи по прогнозированию речного стока. Интерфейс разработанной программы состоит из следующих вкладок:

«*Таблица расходов*» – этот модуль содержит исходные статистические данные по среднемесячным значениям стока реки Вахш за период с 1927 по 2018 годы, которые представлены в табличном виде, значения показаны в м³/с (рисунок 2.12). При увеличении ряда наблюдений программа позволяет добавить данные по гидрологии, что будет повысить точность прогнозирования;

Прогнозирование стока реки Вахш на основе методов машинного обучения												
Таблица расходов	Изменение по сезонам		Прогнозирование	Работа с данными		О программе						
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1927	180	185	175	335	780	775	1015	1565	830	260	170	175
1928	175	180	200	710	1330	1960	1685	1565	825	365	280	210
1929	180	180	310	550	700	1355	1430	1490	865	350	250	210
1930	180	180	255	635	1000	1200	2220	1250	680	325	190	160
1931	165	140	230	440	880	1080	1490	1710	1090	520	290	270
1932	181	178	276	492	758	1240	1940	1310	632	283	209	172
1933	150	151	177	306	710	1060	1730	1650	757	304	206	183
1934	147	201	228	502	674	1650	1890	1500	679	335	245	217
1935	181	169	236	329	722	945	1740	1580	680	303	259	187
1936	162	164	172	386	1050	1540	1800	1120	747	277	220	183
1937	176	171	178	342	935	1400	1710	1410	716	336	265	199
1938	175	167	208	514	1080	943	1270	1200	542	280	217	195
1939	174	167	185	319	921	1210	1450	1310	648	316	216	175
1940	173	173	188	308	649	1230	1270	1060	563	292	228	188
1941	166	180	230	547	1160	1670	1630	1570	714	404	272	241
1942	209	197	308	629	1030	1270	2050	1630	962	416	344	289
1943	205	198	268	449	795	1220	1810	1500	831	360	279	243
1944	209	194	253	486	802	945	1910	1780	747	313	261	204
1945	175	163	241	552	998	1410	1870	1440	814	372	271	216

Рисунок 2.12 – Вкладка программы (таблица расходов)

«*Изменение по сезонам*», которое позволяет анализировать сезонную и месячную динамику речного стока в заданных временных пределах, то есть можно выбрать период анализа, и вид диаграммы (график, гистограмма, пузырьковая или ступенчатая). Также, можно выбрать анализ для среднегодовых расходов, минимальные и максимальные расходы. Кривые или данные графика можно получить как по сезонам (рисунок 2.13а), так и по месяцам (рисунок 2.13б);

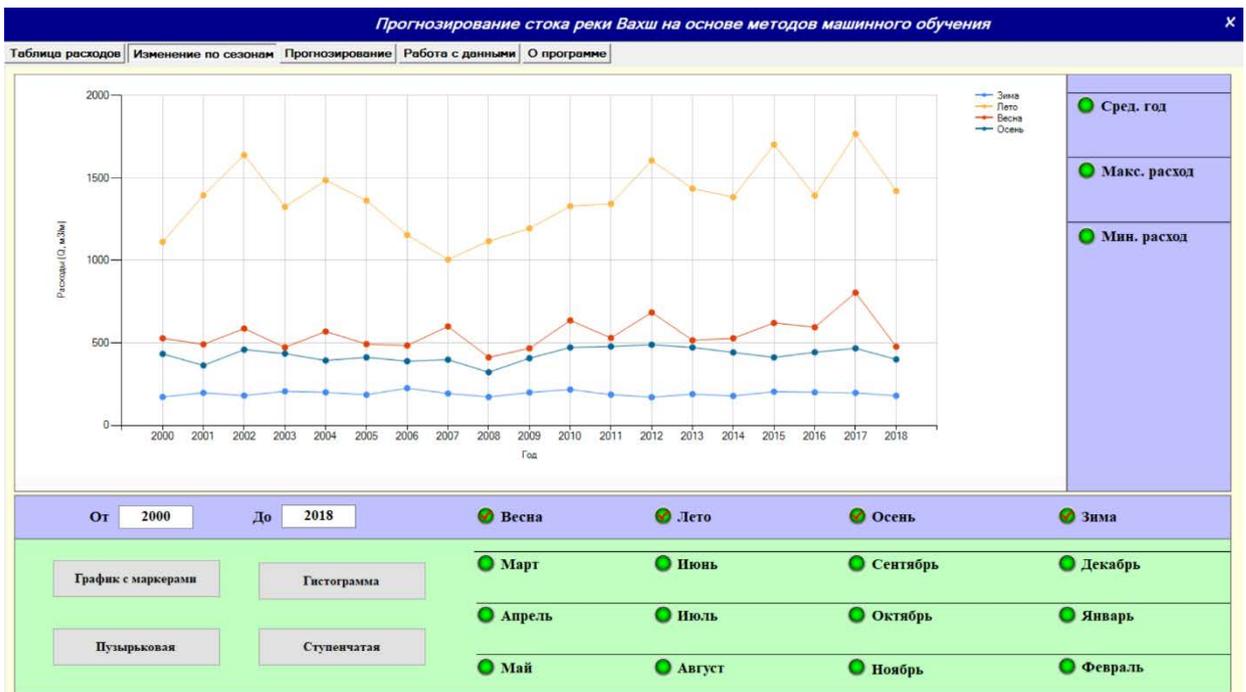


Рисунок 2.13а – Вкладка программы (Изменение по сезонам)

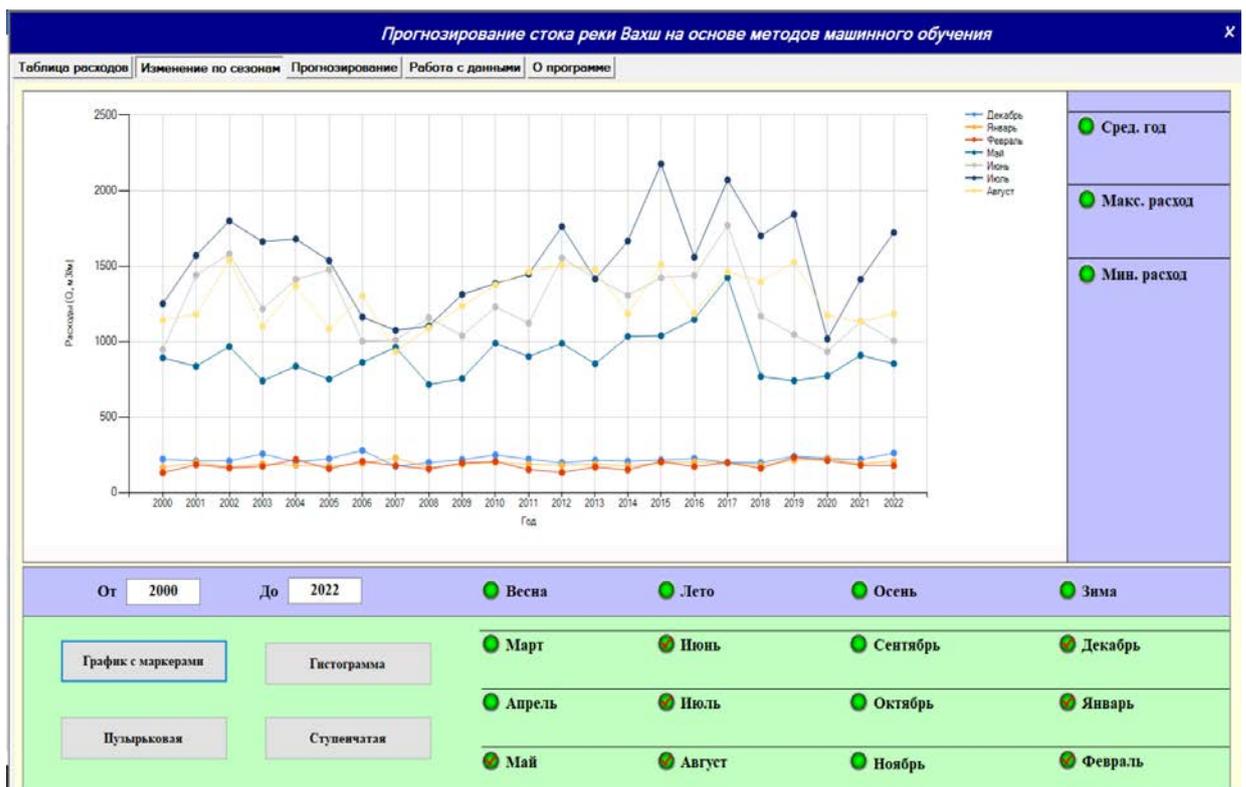


Рисунок 2.13б – Вкладка программы (Изменение по месяцам)

«Прогнозирование» на этом модуле и производится прогнозирование для требуемого года. Здесь можно выбрать метод для прогнозирования, указать год для прогнозирования среднемесячных значений стока реки и

сравнение результатов различных моделей. Здесь также можно выбрать графический вид представления результатов (рисунок 2.14);

«Работа с данными» – предоставляет инструменты просмотра и экспорта данных по месяцам требуемого года (рисунок 2.15);

«О программе» – содержит справочную информацию о функциональности, разработчиках и используемых методах.

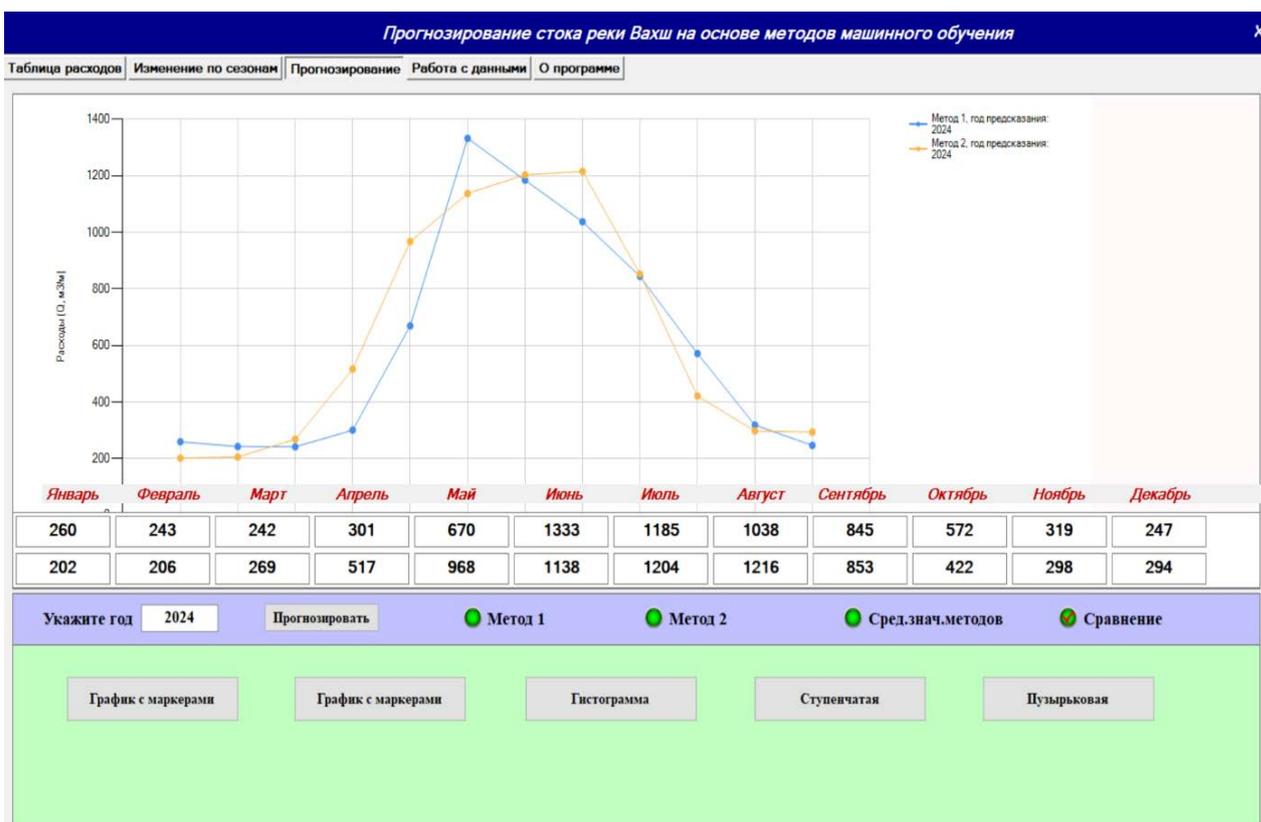


Рисунок 2.14 – Вкладка программы (Прогнозирование)

Различия между моделями (метод 1 и метод 2) и объяснения

1. Архитектура сети

Метод 1: Более глубокая (больше слоев) и широкая (больше нейронов в слоях): 128 -> 64 -> 32. Это позволяет модели изучать более сложные взаимосвязи в данных, но увеличивает риск переобучения.

```
model = Sequential([
    Dense(128, activation='relu',
        kernel_regularizer=regularizers.l2(0.01),
        input_shape=(X_scaled.shape[1],)),
    Dropout(0.5),
    Dense(64, activation='relu', kernel_regularizer=regularizers.l2(0.01)),
    Dropout(0.5),
    Dense(32, activation='relu', kernel_regularizer=regularizers.l2(0.01)),
    Dense(1)])
```

Метод 2: Более простая: 64 -> 32. Уменьшение количества слоев и нейронов делает модель менее подверженной переобучению, обучает быстрее, и может лучше обобщать данные, особенно если обучающий набор не очень велик или данные имеют относительно простую структуру.

```
model = Sequential([
    Dense(64, activation='tanh',
        kernel_regularizer=regularizers.l2(0.001),
        input_shape=(X_scaled.shape[1],)), # Изменено: 64 нейрона, tanh,
        l2=0.001
    Dropout(0.3), # Изменено: Меньший dropout
    Dense(32, activation='tanh',
        kernel_regularizer=regularizers.l2(0.001)), # Изменено: 32
        нейрона, tanh, l2=0.001
    Dense(1)])
```

2. Функция активации

Метод 1: relu (Rectified Linear Unit). relu хорошо работает для многих задач, но может страдать от "умирающих ReLU" (когда нейрон перестает активироваться).

Метод 2: tanh (Hyperbolic Tangent). tanh выводит значения в диапазоне (-1, 1), что может помочь в обучении некоторых типов данных. Она также менее склонна к проблеме "умирающих ReLU". tanh может быть более подходящей, если входные данные нормализованы к диапазону около нуля.

3. Регуляризация (L2)

Метод 1: l2(0.01). Более сильная регуляризация. Это означает, что штраф за большие веса в модели больше.

Метод 2: l2(0.001). Более слабая регуляризация. Это позволяет модели иметь более гибкие веса, но увеличивает риск переобучения. Выбор между сильной и слабой регуляризацией зависит от размера набора данных и сложности задачи.

4. Dropout

Метод 1: Dropout(0.5). Более агрессивный dropout. Это отключает 50% нейронов во время каждой итерации обучения, что помогает предотвратить переобучение, но может замедлить обучение.

Метод 2: Dropout(0.3). Менее агрессивный dropout. Отключается 30% нейронов, что обеспечивает меньшую регуляризацию, но может позволить модели учиться немного быстрее.

5. Learning Rate

Метод 1: learning_rate=0.002.

```
optimizer = Nadam(learning_rate=0.002)
```

Метод 2: learning_rate=0.001. Уменьшение скорости обучения часто улучшает сходимость и предотвращает перескакивание минимума функции потерь. Более низкий learning rate обычно требует большего количества эпох обучения.

```
optimizer = Nadam(learning_rate=0.001)
```

6. Эпохи и размер пакета (Epochs and Batch Size)

Метод 1: epochs=100, batch_size=32.

Метод 2: epochs=50, batch_size=16. Меньший размер пакета обеспечивает больше шума в градиентном спуске, что может помочь избежать локальных минимумов. Уменьшение количества эпох соответствует упрощенной модели.

Обоснование изменений:

- Упрощение модели: Более простая модель часто лучше работает с меньшими наборами данных или, когда нужно избежать переобучения. Упрощение может также ускорить обучение.

- tanh вместо relu: tanh может быть полезен, если данные масштабированы так, что значения находятся в диапазоне около нуля. В данном случае, использование StandardScaler должно приводить к такому распределению.

- Меньшая регуляризация и dropout: Если исходная модель слишком сильно регуляризована (т.е., она плохо обучается даже на обучающих данных), уменьшение регуляризации и dropout может помочь ей лучше подстроиться к данным.

- **Меньший learning rate и размер пакета:** Более низкая скорость обучения и меньший размер пакета могут улучшить сходимость, особенно при использовании упрощенной модели.

Лучший способ выбрать между этими двумя моделями (или любыми другими вариантами) – это экспериментально. Мы обучили обе модели на наборе данных с помощью библиотеки Keras указывая разные параметры и оценили их производительность. Метод 1 и 2 справляется с задачей хорошо, это говорить об успешном обучении модели.



Рисунок 2.15 – Вкладка программы (Работа с данными)

Сравнения результатов прогнозирования с фактическими значениями. Результаты прогнозирования стока реки Вахш, полученное на разработанном на основе моделей машинного обучения программном обеспечении [20-А], и сравнение этих результатов с фактическими значениями стока реки Вахш приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнения результатов прогнозирования с фактическими значениями

Прогнозируемый год	Сток реки по месяцам (м ³ /с)												Прогноз
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2021	181	194	251	561	934	1053	1173	1294	684	312	307	322	метод 1
	283	266	284	385	833	1229	1147	1054	822	572	364	300	метод 2
	192	181	260	415	909	1133	1415	1113	848	341	249	217	фактический
2022	263	248	256	331	1040	1220	1213	1208	790	325	292	291	метод 1
	224	209	205	278	743	1390	1248	1106	837	553	318	249	метод 2
	186	165	337	627	838	1089	1791	1028	696	330	271	212	фактический
2024	272	262	288	389	904	1408	1313	1199	755	364	307	313	метод 1
	222	217	258	367	979	1181	1206	1220	755	363	306	311	метод 2
	171	148	178	338	640	950	1194	1250	503	240	201	128	фактический

Графическое сравнение данных результатов прогнозирования на основе машинного обучения с фактическими значениями притока реки Вахш приведена на рисунке 2.16.

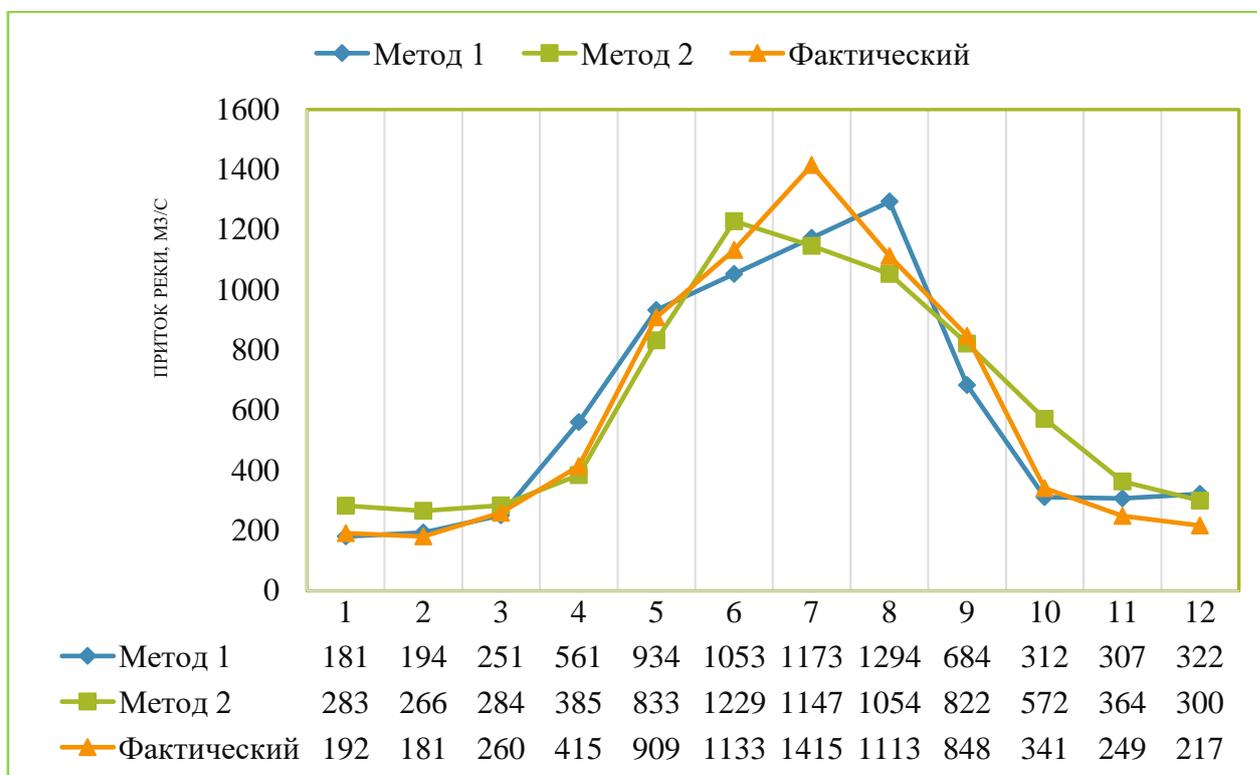


Рисунок 2.16 – Сравнение результатов прогнозирования с фактическими значениями

Метрики оценки точности прогнозов гидрологических временных рядов стока воды.

Точность прогноза речного стока в гидрологических расчетах является важным показателем при рациональном управлении водными ресурсами, планировании оптимальных режимов работы ГЭС и ранней информированности о паводках. Для оценки качества результатов прогнозирования можно использовать различные статистические показатели, наиболее известными из таких метрик являются:

1. MAE – Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error)

MAE измеряет среднее значение модулей ошибок прогноза, т.е. среднюю величину отклонения прогнозируемого расхода воды \hat{Q}_t от фактического Q_t без учёта знака ошибки:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Q_t - \hat{Q}_t|, \quad (2.17)$$

где Q_t – фактическое значение расхода воды в момент времени t , м³/с;

\hat{Q}_t – прогнозное значение расхода воды в момент времени t ;

n – количество наблюдений.

MAE выражается в тех же единицах измерения, что и сам показатель – м³/с.

2. MSE – Среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error)

MSE показывает среднее значение квадратов ошибок прогноза. В отличие от MAE, квадраты ошибок увеличивают вес больших отклонений, что делает MSE более чувствительной к выбросам:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2. \quad (2.18)$$

3. RMSE – Корень из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error)

RMSE является квадратным корнем из MSE и выражается в тех же единицах, что и исходная величина. Сохраняя чувствительность к крупным ошибкам, RMSE проще интерпретировать, чем MSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2}. \quad (2.19)$$

4. MAPE – Средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error)

MAPE измеряет среднюю величину абсолютной ошибки в процентах от фактического значения.

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Q_t - \hat{Q}_t}{Q_t} \right|. \quad (2.20)$$

Для гидрологии рекомендуется использовать комплексную оценку, например: прогноз считается достаточно точным, если одновременно выполняются условия:

$$MAPE < 15\%, \quad RMSE < 0.2 \cdot \bar{Q}, \quad MAE < 0.15 \cdot \bar{Q}$$

Метрики оценки прогноза стока реки Вахш приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Метрики оценки прогноза стока реки Вахш

Прогноз по первому методу				Прогноз по второму методу			
$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\left \frac{Q_t - Q_t^*}{Q_t} \right $	$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\left \frac{Q_t - Q_t^*}{Q_t} \right $
77	5929		0,41	38	1444		0,20
83	6889		0,50	44	1936		0,27
81	6561		0,24	132	17424		0,39
296	87616		0,47	349	121801		0,56
202	40804		0,24	95	9025		0,11
131	17161		0,12	301	90601		0,28
578	334084		0,32	543	294849		0,30
180	32400		0,18	78	6084		0,08
94	8836		0,14	141	19881		0,20
5	25		0,02	223	49729		0,68
21	441		0,08	47	2209		0,17
79	6241		0,37	37	1369		0,17
152,25	45582,25	213,5	0,26	169	51362,67	226,63	0,28
MAE	MSE	RMSE	MAPE	MAE	MSE	RMSE	MAPE

MAE – метод 1 показывает меньшую среднюю абсолютную ошибку (88.6 против 98.7 м³/с), что говорит о более точных прогнозах в среднем.

MSE и RMSE – у метода 1 значения ниже, что также подтверждает меньшее влияние крупных ошибок.

MAPE – метод 1 имеет значительно меньшую относительную ошибку (15.6 % против 27.1 %), что особенно важно для сравнений в гидрологии.

Общая оценка – метод 1 явно превосходит метод 2 по всем ключевым метрикам, особенно по относительной точности, что делает его более надёжным для практического использования.

Таким образом, полученные результаты прогнозирования речного стока на основе алгоритмов машинного обучения показывают, что они имеют повышенную точность при прогнозировании речного стока по сравнению с традиционными методами прогнозирования. Разработанный на основе методов машинного обучения программный комплекс позволяет делать более достоверный прогноз речного стока, который в свою очередь, является важным при оптимизации режимов работы каскада ГЭС, эксплуатируемых на реке Вахш, особенно Рогунской ГЭС в условиях климатических и гидрологических изменений.

2.6. Выводы по второй главе

В данной главе диссертационного исследования были рассмотрены важность и необходимость регулирования речного стока и основы их прогнозирования. Рассмотрены особенности моделирования гидрологических временных рядов, в том числе для реки Вахш, построение и необходимость кривых обеспечения реки. Приведены методы прогнозирования стока реки Вахш с использованием методов на основе машинного обучения. Разработан программный комплекс на основе моделей машинного обучения, используемой для прогнозирования стока реки Вахш в долгосрочном периоде. Программный комплекс предназначен для повышения эффективности функционирования и назначения оптимальных режимов работы ГЭС каскада, особенно Рогунской ГЭС.

Использование предложенного способа и полученные результаты дают возможность минимизировать объем холостых сбросов, обеспечить оптимальное планирование выработки электроэнергии в долгосрочном периоде времени и повысить надёжность функционирования ГЭС в ЭЭ.

Таким образом, на основе полученных результатов рекомендуется применение методов на основе машинного обучения для прогнозирования речного стока в долгосрочном периоде. Они позволяют получить более точные данные прогноза, необходимые, для назначения оптимальных долгосрочных режимов работы ГЭС Вахшского каскада [10-А, 17-А, 19-А, 20-А].

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС ВАХШСКОГО КАСКАДА С ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ РОГУНСКОЙ ГЭС

3.1. Методика диспетчерского управления режимами ГЭС.

Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС и каскада ГЭС, которые имеют водохранилища представляют сложную задачу. Сложность заключается в том, что сток реки для регулируемого периода особенно в долгосрочном периоде имеют стохастический, неопределенный характер или имеют ограниченный точный прогноз [17]. Гидравлические расчеты необходимы для проектирования и назначения оптимальных режимов сработки и заполнения водохранилища, составления диспетчерских графиков, мониторинга и оценки уровней воды в период паводков и др.

Диспетчерское управление режимами водохранилищ ГЭС

Диспетчерские графики строятся на основе анализа работы водохранилища в гидрологических условиях года и его периодов для расчетных обеспеченностей. Диспетчерские графики строятся на основе водно-энергетических расчетов. Диспетчерские графики строятся следующим образом: по оси ординат откладывается уровень воды в водохранилище, по оси абсцисс – время (период цикла регулирования). График имеет несколько зон, каждая из которых соответствует определенному режиму работы водохранилища [122]. В процессе диспетчерского управления водохранилища ГЭС выполняют три ключевые функции, каждая из которых имеет различный приоритет с точки зрения ответственности и критичности [14]:

1. Безопасность гидротехнических сооружений, заключается в поддержании безопасных уровней воды и предотвращении аварийных ситуаций ГТС, которые включают в себя контроль безопасности плотин и всего гидроузла;

2. Гарантированная выработка электроэнергии, то есть, надёжное обеспечение потребителей электроэнергией, с учётом соблюдения графика энергопотребления в условиях ограниченности речного стока, особенно в

маловодном году;

3. Эффективное использование речного стока, то есть оптимального использования водных ресурсов, предполагающая выработку наибольшего объема электроэнергии и снижение потерь холостыми сбросами. Это достигается за счёт прогнозирования стока, точного планирования и координации работы каскада ГЭС.

Диспетчерское управление режимами водохранилищ ГЭС и каскада ГЭС и их теоретические и методологические особенности более подробно были рассмотрены в трудах таких ученых в области гидроэнергетики и управления водно-энергетическими ресурсами, в том числе в работах: С.Н. Никитина, А.Ш. Резниковского, М.И. Рубинштейна, А.Е. Асарина, К.Н. Бестужевой, Г.А. Агасандяна, А.Ю. Александровского и др., которые заложили фундаментальные основы оптимального управления режимами водохранилищ в условиях многокритериальности и неопределённости речного стока.

В работе [123] говорится: «Диспетчерские правила представляют собой одну из форм планирования и управления режимом работы водохранилища для каждой конкретной ситуации. Они могут быть представлены в графической, аналитической или табличной форме».

Наиболее часто встречается представление этих правил в виде графиков, являющихся результатом оптимизационных расчетов по уже имеющейся исходной информации [16, 17].

Наиболее распространенными диспетчерскими правилами являются правила, в которых в качестве управляющего фактора используется уровень воды в водохранилище к началу расчетного интервала времени [124, 125].

Разработка правил эксплуатации водохранилищ осуществляется как для отдельных гидроузлов, так и для каскадных систем водохранилищ, функционирующих в едином гидрологическом комплексе. При этом проектирование эксплуатационных режимов в рамках каскада следует иерархическому принципу – от верхнеуровневых (расположенных выше по

течению) к нижеуровневым водохранилищам. В процессе формирования правил эксплуатации нижерасположенных водохранилищ обязательно учитываются те изменения в гидрологическом режиме, которые заданы нормативами и регламентами для вышерасположенных объектов, поскольку последние оказывают определяющее влияние на гидрографа и водные ресурсы, поступающие в нижележащие участки речной системы.

Водоохранилища могут создаваться как на основной реке, сток которой необходимо зарегулировать, так и на одном или нескольких притоках, впадающих в реку выше расчетного створа по течению [11].

Общая схема водохранилища представлена на рисунке 3.1.

Нормальный подпорный уровень (НПУ) – это проектно установленный максимальный уровень воды в верхнем бьефе водохранилища, при котором обеспечивается длительная и безопасная эксплуатация гидроузла. Он определяется с учётом конструктивных и эксплуатационных характеристик гидротехнических сооружений, а также нормативных требований по надежности и устойчивости элементов гидроэнергетической системы. Объем водохранилища при этом уровне носит название полного объема и обозначается $V_{полн.}$.

Уровень мертвого объема (УМО) – это минимально допустимый уровень сработки водохранилища, обеспечивающий получение проектных параметров ГЭС. Объем воды ниже УМО обычно не используется для регулирования стока (выработки электроэнергии) и его называют мертвым объемом, обозначается $V_{м.}$.

Разность между полным и мертвым объемами называется полезным объемом водохранилища $V_{полез.}$, который используется для выработки электрической энергии (регулирования стока):

$$V_{полез.} = V_{полн.} - V_{м.} \quad (3.1)$$

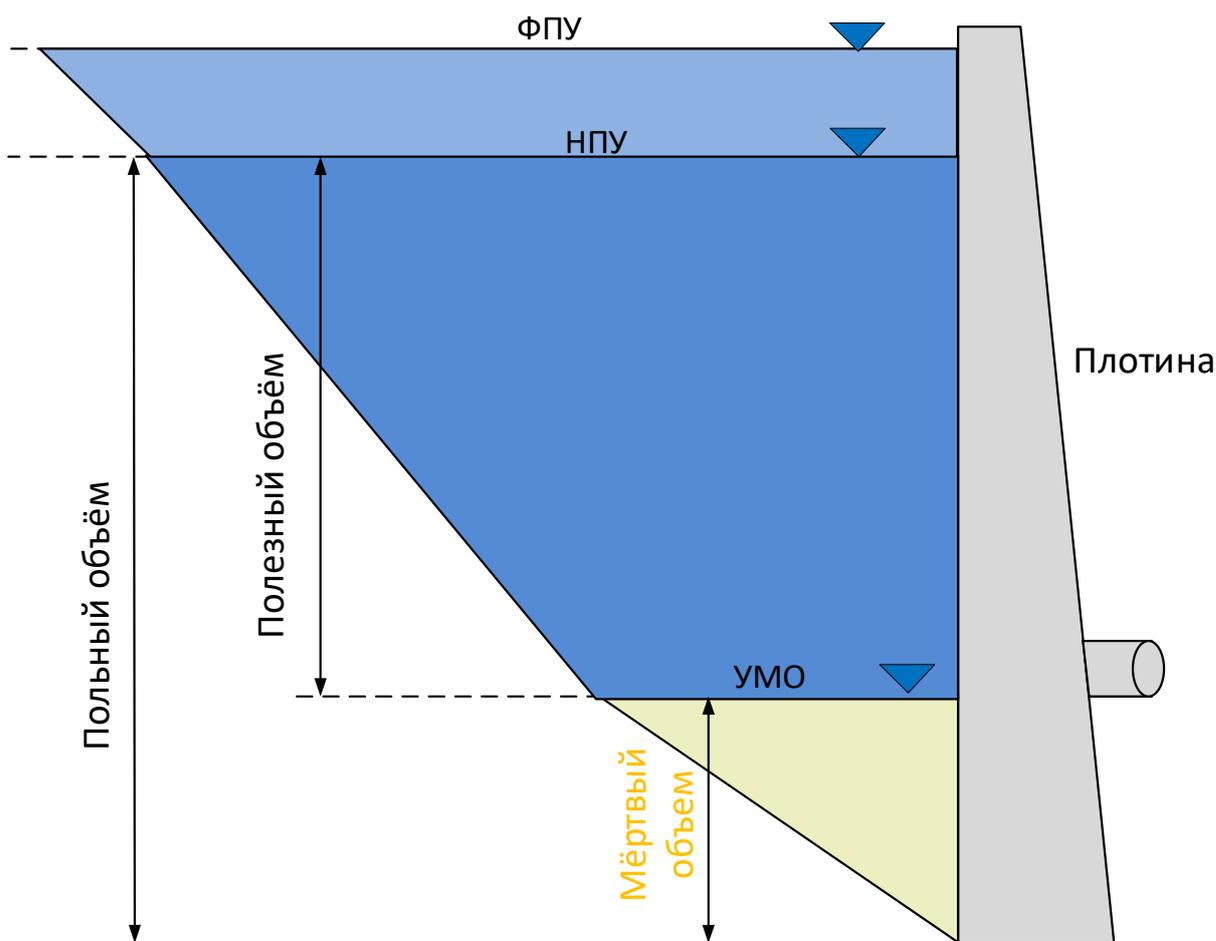


Рисунок 3.1 – Характеристика водохранилищ ГЭС

Форсированный подпорный уровень (ФПУ) – это уровень, который может допускаться на короткое время при пропуске исключительно больших паводков или половодий, имеющих вероятность ниже расчетной, которая была принята для нормального условия эксплуатации. Превышение ФПУ по отношению к НПУ может составлять 1...3 м.

Объем водохранилища между отметками НПУ и ФПУ называется резервным объемом водохранилища и используется для трансформации (срезки) половодий и паводков.

Оптимальная эксплуатация и управление режимами водохранилищ представляет собой сложную задачу комплексного использования водных и водно-энергетических ресурсов, которое обусловлены стохастическим и неопределенным характером стока реки. Данную задачу можно решить, используя правил эксплуатации в качестве руководства для принятия решений

по эксплуатации водохранилищ [5-А]. Правила эксплуатации водохранилищ могут быть представлены в виде графиков (диспетчерских), таблиц или функций и определять эксплуатационные решения в течение каждого периода как функцию соответствующей доступной информации [126]. Учитывая различные функциональные формы правил эксплуатации и оптимальные решения диспетчеризации детерминированной оптимизации водохранилищ, различные правила эксплуатации водохранилищ ГЭС быть получены с использованием линейных или нелинейных методов аппроксимации [127].

Оптимальный режим работы водохранилища ГЭС в долгосрочном периоде можно определить, используя диспетчерские графики, которые содержат линию ограничения наполнения водохранилища в многоводных условиях, линию ограниченных подач при маловодных условиях, а также линию наполнения и сработки водохранилища [128]. Эти линии строятся в начале года после получения прогноза объема стока за год по реке и с учетом объема наполнения водохранилища в начале года. Для этого необходимо иметь график внутри годового распределения стока по реке, график гарантированных подач воды потребителям и данные о составляющих водного баланса [129].

Таким образом, назначение оптимальных долгосрочных режимов работы водохранилищ ГЭС и каскада ГЭС с использованием эксплуатационных кривых – диспетчерских графиков позволяют эффективно управлять водно-энергетическими ресурсами и увеличить выработку электроэнергии на ГЭС.

3.2. Разработка диспетчерских графиков для долгосрочной оптимизации режима Рогунской ГЭС

Диспетчерские графики, являясь одним из основных видов правил оптимального управления водохранилищами включают в себя: правил сохранения гарантированной выдачи мощности, правил своевременной сработки и заполнения водохранилища и правил перераспределения мощности и соответственно и воды во времени. На характер этих правил в

основном влияет назначение гидроузла и его регулирующие возможности [24]. В зависимости от водохранилища и его назначения диспетчерские графики могут иметь различные формы, то есть в них увеличивается количества зон с увеличением количества водопользователей и водопотребителей (комплексное использование водных ресурсов) и задачи регулирования речного стока [17].

Диспетчерские правила эксплуатации широко применяются при эксплуатации ГЭС с водохранилищами годового и многолетнего регулирования из-за простоты их реализации [130]. Диспетчерские графики пересматриваются и уточняются в период эксплуатации водохранилища ГЭС, изменения водохозяйственной условий, экологических требований к режиму использования водно-энергетических ресурсов.

Оптимальный режим сработки и заполнения водохранилища, которые определяется на основе маловодных, средневодных и многоводных годов, рассчитываемых по гидрологическим данным стока реки (определение таких годов для реки Вахш приведена в главе 2, п. 2.4). Основой для составления диспетчерских графиков являются линии ограничения по заполнению, то есть НПУ и линий ограничения расходов воды, то есть уровень мертвого объема [131].

Водохранилище Рогунской ГЭС, располагается на территории Рогунского, Нурабадского и Раштского районов Республики Таджикистан, в горной котловине р. Вахш и ее притоков. Водохранилище вытянуто от створа плотины с юга-запада на северо-восток и окружено со всех сторон горами. На этом участке долина р. Вахш ограничена Вахшским и Каратегинским хребтами с отметками до 2000 м и протекает в долине V-образной формы, которая в створе плотины переходит в теснину с отвесными бортами, отдельные участки долины представлены прерывистой поймой. Склоны долины выветренные, слабо задернованные, сильно изрезанные. В осенне-зимнее время в долине наблюдаются осыпание, местами камнепады и обвалы горных пород. Течение реки на этом участке бурное, с уклонами до 4 – 7 °.

Осуществляя многолетнее регулирование речного стока водохранилище Рогунской ГЭС позволяет увеличить расход воды в нижний бьеф с октября по апрель месяца за счет сработки водохранилища и ограничить расход воды в нижний бьеф в с мая по сентябрь месяца то есть в период заполнения водохранилища, что способствует оптимальной эффективной работе ГЭС каскада реки Вахш и рациональному использованию водных ресурсов [5-А]. При ПУ 1100; 1140; 1165 и 1185 м Рогунское водохранилище не срабатывается, т.е. приток пропускается в нижний бьеф гидроузла транзитом, при ПУ 1235; 1255 и НПУ 1290 м Рогунское водохранилище срабатывается для удовлетворения нужд потребителей и производится сезонное или многолетнее регулирование стока реки Вахш в соответствии с диспетчерскими правилами. Рогунское водохранилище осуществляя многолетнее регулирование стока реки Вахш увеличивает сток в нижнем бьефе гидроузла в X-III или X-IV за счет сработки водохранилища и уменьшает в V-IX при наполнении водохранилища.

Уровень мертвого объема показывает минимальный уровень воды при сработке водохранилища при сезонном и годовом регулировании, а также является максимальной отметкой в критичном периоде в маловодном году. Это объясняется тем, что полезный объём водохранилища прежде всего предназначен для обеспечения гарантированной выработки мощности [17].

При сезонном и многолетнем регулировании стока некоторая доля полезной емкости водохранилища должна быть наполнена в течение отрезка времени до наступления межени, с тем чтобы затем ее можно было израсходовать для удовлетворения требований водопотребителей и водопользователей, т. е. для производства гарантированной отдачи гидроузла. Эту долю полезной емкости водохранилища, зависящую от времени, назовем условно зоной гарантированной отдачи [17].

Диспетчерские графики дают возможность определить оптимальный режим эксплуатации водохранилищ, в том числе режим заполнения и сработки. Задачи, решаемые при диспетчерском управлении, следующие

[132]: обеспечение безопасности гидротехнических сооружений расположенных в верхнем и нижнем бьефах водохранилища; обеспечение нормальной гарантированной выработки электроэнергии; обеспечение пониженной гарантированной выработки, недопущение глубоких перебоев благодаря своевременному переходу водохозяйственных установок на пониженное потребление; максимальное эффективное использование водных ресурсов и минимальный объем холостых сбросов. Обычно диспетчерские графики имеют четыре основные режимные зоны: а) зона нормальной гарантированной выработки; б) зона повышенной (максимальной) выработки; в) зона пониженной гарантированной отдачи; зона принудительной сработки. Эффективность диспетчерских графиков использования водно-энергетических ресурсов требует корректировку структуры с учетом прогнозирования сброса к водным ресурсам и геофизических процессов, связанных с вероятным изменением климата.

Эффективное диспетчерское управление режимами водохранилищ требует учета множества параметров, которые можно разделить на несколько категорий, которые приведены в таблице 3.1.

Алгоритм диспетчерского управления, который предназначен для оптимальной максимальной выработки электроэнергии должен обеспечить баланс между собой целей, таких как выработка электроэнергии, ирригация, водный транспорт, водоснабжение, безопасность ГЭС, и экологические пропуски. Алгоритм должен сначала определить соответствующий временной горизонт и тип регулирования, а затем применить соответствующие параметры и логику принятия решений. Принципы построения этих алгоритмов зависят от способности регулирования водохранилища, то есть, если суточное или недельное регулирование, где полезный объем водохранилищ незначителен, основным параметром для оптимального управления является сток реки или её краткосрочный прогноз. А в случае, если водохранилище имеет сезонное годовое или многолетнее регулирование, например, как Рогунская ГЭС, тогда основным параметром становится

уровень верхнего бьефа или объем воды на определенную дату.

Таблица 3.1 –Параметры для диспетчерского управления

Категория	Параметр	Значимость для диспетчерского управления
Гидрологические	Среднегодовой приток	Основа для долгосрочного планирования водопользования и выработки энергии.
	Объем весеннего паводка (75%/50% обеспеченности)	Критично для планирования сбросов и обеспечения противопаводковой защиты.
	Температура воздуха, осадки, снежный покров	Влияют на прогнозирование притока, особенно от таяния снега.
Водохранилища	НПУ	Максимально допустимый уровень, определяет полный объем водохранилища.
	УМО	Минимальный уровень, ниже которого эксплуатация невозможна или неэффективна.
	Полный/Полезный объем водохранилища	Определяет емкость для накопления воды и возможности регулирования стока.
ГЭС	Установленная мощность	Максимальная мощность, которую может выработать станция.
	Напор	Влияет на эффективность выработки энергии и пропускную способность турбин.
	Коэффициент использования стока	Отражает эффективность использования водного ресурса для выработки энергии.
Энергетические	Прогноз спроса на электроэнергию	Определяет требуемые объемы выработки энергии в различные периоды.
	Состояние энергосистемы	Обеспечение баланса производства и потребления, частоты и напряжения.

Блок-схема алгоритма диспетчерского управления режимами водохранилищ ГЭС включает следующие основные этапы, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Алгоритм Диспетчерского управления режимами водохранилищ Рогунской ГЭС

Этапы Алгоритма	Описание Действий	Входные Параметры/Данные	Выходные Результаты
Сбор и обработка данных	Сбор данных из различных источников, проверка на корректность.	Уровень воды в водохранилище, приток, метеоданные, прогноз спроса на электроэнергию, состояние оборудования ГЭС.	Актуализированная база данных, первичные отчеты.
Прогнозирование	Разработка краткосрочных (до недели), среднесрочных (месяц, сезон) и долгосрочных (год, несколько лет) прогнозов притока воды.	Исторические гидрологические и метеорологические данные, текущие данные, климатические модели,	Прогнозы притока,
Целевые функции и ограничения	Формулировка целей управления (максимизация выработки энергии) и всех эксплуатационных, водохозяйственных и экологических ограничений.	НПУ, УМО, пропускная способность турбин/водосбросов, требования энергосистемы.	Математическая модель оптимизации (целевые функции, ограничения).
Оптимизационная модель	Расчет оптимального режима работы водохранилища и ГЭС на заданный горизонт планирования с учетом прогнозов, целей и ограничений.	Прогнозы, целевые функции и ограничения, текущее состояние водохранилища.	Оптимальные уровни водохранилища, расходы, выработка электроэнергии.
Построение диспетчерских графиков	Генерация детализированных диспетчерских графиков работы ГЭС (уровни водохранилища, расходы, выработка).	Результаты оптимизации.	Диспетчерские графики, плановые задания для персонала.
Мониторинг и корректировка	Постоянный контроль за фактическим состоянием системы, сравнение с плановыми графиками. Оперативная корректировка режимов.	Фактические данные, диспетчерские графики.	Корректирующие управляющие воздействия, обновленные графики.

Учитывая все вышеперечисленные параметры и критерии, на основе гидрологических данных рассматриваемой реки, а также используя данные,

полученные при долгосрочном режиме, на основе машинного обучения на программном комплексе разработанной автором для прогнозирования стока реки Вахш [20-А], автором были построены диспетчерские графики, которые предназначены для оптимального управления режимами водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном режиме [5-А]. Разработанный диспетчерский график имеет линии ограничения по уровням (НПУ, УМО) режимные зоны эксплуатации водохранилища. На рисунке 3.2 показан, разработанный автором диспетчерский график Рогунской ГЭС.

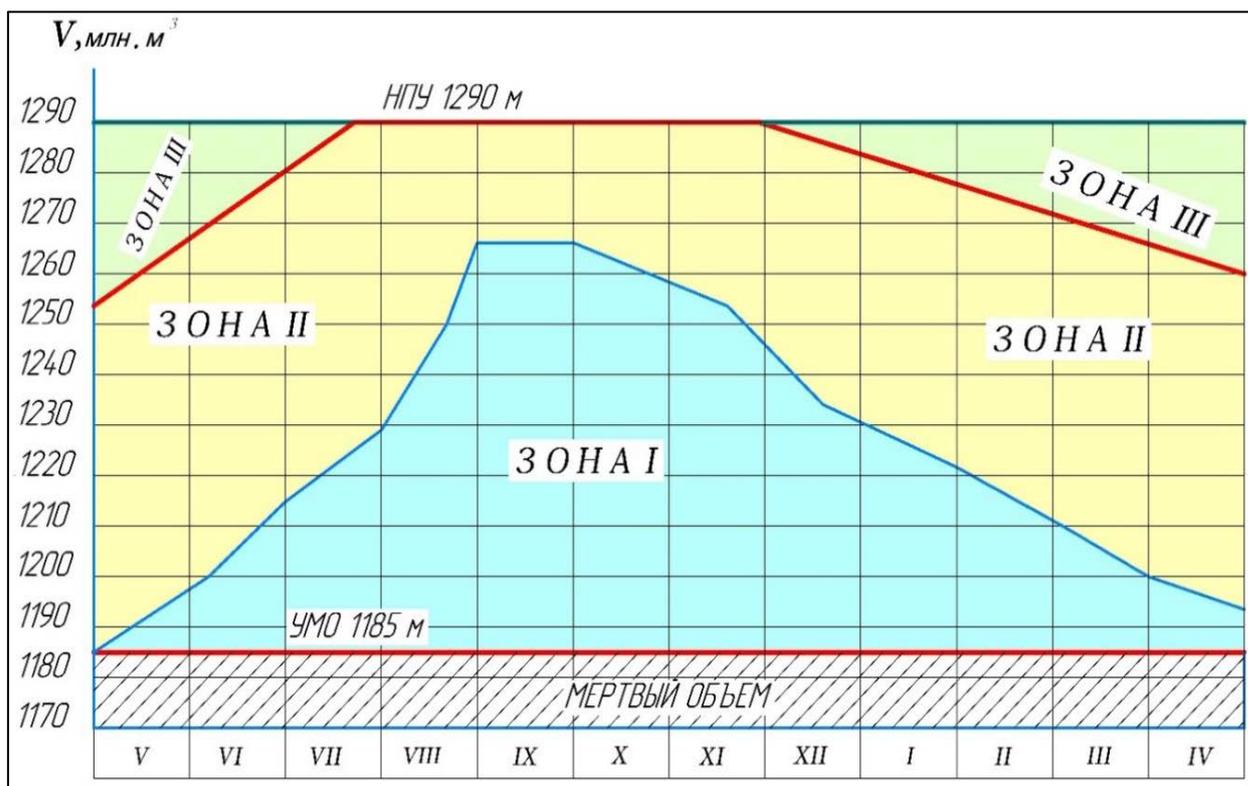


Рисунок 3.2 – Расчетный диспетчерский график Рогунской ГЭС

Как известно, при оптимальной эксплуатации уровень воды в водохранилище будет меняться между уровнями НПУ (максимум) и УМО (минимум). **Зона I** область, где станция будет работать со сниженной гарантированной мощностью. **Зона II** – станция будет работать с гарантированной мощностью. **Зона III** – зона максимальной отдачи (выработки). Уровень водохранилища достигает своего минимального уровня примерно в конце апреля. Начиная с мая приток воды на реке увеличивается и соответственно уровень водохранилища поднимается. В зависимости от

водности года водохранилище заполняется до НПУ с июля по августу. Оптимальными считаются режимы, когда сработка и заполнение водохранилища выполняется по зоне II.

Изменение водохозяйственных условий, и экологических требований к комплексному использованию водноэнергетических ресурсов в период эксплуатации водохранилища ГЭС, диспетчерские графики пересматриваются и уточняются. Также эффективность диспетчерских графиков при эксплуатации водохранилища требуют корректировки с учётом прогнозирования спроса к водным ресурсам и в зависимости от вероятного изменения климата.

3.3. Выводы по третьей главе

Диспетчерские графики позволяют назначить оптимальные режимы сработки и заполнения водохранилища в долгосрочном периоде по критерию максимальной выработки электроэнергии и рационального использования водных ресурсов. Таким образом, на основе гидрологических данных и данных долгосрочного прогнозирования для реки Вахш разработаны диспетчерские графики Рогунской ГЭС для назначения оптимальных долгосрочных режимов сработки и заполнения водохранилища, по критериям максимальной выработки электроэнергии и рационального использования водных ресурсов [4-А, 5-А, 17-А].

ГЛАВА 4. ОПТИМАЛЬНОЕ КРАТКОСРОЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ГЭС КАСКАДА

Оптимизация режимов работы в краткосрочном периоде – это прежде всего определяется назначением оптимальных суточных режимов ГЭС и каскада ГЭС. Это достигается путём оптимальной загрузки гидроагрегатов и всей ГЭС в сутки по часам, с учётом ограничений по уровням и по расходам воды [133]. Также при этом решаются задачи оптимального распределения мощности между агрегатами и между станциями, то есть выполняется внутростанционная оптимизация. При долгосрочном и краткосрочном периоде оптимизации режимов работы ГЭС учитываются ограничения, которые делают эти задачи трудоёмкой. Водноэнергетические расчеты при оптимизации необходимы, так как сток реки имеет стохастический и вероятностный характер.

При оптимальном управлении режимами ГЭС как в долгосрочном, так и в краткосрочном режиме необходим обязательный учёт комплекса ограничений, в том числе: эксплуатационных, технических, гидрологических и др. [134]. С учетом высокой размерности и сложности этих ограничений, задача становится крайне трудоёмкой и требует применения автоматизированных расчетных и оптимизационных систем. Вероятностный характер приточности воды к створу гидроузлов обуславливает необходимость выполнения серии сценарных водно-энергетических расчетов для оценки допустимых режимов.

4.1. Разработка модели каскада Вахшских ГЭС с учетом Рогунской ГЭС

В условиях стохастической неопределенности водноэнергетического баланса, актуальность приобретает задача разработки такого алгоритма и математической модели для оптимизации краткосрочных режимов работы каскада ГЭС, в котором учитывается гидрологические, технические, эксплуатационные и экологические ограничения, а также ограничения

связанное с безопасной эксплуатации ГЭС. Критерий такой модели может быть максимальной выработка электроэнергии, или расход минимального количества воды [87, 13-А].

Для разработки математической модели объекта исследования, то есть, каскада ГЭС, функционирующих на реке Вахш, необходимо схематическое расположение этих ГЭС в каскаде. В предыдущих главах было отмечено, что Рогунская ГЭС с водохранилищем многолетнего регулирования расположена в верховье реки Вахш, далее после неё расположена Нурекская ГЭС с водохранилищем сезонного регулирования стока, далее по течению Байпазинская, Сангтудинская ГЭС 1 и 2, и Головная ГЭС, которые осуществляют суточное регулирование. Модель каскада ГЭС реки Вахш схематически представлена на рисунке 4.1.

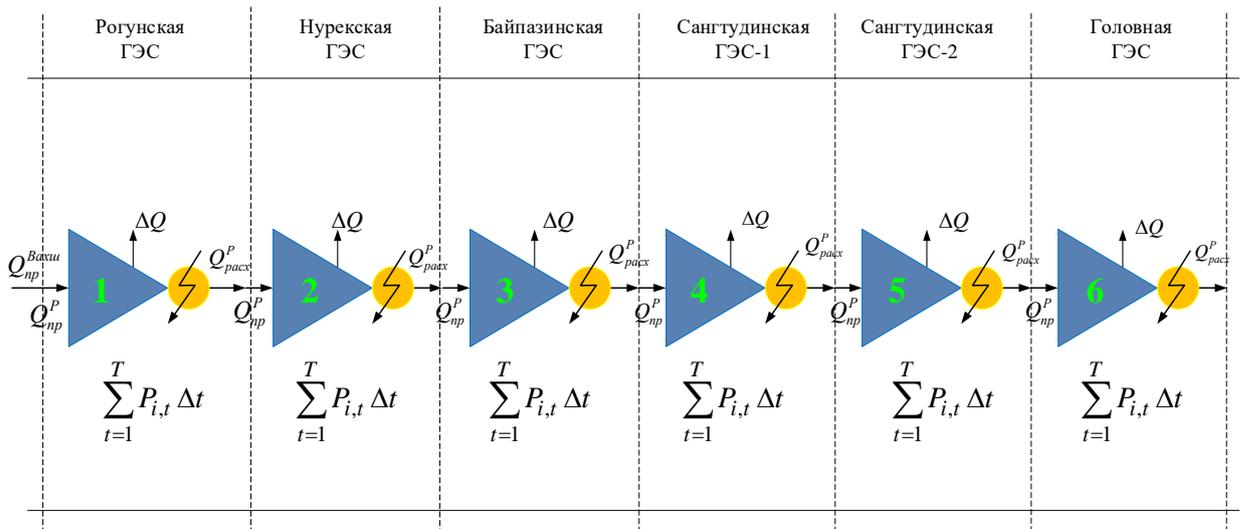


Рисунок 4.1 – Модель каскада ГЭС реки Вахш

Целью разработки математической модели каскада ГЭС в краткосрочном режиме является получение максимальной выработки электроэнергии при заданном расходе воды и с учётом всех возможных ограничений.

Математическая модель каскада ГЭС на реке Вахш

Целевая функция, критерий оптимизации – Максимальная выработка электроэнергии:

$$F = \max W = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t, \quad (4.1)$$

где: W – суммарная выработка энергии (кВт*ч); $i=1, \dots, n$ – индекс ГЭС; $t=1, \dots, T$ – интервалы времени; $P_{i,t}$ – мощность (кВт) станции i в интервале Δt – длительность интервала (ч).

Суммарная энергия каскада состоящий из n равна сумме энергий каждой ГЭС:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{t=1}^T P_{i,t} \Delta t. \quad (4.2)$$

Мощность каждой станции

$$P_{i,t} = \rho g \eta_i Q_{i,t} H_{i,t} = 9.81 \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot \eta_i, \quad (4.3)$$

где: ρ – плотность воды (≈ 1000 кг/м³), g – ускорение свободного падения (9.81 м/с²), η_i – коэффициент полезного действия агрегата, $Q_{i,t}$ – расход воды (м³/с), $H_{i,t}$ – напор (м).

Напор H для ГЭС с водохранилищем изменяется во времени.

$$H_{i,t} = Z_{i,t}^{BB} - Z_{i,t}^{HB}, \quad (4.4)$$

где Z_i^{BB} – уровень верхнего бьефа i -ой ГЭС; Z_i^{HB} – уровень нижнего бьефа i -ой ГЭС.

В водохранилищах ГЭС уровень нижнего бьефа изменяется в зависимости от расхода воды. Она характеризуется кривой нижнего бьефа, то есть зависимостью $Z^{HB} = f(Q)$, которая используется при оптимизации режимов работы каскада, чтобы учесть изменение реального напора и, соответственно, выработки электроэнергии. Она обязательна при водно-энергетических расчётах. Кривой нижнего бьефа также называют – характеристикой нижнего бьефа. Все ГЭС большой и средней мощности имеет такую кривую, в качестве примера на рисунке 4.2. представлена кривая нижнего бьефа Нурекской ГЭС.

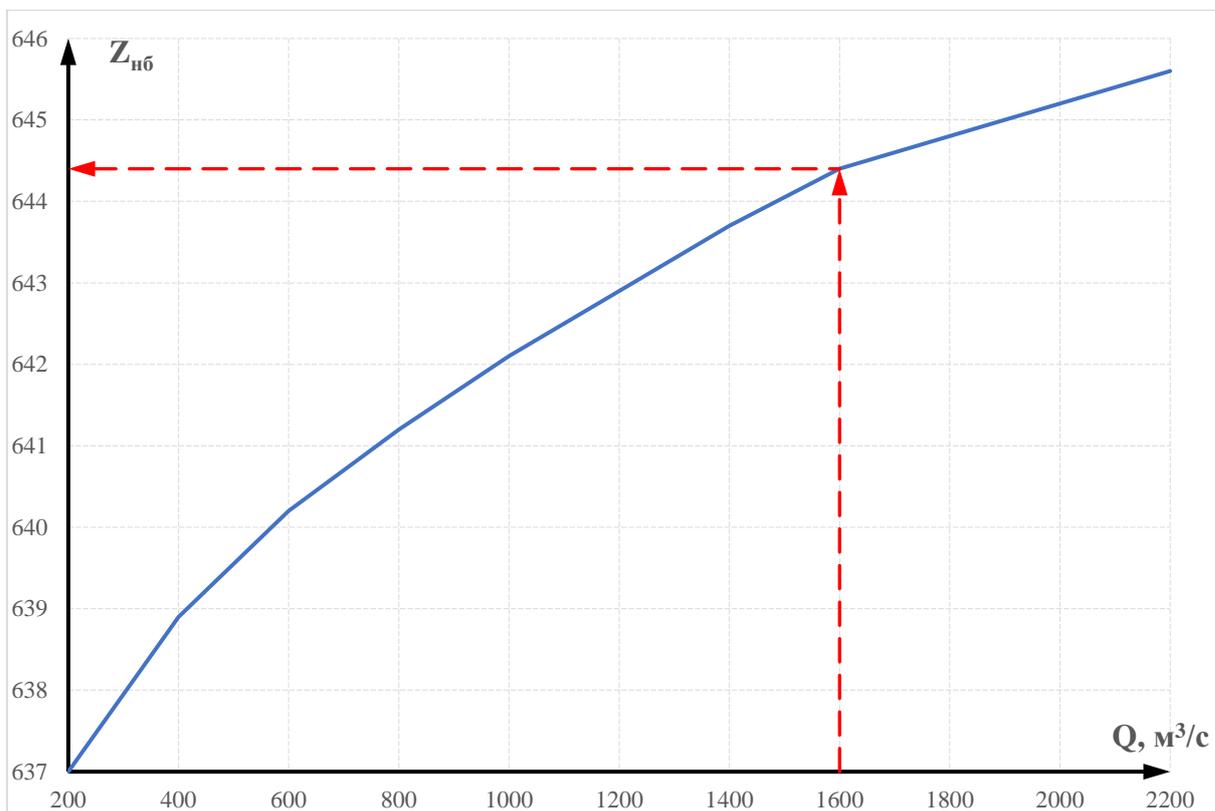


Рисунок 4.2 – Характеристика нижнего бьефа Нурекской ГЭС

В некоторых случаях характеристика нижнего бьефа представляется в табличном виде. Характеристики нижнего бьефов ГЭС каскада Вахш, то есть зависимости уровней нижних бьефов Z_i^{HB} в зависимости от расхода воды представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики нижних бьефов ГЭС каскада реки Вахш

Q _{нб} , м³/с	Z _i ^{HB} , м.н.у.м.					
	Рогунская	Нурекская	Байпазинская	Сангтудинская-1	Сангтудинская-2	Головная
200	972,5	637	571,5	507,75		454,5
400	973,5	638,9	571,6	508,3		455,2
600	974,6	640,2	571,7	508,7		455,8
800	975,3	641,2	571,9	509		456,2
1000	976	642,1	572,3	509,2		456,4
1200	976,6	642,9	572,8	509,5		456,6
1400	977,1	643,7	573,3	509,7		456,8
1600	977,5	644,4	573,8	509,8		456,9
1800	977,8	644,8	574,2	510		457
2000	978	645,2	574,6	510,2		457,1
2200	978,2	645,6	575,1	510,4		457,1

При увеличении расхода турбин мощность растёт не пропорционально, так как одновременно возрастает уровень нижнего бьефа, снижая напор. Это отражается в экономических расчётах и оптимизации режима.

Коэффициент полезного действия гидроагрегата η_i или $\eta_{ГА}$, зависимость от КПД турбины и КПД генератора:

$$\eta_{ГА} = \eta_{тур} \cdot \eta_{ген}, \quad (4.5)$$

где $\eta_{ген}$ – для каждой ГЭС задаётся в паспортных данных гидрогенератора,

$\eta_{тур}$ – варьируется в зависимости от напора, расхода и мощности агрегата и его можно определить по эксплуатационной характеристике гидротурбины, которая является основными исходными данными выдаваемая заводом изготовителя для гидроагрегата.

КПД гидроагрегата можно определить по формуле:

$$\eta_{ГА} = \eta_{тур} \cdot \eta_{ген} \approx 0,9 \cdot 0,95 = 0,85.$$

Уравнения ограничений для каждой ГЭС:

По уровням водохранилища

Для водохранилища каждой ГЭС задается максимальное и минимальное значение уровня верхнего бьефа.

$$Z_i^{BB, \min} \leq Z_{i,t}^{BB} \leq Z_i^{BB, \max}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (4.6)$$

где $Z_{i,t}^{BB}$ – уровень верхнего бьефа водохранилища i -ой ГЭС в момент времени t ;

Эквивалентно через объём водохранилища:

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max}, \quad (4.7)$$

$$Z_{i,t}^{BB} = f_i^{-1}(V_{i,t}),$$

где $V_{i,t}$ – объём i -го водохранилища в момент времени t .

Зависимость между уровнем верхнего бьефа водохранилища от ее объёма, которую также называют характеристикой верхнего бьефа ГЭС,

определяемая на основе топографических и батиметрических данных местности имеет вид:

$$V_{i,t} = f_i^{ZV}(Z_{i,t}^{BB}) \leftrightarrow Z_{i,t}^{BB} = f_i^{-1}(V_{i,t}). \quad (4.8)$$

Такая зависимость необходима при водноэнергетических расчетах и при моделировании режимов работы ГЭС, также она важна при оценке изменении объёма водохранилища при изменении уровня верхнего бьефа $Z_{i,t}^{BB}$. Характеристика верхнего бьефа водохранилища Нурекской ГЭС представлена на рисунке 4.2.

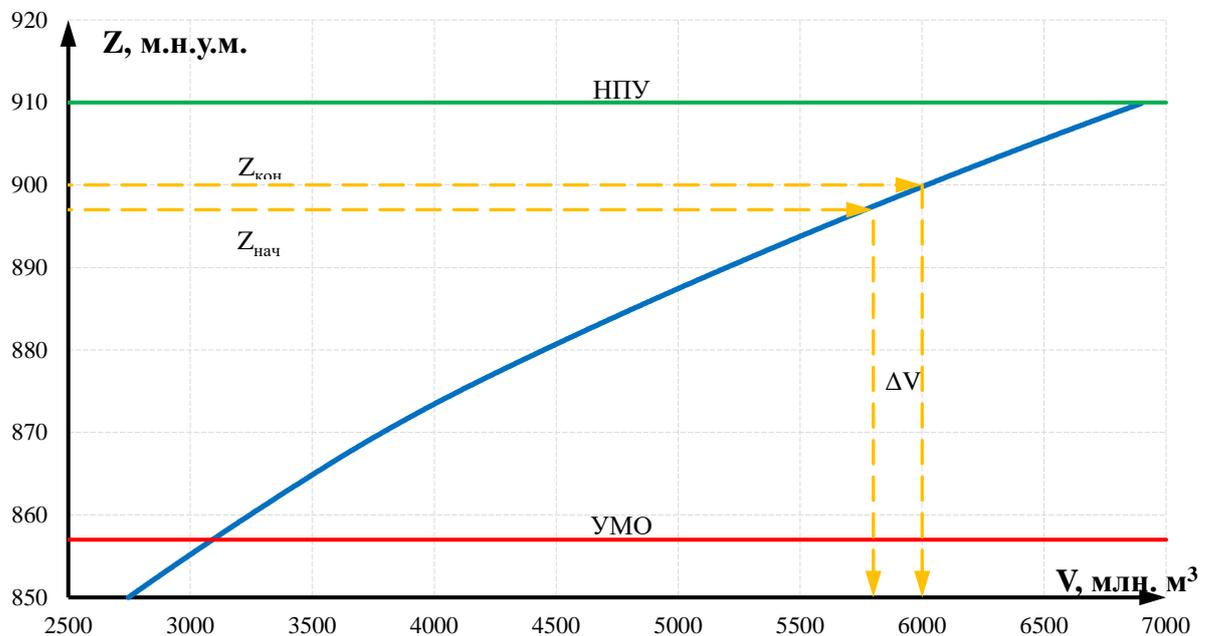


Рисунок 4.2 – Характеристика верхнего бьефа водохранилища Нурекской ГЭС

При наличии достаточно длительной гидрологической статистики эксплуатационные кривые позволяют эффективно определять режимы работы для любого внутригодового или внутримесячного периода при заданном общем притоке воды и уровне верхнего бьефа. Эти кривые могут быть использованы в имитационных моделях для различных исследований.

По мощности каждой ГЭС

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max}. \quad (4.9)$$

Для каждой ГЭС каскада определяются активная мощность, которая учитывает техническую возможность загрузки каждого гидроагрегата и ГЭС в целом. Например, если генератор по технической причине (повышенной вибрации) не может работать на номинальную мощность и тд. Или имеет зону ограничения по минимальной мощности – зона повышенной вибрации [9-А], определяемая по эксплуатационной характеристики каждой турбины).

По расходу воды для каждой ГЭС

Для каждой ГЭС каскада имеются ограничения по расходам через турбину, холостые сбросы и для всего ГЭС.

$$Q_i^{тур, \min} \leq Q_{i,t}^{тур} \leq Q_i^{тур, \max}, \quad 0 \leq Q_{i,t}^{холост.} \leq Q_i^{холост., \max}, \quad (4.10)$$

$$Q_{i,t}^{\min. \text{обяз.}} \leq Q_{i,t}^{ГЭС} \leq Q_{i,t}^{\text{сумм.}, \max}. \quad (4.11)$$

Уравнение баланса воды:

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + 3600 \cdot (Q_{i,t}^{np} - Q_{i,t}^{ГЭС}) \Delta t, \quad (4.12)$$

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i,t}^{тур.} + Q_{i,t}^{холост.}, \quad (4.13)$$

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} \pm Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i}, \quad (4.14)$$

где:

$$Q_{i-1,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} \text{ – приток воды предыдущей ГЭС;}$$

$$Q_{i,t}^{водох.} \text{ – расход воды с водохранилища «+» – когда водохранилище}$$

срабатывается; «-» – когда водохранилище заполняется;

$$Q_{i,t}^{водох.} = 0 \text{ – при работе на транзитном стоке.}$$

$$Q_{i,t}^{водох.} \text{ – значение расхода воды с водохранилища } i\text{-той ГЭС}$$

определяется по сработанному или накопленному объёму воды в водохранилища $\pm \Delta V_i$:

$$Q_{i,t}^{водох.} = \frac{\pm \Delta V_i}{\Delta t}; \quad \left[\frac{м^3}{с} \right] \quad (4.15)$$

«+» – когда водохранилище срабатывается $Z_{i,нач.}^{BB} > Z_{i,кон.}^{BB}$;

«-» – когда водохранилище заполняется $Z_{i,нач.}^{BB} < Z_{i,кон.}^{BB}$.

ΔV_i в зависимости от $Z_{i,нач.}^{BB}$ и $Z_{i,кон.}^{BB}$ определяется графическим или методом Кусочно-линейной аппроксимации по кривой зависимости уровня верхнего бьефа водохранилища от объёма $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{BB})$ (рисунок 4.5).

$\Delta Q_{i-1,i}$ – водозаборы, боковые притоки и др. водохранилища i -той и $i - 1$ ГЭС.

$$\Delta Q_{i-1,i} = Q_{i,t}^{бок.пр} - Q_{i,t}^{водоз.} - \Delta Q_i^{испар.} - \Delta Q_i^{фил.} + Q_i^{осад.} - \Delta Q_i^{лед.} \quad (4.16)$$

здесь,

$Q_{i,t}^{бок.пр}$ – боковые притоки воды в водохранилище i -той ГЭС;

$Q_{i,t}^{водоз.}$ – расход на водозабор (орошение);

$\Delta Q_i^{испар.}$ – потери воды из водохранилища на испарение;

$\Delta Q_i^{филт.}$ – фильтрационные потери;

$Q_i^{осадки}$ – поступления от осадков;

$\Delta Q_i^{лед.}$ – потери на льдообразование.

Потери воды из водохранилища, которые обусловлены испарением воды из водной поверхности, фильтрации воды через ГТС, льдообразование и др., является важным показателем, влияющий на эффективную работу ГЭС в энергетических системах. Эти потери делятся на постоянный и переменный (сезонный), и они должны учитываться при назначении оптимальных режимов работы водохранилищ, при составлении диспетчерских графиков, при моделировании режимов, особенно в условиях неопределённости речного стока.

Фильтрационные потери из водохранилища. Фильтрационные потери представляют собой один из значимых факторов утечки воды из водохранилищ, зависящий от геологических характеристик ложа, конфигурации акватории и уровня верхнего бьефа. Количественно они описываются приближёнными методами, поскольку даже при наличии гидрогеологических данных точное определение утечек затруднительно. Потеря воды на фильтрацию определяется по формуле:

$$Q_{\phi} = \frac{h_{\phi} F_{\phi}}{t_{\phi}}, \quad (4.17)$$

где, h_{ϕ} – слой фильтрации; F_{ϕ} – площадь фильтрационного потока, равная площади зеркала водохранилища при отметке НПУ; t_{ϕ} – продолжительность периода фильтрации, обычно равная длительности года.

С течением времени водохранилище заиливается, что снижает интенсивность фильтрации. Для ориентировочных расчётов принимается, что годовые потери сквозь ложе и обходные пути составляют слой воды толщиной 0,35–0,75 м при среднем уровне наполнения. Дополнительные утечки возникают через тело плотины, её сопряжения с берегами, затворы и неработающие турбины. Несмотря на сложность точной оценки, эксплуатационные наблюдения позволяют использовать эмпирические данные для приблизительных оценок этих потерь.

Потери воды на фильтрацию из водохранилищ приняты постоянными в течение года для всех лет расчетного ряда и равными: для Рогунского, Нурекского и Головного гидроузлов – 1 м³/с, для Байпазинского – 3 м³/с и Сангтудинского №1 – 2 м³/с.

Испарение с поверхности водохранилища. Одним из ключевых источников потерь воды в водохранилищах являются потери на испарение, особенно значительные в южных регионах с высокой солнечной радиацией и температурой воздуха. Испарение происходит круглогодично, в том числе зимой, хотя в холодный период его объем незначителен и может быть

пренебрежим. Расчёты базируются на эмпирических формулах и региональных нормах: например, в среднем течении Волги испарение летом составляет около 100 мм/мес., а в южных районах может достигать 300 мм/мес. Фактические значения нередко превышают нормативы на 10–200 %, а совокупные потери на испарение могут достигать 5–7 % объёма наполнения водохранилища.

Максимальные потери воды на испарение с поверхности Рогунского водохранилища при заполнении до НПУ = 1290м оцениваются на уровне 0,14 км³ в год, а для Нурекского водохранилища оценивается в 0,12 км³ в год [135]. Годовой объём испарения согласно [99] составляет 52,3 млн м³ (гм³) для Нурекского водохранилища, что эквивалентно постоянной потере расхода 1,6 м³/с, и 144 млн м³ для Рогунского водохранилища при НПУ 1290 м, что соответствует 4,6 м³/с.

Слой потерь воды на дополнительное испарение с поверхности Рогунского, Нурекского, Байпазинского, Сангтудинского № 1 и Головного водохранилищ, принятый одинаковым для всех лет расчетного ряда, представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Потерь воды на испарение

Месяц	Слой потерь воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилища, мм	
	Рогунское, Нурекское и Байпазинское	Сангтудинское №1,2 и Головное
IV	25	60
V	39	80
VI	73	115
VII	105	150
VIII	138	137
IX	128	111
X	89	87
XI	91	51
XII	54	33
I	43	13
II	0	22
III	20	45
Год	805	904

Ограничение по скорости изменения (интенсивности) уровня верхнего бьефа:

$$\left| Z_{i,t+1}^{BB} - Z_{i,t}^{BB} \right| \leq \Delta Z^{BB \max}. \quad (4.18)$$

Согласно правилам использования водных ресурсов Нурекского водохранилища, на реке Вахш, допустимая интенсивность сработки и наполнения водохранилища в нормальных условиях эксплуатации должна быть не более 0,5 м в сутки в отметках 910 - 900 м и не более 1,0 м в сутки ниже отметки 900 м. В чрезвычайных условиях скорость сработки водохранилища устанавливается специально созданной комиссией.

Расходы воды на ирригацию

Большой объем воды отводится из реки Вахш для орошения земель через Дангаринский и Яванский тоннели. Согласно [136, 137] отвод на ирригацию на участке реки между Головной ГЭС и Перепадной ГЭС оценивается в 65 %, а на участке реки между Перепадной ГЭС и Центральной ГЭС - в 40% от остатка (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Водозаборы и возвратные воды реки Вахш (м³/с)

Участок	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Янв	Фев	Мар
Рогун-Нурек	25	40	60	75	55	30	20	10	5	5	5	10
Нурек-Байпаза	20	35	45	45	45	35	20	10	5	3	8	15
Байпаза-Сангтуда 1	2	3	4	5	1,5	1	0,8	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
Сангтуда 1 - Сангтуда 2	0,3	0,5	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0
Сангтуда 2 - Головная	5,5	9	11	12,3	9,7	8,4	5,5	2,8	0,7	0,6	0,6	3,1
Головная - Слияние	170	220	230	240	230	180	150	150	120	110	115	120
Головная - Перепадная	110,5	143	149	156	149,5	117	97,5	97,5	78	71,5	74,8	78
Перепадная - Центральная	23,8	30,8	32,2	32,6	32,2	25,2	21	21	16,8	15,4	16,1	16,8
Обратный поток	109,1	129,4	129,4	134,5	132,8	110,4	89,5	79,9	77,4	82	72,7	75,7

Также имеется другие ирригационные системы, но их расход не превышает 1 м³/с.

Время добегания наводочной волны:

- от Нурекского гидроузла до Головной ГЭС – 0,5 суток;

– от Нурекского гидроузла до устья р. Вахш – 1 сутки.

Режимы ГЭС каскада на реке Вахш

Каждая (*i*-й) ГЭС работающее в каскаде реки Вахш работает в следующем режимах. В зависимости от притока воды в водохранилища могут работать в трех режимах.

1. *Режим сработки водохранилища* – когда дополнительно к притоку воды в водохранилища из водохранилища расходуется вода $Q_{i,t}^{водох.}$, то есть идет сработка водохранилища $Z_{i,нач.}^{ВБ} \succ Z_{i,кон.}^{ВБ}$, в этом случае формула (4.15) будет иметь вид:

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} + Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i}.$$

2. *Режим заполнения водохранилища* – когда часть притока воды идет на заполнение водохранилища, $Z_{i,нач.}^{ВБ} \prec Z_{i,кон.}^{ВБ}$, при этом (4.15):

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} - Q_{i,t}^{водох.} + \Delta Q_{i-1,i}.$$

3. *Транзитный режим* – когда расход воды из водохранилища приравнивается к притоку воды в водохранилище. В том режиме уровень верхнего бьефа остается постоянным, $Z_{i,нач.}^{ВБ} = Z_{i,кон.}^{ВБ}$. Этот режим имеет наибольший эффект, когда уровень верхнего бьефа равен НПУ, так как при этом ГЭС имеет максимальный напор, и соответственно получает максимальную мощность.

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС} + \Delta Q_{i-1,i}.$$

Графически возможные режимы водохранилищ каждой ГЭС имеет вид, как показана на рисунке 4.3.

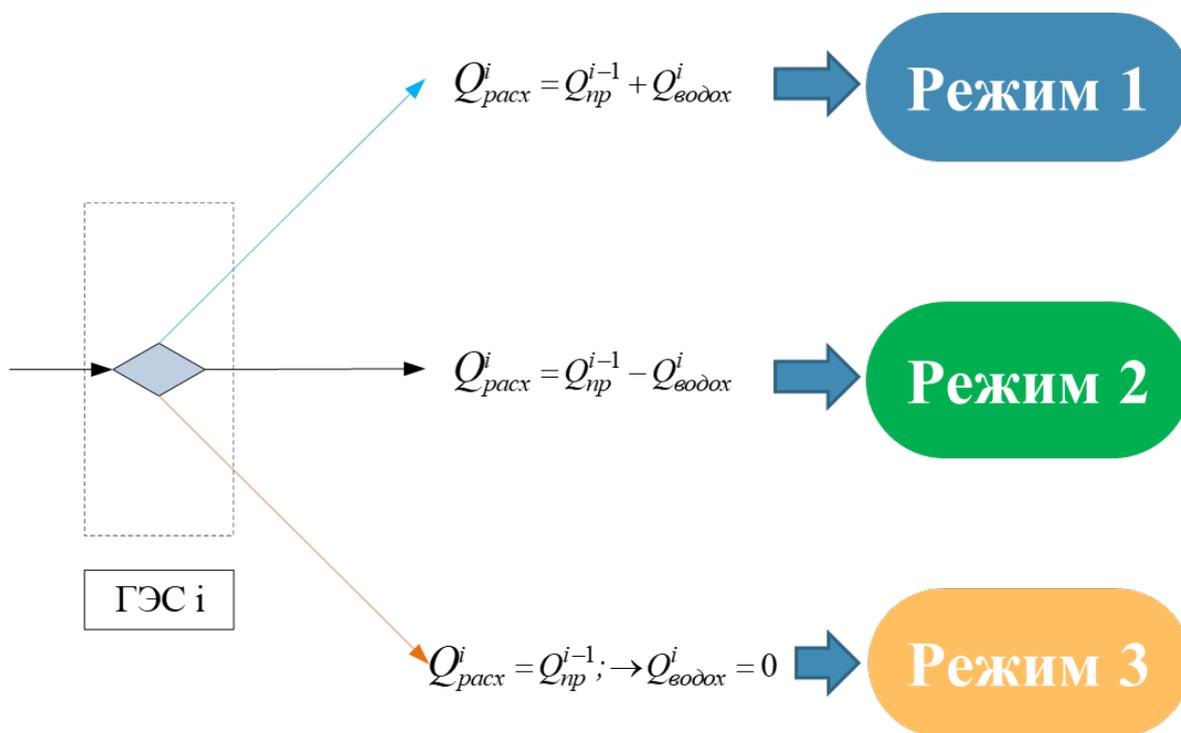


Рисунок 4.3 – Возможные режимы водохранилищ ГЭС

Каскад ГЭС расположенные на реке Вахш (рисунок 4.1) при оптимизации по предложенной математической модели и режимов водохранилищ (рисунок 4.3) будут работать в следующих возможных режимах: Допустим ГЭС 1 на рисунке 4.4 – Рогунская ГЭС, будет работать по заданному по графику сработки и заполнения водохранилища, то есть, по разработанному диспетчерскому графику и расходует количество воды равным $Q_{1,t}^{ГЭС} = Q_{1,t}^{рас.}$.

Этот расход воды с учётом водозаборов (таблица 4.3) и других расходов воды $\Delta Q_{i-1,i}$ (4.16), попадает в водохранилище ГЭС 2 – Нурекской ГЭС. На Нурекской ГЭС, водохранилище имеет годовое регулирование стока, и она может работать в возможных трех режимах, которые приведены на рисунке 4.4, то есть водохранилище ГЭС-2 может дополнительно к притоку сработать собственное водохранилища, заполнять ее используя часть притока или же расходовать объём воды равный к притоку – работать в транзитном режиме (рисунок 4.5). При этом должны соблюдаться все условия приведенные (4.6 – 4.18).

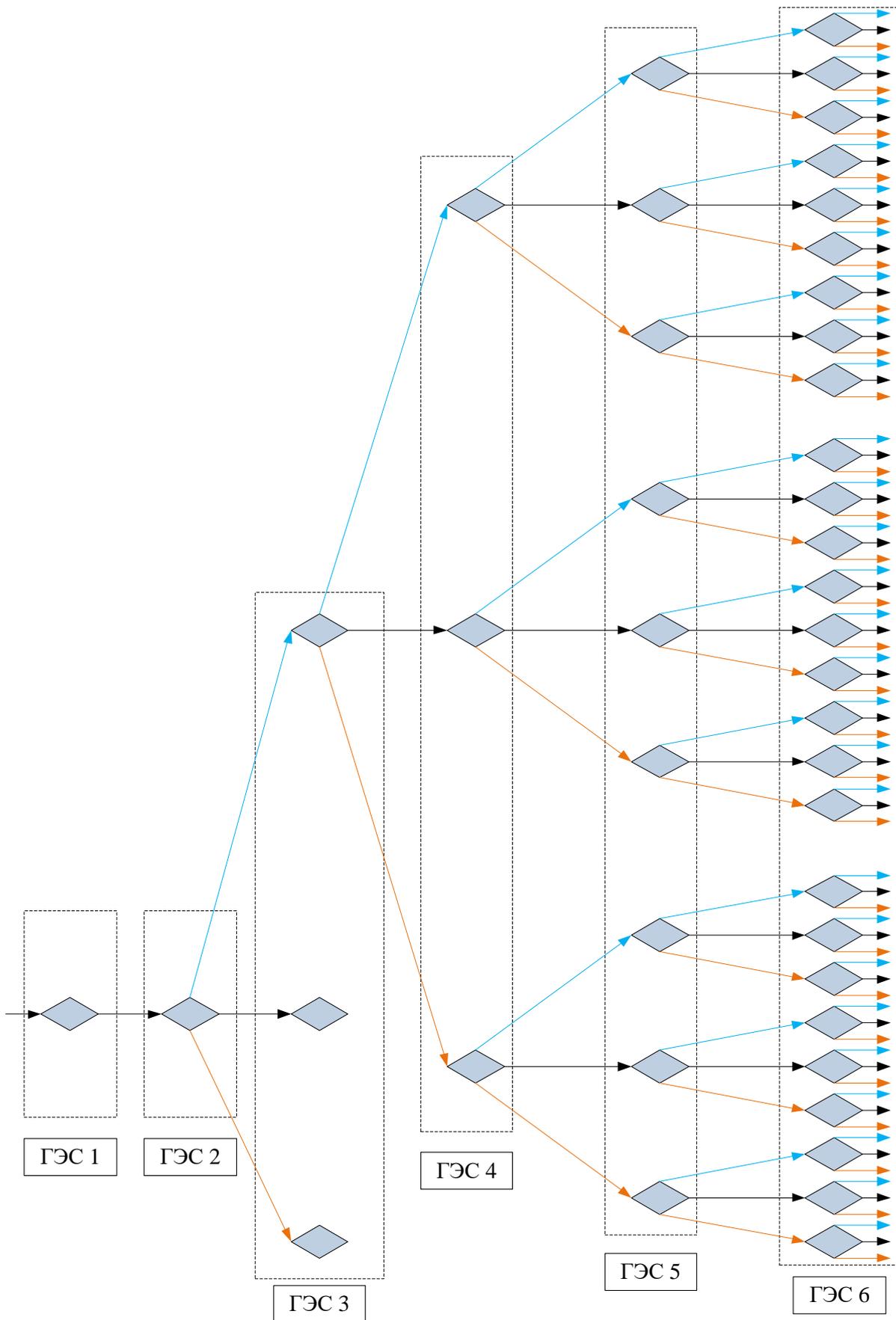


Рисунок 4.5 – Модель режимов ГЭС каскада реки Вахш

Далее по каскаду расход воды из ГЭС -2 попадает в водохранилище ГЭС 3 – Байпазинской ГЭС. Каждому из возможных трех режимов ГЭС - 2, соответствует 3 режима ГЭС -3, то есть, трем режимам ГЭС-2 будет иметь место 9 режимов ГЭС 3. Аналогично далее по каскаду, расходы воды поступают на ГЭС 4, то есть на Сангтудинскую-1, на ГЭС 5 – Сангтудинскую-2 и на ГЭС 6 – Головную ГЭС соответственно, и каждая из них имеет возможность работать в трех режимах, как это показана на рисунке 4.5.

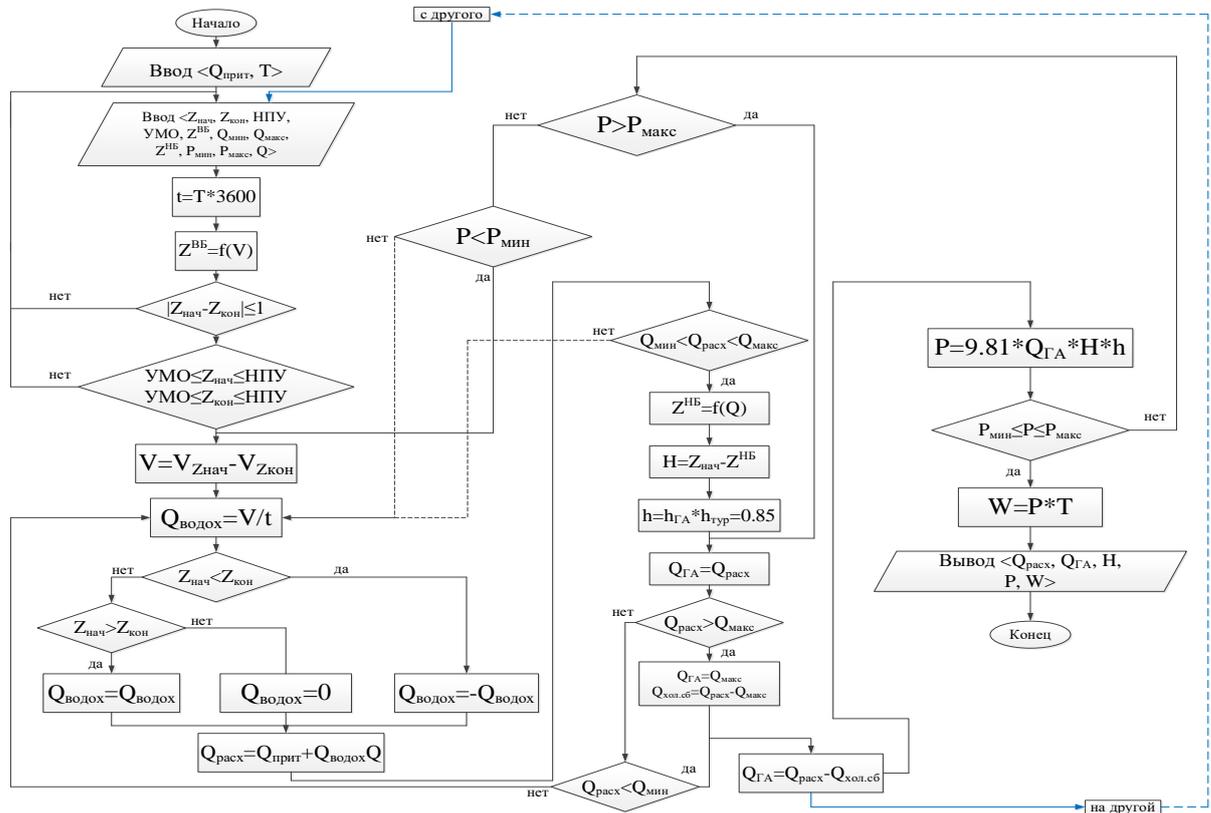
Следовательно, при расходе воды на ГЭС-1, то есть на Рогунской ГЭС равной $Q_{1,t}^{ГЭС} = Q_{1,t}^{рас.}$, ГЭС – 2, то есть Нурекская ГЭС имеет возможность работать в 3 режимах; и в зависимости от этих 3 режимах ГЭС-2, ГЭС -3 – Байпазинская ГЭС может работать в 9 режимах; далее с такой последовательностью ГЭС-4 – Сангтудинская ГЭС-1 будет работать в возможных 27, ГЭС – 5 в 81 и ГЭС 6 в 243 режимах соответственно (рисунок 4.5).

Учёт трех возможных режимов каждого водохранилища, что для каскада из 6 ГЭС порождает 243 теоретически возможных комбинаций режимов. При этом при работе в каждом режиме на каждой ГЭС каскада должны соблюдаться все условия и ограничения, приведенные в (4.6) – (4.18).

ГЭС, работающие в каскаде, могут иметь различные возможности регулирования стока, то есть водохранилища различного назначения, также имеют сложную связь, в том числе по расходу, напору, мощности и выработке электроэнергии и определенные эксплуатационные и технические ограничения. Для оптимизации режимов работы ГЭС каскада Вахш, по предлагаемой модели управления необходима разработать алгоритм для оптимального краткосрочного управления режимами, которая позволяет учитывать все приведенные выше ограничения и другие эксплуатационные параметры ГЭС каскада [б-А].

4.2. Разработка алгоритма для оптимального управления режимами ГЭС Вахшского каскада с учетом Рогунской ГЭС

Для краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС, работающих в каскаде реки Вахш автором, был разработан алгоритм, который учитывает все ограничения, и который подробно представлен на рисунке 4.6.



**Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритма оптимального управления
Вахшских ГЭС с учетом Рогунской ГЭС**

Расчет начинается с притока воды на водохранилище i -й ГЭС, для начала для Рогунской ГЭС и периода расчета – оптимизации (часы, сутки), далее для каждой ГЭС задаются: значения максимальной и минимальной мощности; уровни верхнего бьефа - максимальное и минимальное; максимальный и минимальный расход воды; также НПУ и УМО. Далее используя $Z_{i,нач}^{ВБ}$ и $Z_{i,кон}^{ВБ}$ по кривой зависимости уровня верхнего бьефа от объёма (рисунок 4.5) $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{ВБ})$ определяется объём воды расходуемое из водохранилища (или накопленный) $\pm \Delta V_i$. Далее определяется расход воды

из водохранилища $Q_{i,t}^{водох.}$ по (4.15). Здесь и в зависимости от заданной $Z_{i,нач}^{BB}$ и $Z_{i,кон}^{BB}$ определяется что в каком из режимах (рисунок 4.4) работает данная ГЭС. В зависимости от расхода воды на нижний бьеф по кривой нижнего бьефа (рисунок 4.3) $Z^{НБ} = f(Q)$ определяется уровень нижнего бьефа. По значениям уровней верхнего и нижнего бьефов по (4.4) определяется напор $H_{i,t}$. Далее определяется коэффициент полезного действия гидроагрегата η_i , мощность ГЭС P и выработка электроэнергии W по (4.2, 4.3, и 4.5).

Таким образом, вода поступает на водохранилище следующей ГЭС и алгоритм расчета для неё будет аналогичной [6-А].

4.3. Программный комплекс для оптимизации краткосрочных режимов работы ГЭС Вахшского каскада

Для краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС, работающих в каскаде Вахш, на основе предложенной математической модели и алгоритма для оптимального управления, авторами разработано программное обеспечение для ЭВМ: «Оптимизация режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада» и получено свидетельство (RU2025618934) [22-А], и база данных «Оптимизация водно-энергетических режимов ГЭС Вахшского каскада методом линейного программирования» свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №1202400529 [21-А]. Программа выполняет оптимизационные расчёты на основе метода линейного программирования, которая для каждой ГЭС учитывает все ограничения, в том числе по расходу, уровням, мощности и др. Программа позволяет поэтапно распределить стока реки между ГЭС в краткосрочном временном разрезе, по критерию максимальной выработки электроэнергии, при котором учитываются все ограничения.

Для оптимизации режимов работы ГЭС, работающих в каскаде реки Вахш в краткосрочном временном разрезе автором, был разработан алгоритм,

который представлен на рисунке 4.6. Далее на рисунках 4.7–4.10 приведены скриншоты экранов разработанной программы реализованный на основе алгоритма 4.6. Программа имеет вид представленное на рисунках 4.7-4.10.

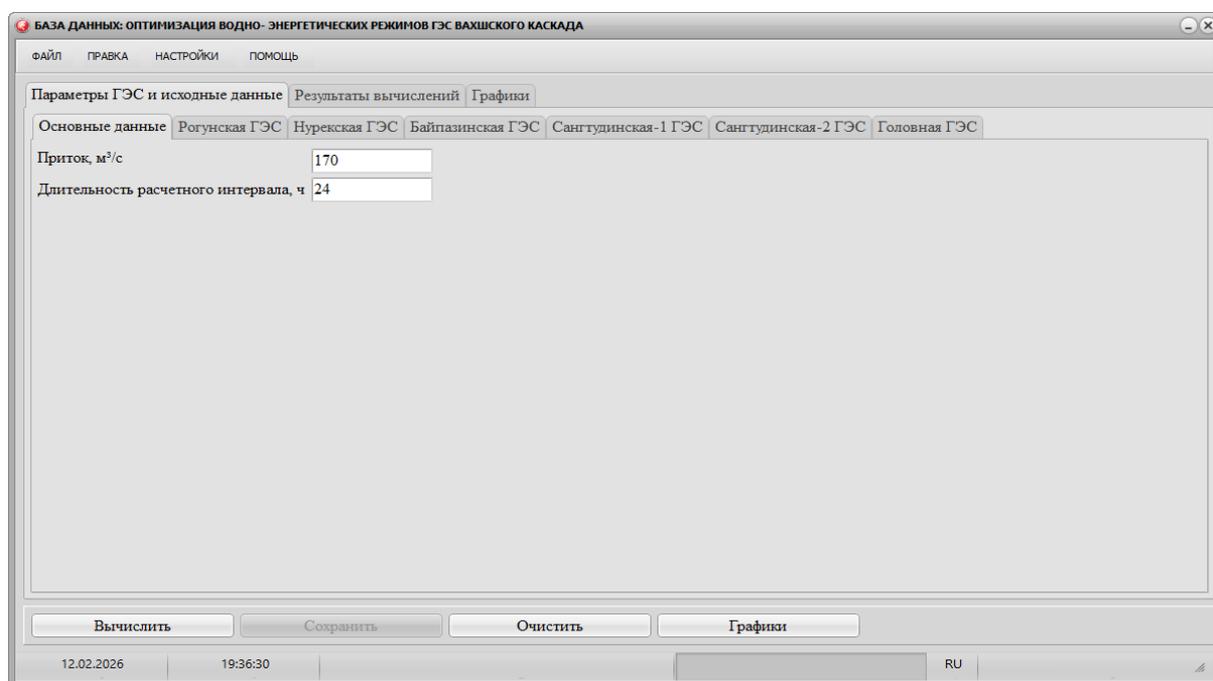


Рисунок 4.7 – Вкладка программы «Параметры ГЭС и исходные данные»

Интерфейс программы имеет следующие вкладки: *«Параметры ГЭС и исходные данные»* где, необходимо вводить *«Основные данные»*, то есть приток воды к водохранилище первой Рогунской ГЭС, и длительность оптимизационного периода (рисунок 4.7). Также в этой вкладке вводятся параметры по каждой ГЭС Вахшского каскада, в том числе значения максимальной и минимальной мощности; уровни верхнего бьефа; максимальный и минимальный расход воды; шаг сработки водохранилища и др. (рисисунок 4.8).

В Вкладке *«Результаты вычислений»*, отражаются результаты оптимизационных расчетов параметров по каждой ГЭС, включая: объем воды, расходуемой из водохранилища, расчетный напор, расходы через турбины, холостые сброс, мощность, выработка электроэнергии и др. (рисунок 4.9).

На рисунке 4.11 приведено окно программы, в котором результаты вычислений показываются в табличном виде. При этом основные результаты

показываются в отдельных полях. На рисунке 4.12 приведено окно программы, в котором результаты вычислений демонстрируются в виде отдельных графиков и гистограммы. Стоит подчеркнуть, что показ отдельных графиков и гистограмм осуществляются путем выбора определенного параметра для нужного выбранного пользователем ГЭС.

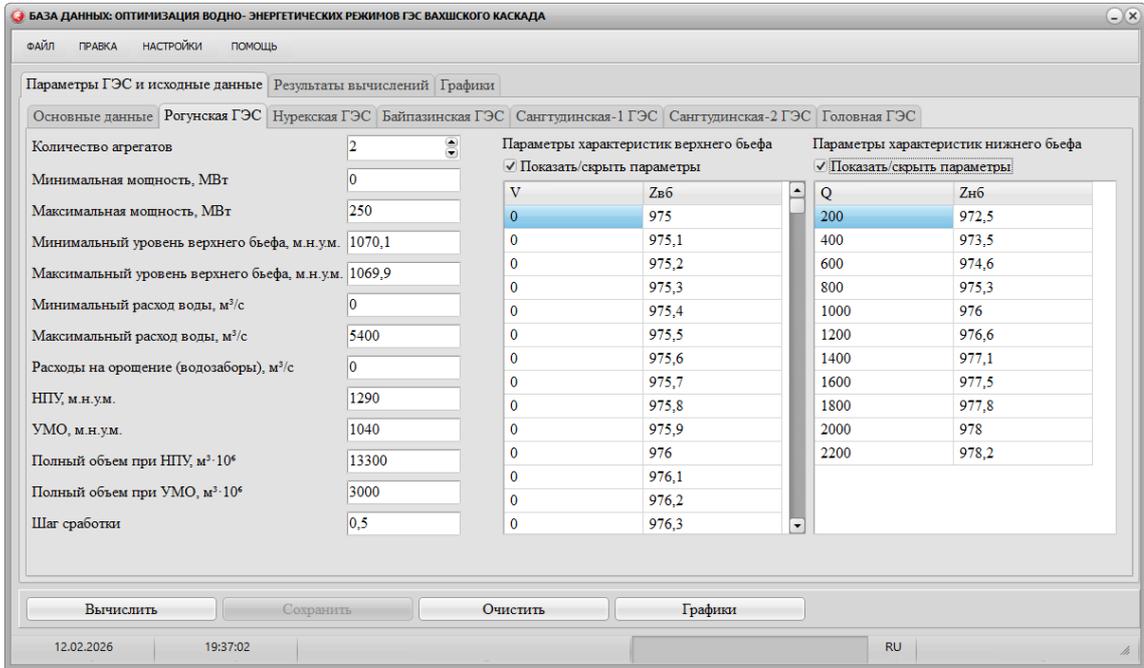


Рисунок 4.8 – Вкладка программы «Параметры ГЭС и исходные данные»

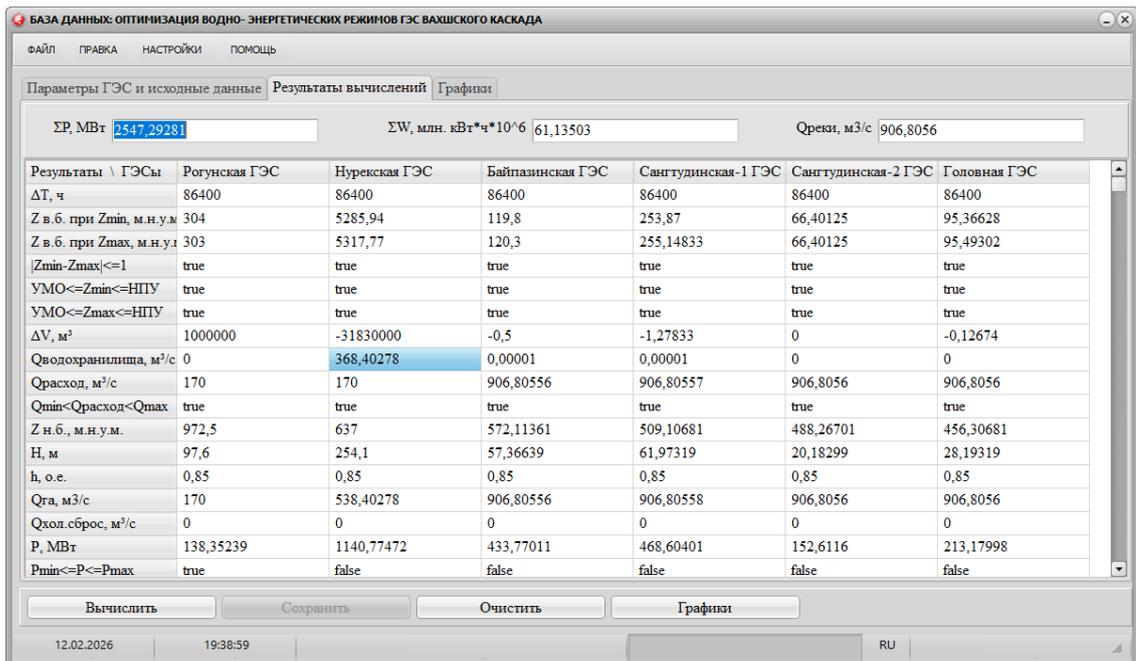


Рисунок 4.9 – Вкладка программы «Результаты вычислений»

В вкладке «*Графики*», можно получить графические результаты, по мощности, расходам и уровням для каждой ГЭС, которые будут показаны в различных цветовых оттенках.

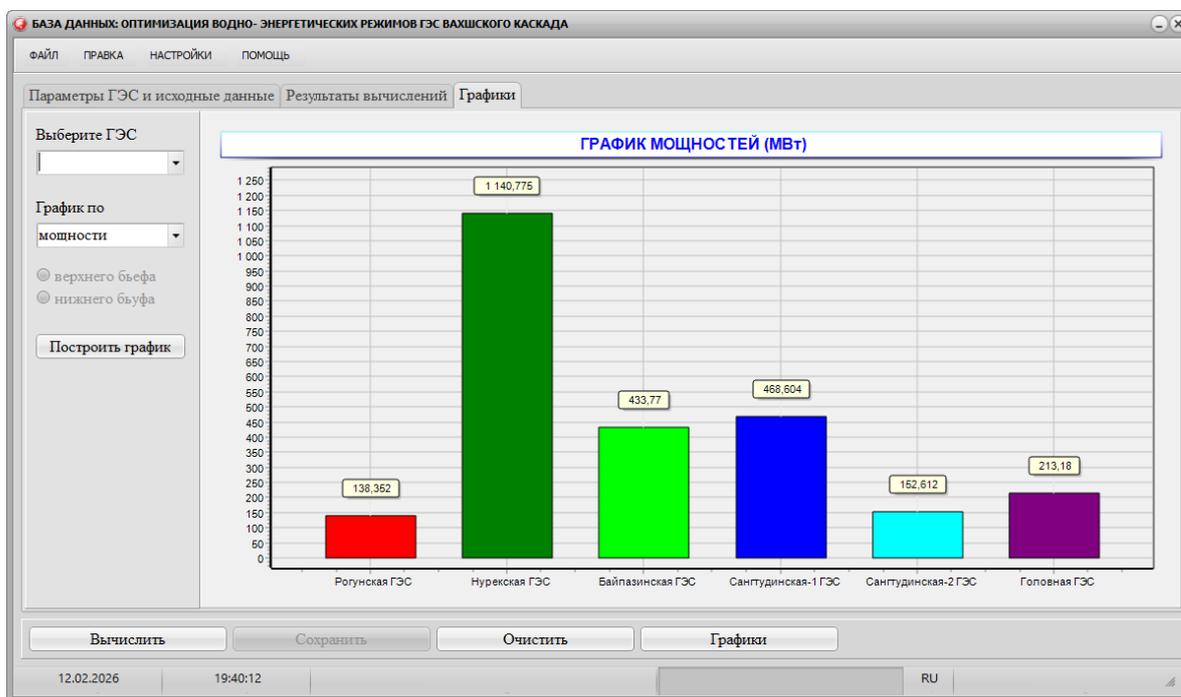


Рисунок 4.10 – Вкладка программы «Графики»

Полученные результаты при оптимальной суточной работе ГЭС каскада реки Вахш приведены на рисунках 4.11 и 4.12.

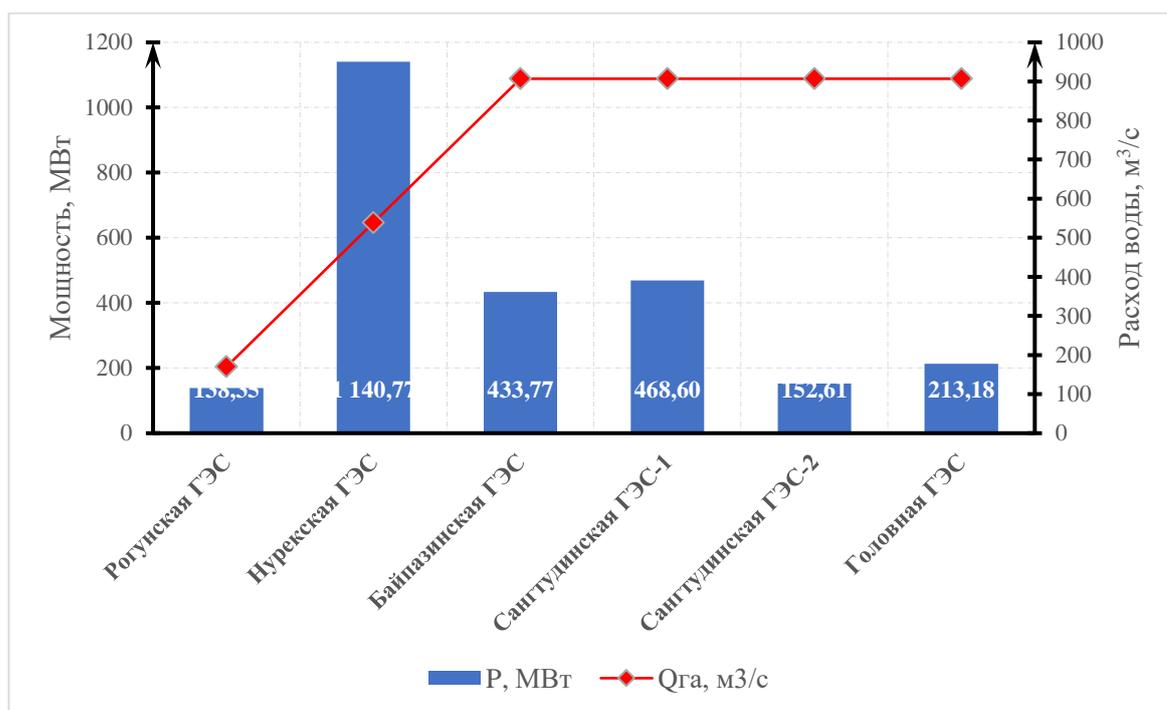


Рисунок 4.11 – Суточная мощность и расход воды ГЭС каскада Вахш

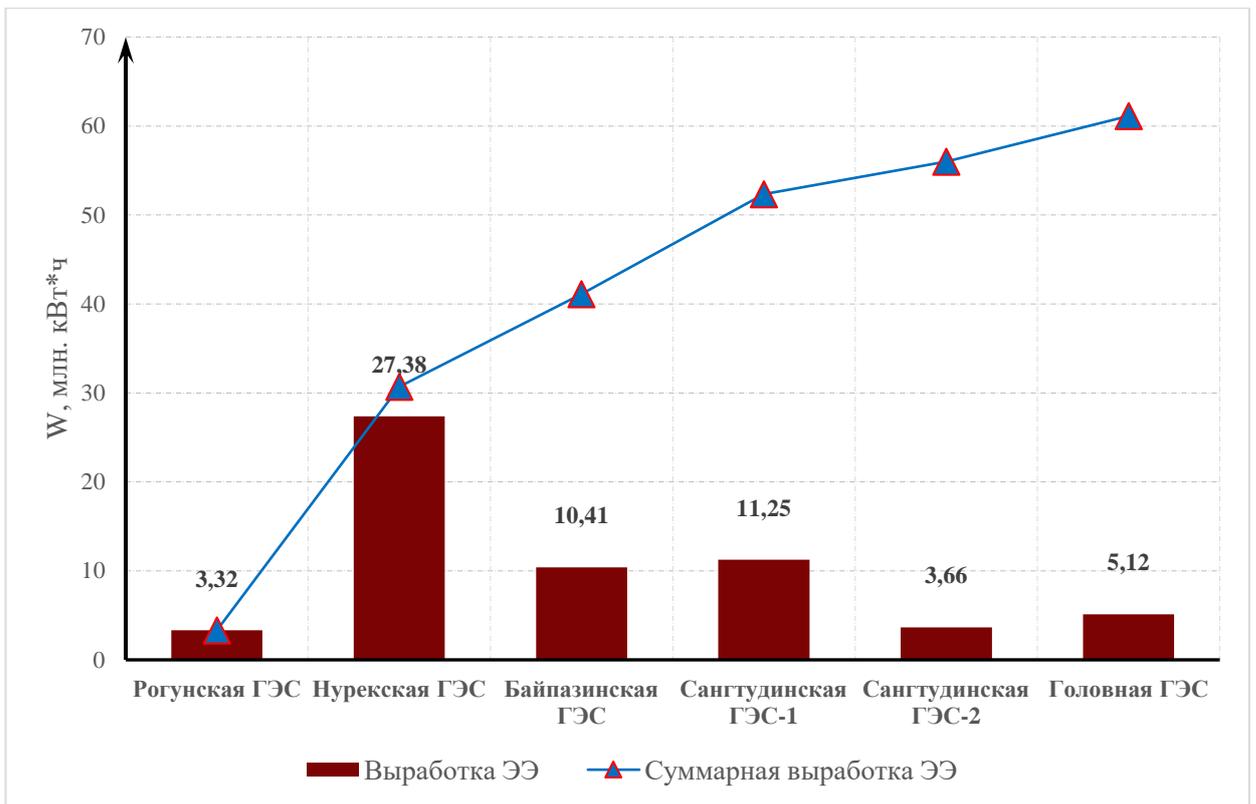


Рисунок 4.12 – Выработка электроэнергии и суммарная выработка ГЭС каскада

4.4. Выводы по четвертой главе

В данной главе диссертационного исследования были разработаны математическая модель и алгоритм для оптимального краткосрочного управления режимами ГЭС Вахшского каскада. На основе предложенной модели и алгоритма на языке программирования Delphi был разработан программный комплекс, который осуществляет оптимизационные расчеты методом линейного программирования в краткосрочном периоде, по критерию максимума выработки электроэнергии с учетом гидравлических, технических, эксплуатационных и энергетических ограничений.

Разработанные автором в данной главе подходы, позволяют оптимизировать режимы работы ГЭС, работающих в каскаде реки Вахш в краткосрочном периоде, что даёт возможность повысить эффективность функционирования этих ГЭС в каскаде и в энергетической системе в целом [6-А, 21-А, 22-А].

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В диссертационной работе решена актуальная задача, направленное на оптимальное управление режимами работы ГЭС Вахшского каскада с вводом Рогунской ГЭС. По выполненной исследовательской работе сделаны следующие общие выводы и научно обоснованные рекомендации по практическому использованию полученных результатов:

Выводы

1. Обзор и анализ методов оптимизации в области энергетики и их классификация показывает, что для решения задач детерминированного характера с ограниченным числом переменных лучше применять классические методы, при решении многомерных нелинейных задач хорошо подойдут методы на основе метаэвристических алгоритмов, а при решении оптимизационных задач с большим массивом исходных данных лучше применять алгоритмы на основе машинного обучения [7-А, 13-А, 17-А].

2. Анализ режимов работы ГЭС Вахшского каскада, в том числе после ввода в эксплуатацию двух агрегатов Рогунской ГЭС на временных агрегатах, показывает, что каскадом вырабатывается около 89% электроэнергии в стране из них 8% приходится на долю Рогунской ГЭС. Ввод Рогунской ГЭС с водохранилищем многолетнего регулирования стока реки, на полную мощность, позволит повысить эффективность функционирования каскада ГЭС на реке Вахш. Оптимальное управление долгосрочными режимами позволяет увеличить выработку электроэнергии в стране [1-А, 4-А, 14-А, 18-А].

3. Разработанный на основе моделей машинного обучения, модель и программный комплекс для прогнозирования стока реки Вахш в долгосрочном периоде, позволяет назначить оптимальные режимы сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном периоде и повысить эффективность работы Рогунской ГЭС и всего каскада [10-А, 17-А, 19-А, 20-А].

4. Разработанные диспетчерские графики для Рогунской ГЭС дают возможность определить оптимальные режимы сработки и заполнения водохранилища с учетом её эксплуатационных особенностей [4-А, 5-А, 17-А].

5. Предложенные математическая модель и алгоритм для краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС каскада реки Вахш позволяют учитывать гидрологические, эксплуатационные и технические ограничения [1-А, 6-А, 21-А, 22-А].

6. Разработанная на основе предложенных математической модели и алгоритма, программа для ЭВМ позволяет оптимизировать режимы работы каждой ГЭС каскада в краткосрочном периоде методом линейного программирования [6-А, 21-А, 22-А].

7. Комплексная реализация многоуровневого управления (прогнозирование стока реки – долгосрочная оптимизация – краткосрочная оптимизация) на основе разработанных математических моделей, алгоритмов и программных обеспечений, способствуют эффективному управлению режимами ГЭС Вахшского каскада с вводом Рогунской ГЭС [1-А, 6-А, 7-А, 13-А, 19-А, 20-А, 21-А, 22-А].

Рекомендации по практическому использованию

Полученные в ходе исследования методики и разработанный программный комплекс на основе машинного обучения [20-А], предназначенные для прогнозирования стока реки Вахш в долгосрочном режиме могут быть использованы при планировании оптимальных режимов Рогунской ГЭС и всего каскада.

Разработанные диспетчерские графики [5-А] для оптимального управления долгосрочными режимами Рогунской ГЭС, можно использовать в качестве нормативно-методической базы для долгосрочного управления режимами водохранилища многолетнего регулирования, которая обеспечивает согласованную и энергетически эффективную работу Рогунской ГЭС с нижележащими ГЭС каскада. Также они позволяют обеспечить

гарантированную мощность в расчетном маловодном году и могут быть использованы в ОАО «Рогунская ГЭС».

Полученные результаты по краткосрочной оптимизации – разработанные математические модели и программные обеспечения [20-А], [21-А], [22-А] могут быть использованы в ОАО «Барки Точик» при оптимальном управлении энергетическими режимами ГЭС каскада Вахш, для оптимального распределения водных ресурсов между ГЭС, увеличения суточной выработки электроэнергии каскада, а также при дальнейшем развитии гидроэнергетической системы Таджикистана.

Разработанные в результате проведенного исследования математические модели и алгоритмы внедрены в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и используются при выполнении научных работ магистрантов и докторантов PhD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список использованной литературы

- 1 Renewables 2025. Analysis and forecasts to 2030 // International Energy Agency (IEA). – Режим доступа: <https://www.iea.org>. – <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf>.
- 2 International Hydropower Association (ИНА). 2024 World Hydropower Outlook. – Режим доступа: <https://www.hydropower.org/>. – 2024.
- 3 The International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2025. – Режим доступа: <https://www.irena.org/Data>.
- 4 Аналитический центр Ember. – Режим доступа: <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>. – Дата обращения: 01.05.2025.
- 5 Абдуллаева Ф. С., Баканин Г. В., Гордон С. М. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР. – Л.: Изд-во «Недра», 1965. – 658 с.
- 6 Министерство энергетики и водных ресурсов Таджикистана. – Режим доступа: https://www.mewr.tj/?page_id=301&lang=tj.
- 7 Проект Рогунской ГЭС – обновленная оценка воздействия на окружающую среду и социальную среду. – Режим доступа: <https://rogunges.tj/ru/proekt-rogunskoj-ges-obnovlennaya-oczenka-vozdjstviyana-okruzhayushhuyu-sredu-isoczialtnuyu-sredu/>.
- 8 Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС. Фаза II: определение вариантов плотины. Том 1. – ОАХК «Барки Точик», Отчет №: P.002378 RP58 Ред. Г, Июнь 2014.
- 9 Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года (НСР-2030).
- 10 Shang L., Li X., Shi H., Kong F., Wang Y., Shang Y. Long-, Medium-, and Short-Term Nested Optimized-Scheduling Model for Cascade Hydropower Plants: Development and Practical Application // Water. – 2022. – Vol. 14. – 1586. – DOI: 10.3390/w14101586.
- 11 Филиппова Т. А., Мисриханов М. Ш., Сидоркин Ю. М., Русина А. Г. Гидроэнергетика: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 620 с.
- 12 Цветков Е. В., Алабышева Т. М., Парфенов Л. Г. Оптимальные режимы электростанций в энергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с.

- 13 Арзамасцев Д. А., Бартоломей П. И., Холян А. М. АСУ и оптимизация режимов энергосистем: Учебное пособие для студентов вузов / Под ред. Д. А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с.
- 14 Александровский А.Ю., Кнеллер М.И., Коробова Д.Н. и др. Гидроэнергетика: Учебник для вузов. – 2-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 512 с.
- 15 Секретарев Ю. А. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы: монография. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 308 с.
- 16 Тягунов М. Г. Управление режимами ГЭС. – М.: МЭИ, 1984.
- 17 Резниковский А. Ш., Рубинштейн М. И. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 18 Александровский А. Ю. Теория и методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 1991. – 257 с.
- 19 Александровский А. Ю., Хасянов С. В. Оценка влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на показатели работы каскада гидроэлектростанций // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 1. – С. 79–83.
- 20 Филиппова Т. А., Сидоркин Ю. М., Русина А. Г. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник. – Новосибирск, 2007. – 356 с.
- 21 Борщ А. С. Уточнение методики определения параметров пропуска максимальных расходов воды путём учёта негоризонтальности зеркала водохранилища на примере Волжско-Камского каскада ГЭС: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск, 2021. – 120 с. – EDN FIJBGG.
- 22 Ахророва А. Д., Аминджанов Р. М., Доронкин К. А. Энергетика Таджикистана: современные тенденции и перспективы устойчивого развития. – Душанбе: 2005. – 238 с.
- 23 Петров Г. Н. Комплекс прикладных методов и моделей для совершенствования использования водно-энергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2012. – 390 с.
- 24 Наврузов С. Т. Моделирование и управление водными ресурсами: монография. – Душанбе: «ЭР-граф», 2013. – 280 с.

- 25 Гулахмадов А. А. Колебания температуры и осадков в верховьях бассейна реки Вахш // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 3(188). – С. 152–164.
- 26 Секретарев Ю. А., Султонов Ш. М. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах = Optimal management of HPP regimes in electric power systems: монография. – Душанбе: ТТУ им. акад. М. С. Осими, 2020. – 144 с. – 300 экз. – ISBN 978-99975-1-240-6.
- 27 Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 464 с.
- 28 Горштейн В. М. Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергосистемах. – М.: Горэнергоиздат, 1959. – 248 с.
- 29 Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. В. М. Горнштейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
- 30 Крумм Л. А. Методы оптимизации и управления электроэнергетическими системами. – Новосибирск: Наука, 1980. – 317 с.
- 31 Синьков В. М., Богословский А. В., Гриоренко В. Г., Калиновский Я. А., Огородников А. А., Мозговая Э. А. Оптимизация режимов энергетических систем. – Киев: Вища школа, 1976. – 308 с.
- 32 Wood J. A., Wollenberg B. F., Sheble G. B. Power Generation Operation and Control. – 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2013.
- 33 Zhu J. Optimization of Power System Operation. – IEEE ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- 34 Веников В. А., Идельчик В. И. Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики (оптимизация развития и функционирования). – М.: ВИНТИ, 1974. – 237 с.
- 35 Смирнов К. А. Применение метода относительных приростов при расчете оптимального распределения мощностей в энергосистемах с учетом ограничений режима // Электричество. – 1964. – № 7. – С. 18–23.
- 36 Златопольский А. Н. О наивыгоднейшем распределении тепловой нагрузки ТЭЦ между отдельными турбогенераторами // Электрические станции. – 1961. – № 11. – С. 12–16.

- 37 Секретарев Ю. А., Султонов Ш. М. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах: монография. – Душанбе: ТТУ имени академика М. С. Осими, 2020. – 144 с.
- 38 Маркович И. М. Оптимизация режимов энергетических систем. – М.: МЭИ, 1967. – 72 с.
- 39 Горнштейн В. М. Методика расчета наивыгоднейшего распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ // Электрические станции. – 1962. – № 8. – С. 37–41.
- 40 Гайибов Т. Ш. Оптимизация состава работающих агрегатов электростанций кусочно-линейной аппроксимацией нелинейных зависимостей // Электрические станции. – 2009. – № 5. – С. 32–37.
- 41 Подрезова Д. В. Разработка методики оптимизации режима электроэнергетической системы с учетом стоимости потерь в электрической сети: диссертация на соискание ученой степени к.т.н., 05.14.02. – МЭИ, Москва, 2012.
- 42 Rodrigues R. N., da Silva E. L., Finardi E. C., Takigawa F. Y. K. Solving the Short-Term Scheduling Problem of Hydrothermal Systems via Lagrangian Relaxation and Augmented Lagrangian // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – Vol. 2012, Article ID 856178, 18 pp. – DOI: 10.1155/2012/856178.
- 43 Маркович И. М. Режимы энергетических систем. – М.: Энергия, 1969. – 351 с.
- 44 Рокотян И. С., Федоров Д. А. Применение нелинейного математического программирования в энергетических задачах. – М.: МЭИ, 1983. – 52 с.
- 45 Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 464 с.
- 46 Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 400 с.
- 47 Русина А. Г., Филиппова Т. А. Режимы электрических станций и электроэнергетических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 400 с.
- 48 Легалов Д. И. Методика планирования долгосрочных оптимальных режимов электроэнергетических систем с ГЭС, основанная на методе динамического программирования: автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Иркутск, 2005. – 24 с.

- 49 Легалов Д. И., Паламарчук С. И. Долгосрочное планирование режимов электроэнергетических систем с ГЭС // *Электричество*. – 2005. – № 10.
- 50 Pereira M., Comodonico N., Kelman R. Long-term Hydro Scheduling based on Stochastic Models // *Proc. Int. Conf. Electrical Power Systems Operation and Management (EPSOM'98)*. – Zurich, Switzerland, 1998. – P. 1–22.
- 51 Ferrero R., Rivera J., Shahidehpour S. A Dynamic Programming Two-Stage Algorithm for Long-term Hydrothermal Scheduling of Multireservoir System II // *IEEE Transactions on Power Systems*. – Vol. 13, № 4, November 1998. – P. 1534–1540.
- 52 Ferrero R., Rivera J., Shahidehpour S. Effect of deregulation on hydrothermal systems with transmission constraints II // *Electric Power Systems Research*. – Vol. 38, № 3, 1997. – P. 191–197.
- 53 Fosso O., Al Abbas, Abdullah M. Long-term operation planning of Hydro-Thermal Power Systems II // *Electra*. – № 192, October 2000. – P. 46–53.
- 54 Пащенко А. В., Попова Ю. Б. Оптимизация режима энергосистемы по активной мощности с учетом динамического программирования // *Изв. ВУЗов. Энергетика*. – 1999. – № 6. – С. 39–46.
- 55 Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общ. ред. Руденко Ю. Н., Семенова В. А. – М.: МЭИ, 2000. – 648 с.
- 56 Zhao H., Xu J., Liu Q., Zhang Y. An efficient and accurate Mixed-integer linear programming model for long-term hydropower scheduling // *IET Renewable Power Generation*. – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 1077–1086. – DOI: 10.1049/rpg2.12098.
- 57 Мицель А. А. Эвристические Методы Оптимизации. – Томск, 2022. – 73 р.
- 58 Lai V., Huang Y. F., Koo C. H., Ahmed A. N., El-Shafie A. A Review of Reservoir Operation Optimisations: From Traditional Models to Metaheuristic Algorithms // *Arch. Comput. Methods Eng.* – 2022. – Vol. 29. – P. 3435–3457.
- 59 Mo L., Lu P., Wang C., Zhou J. Short-term hydro generation scheduling of Three Gorges–Gezhouba cascaded hydropower plants using hybrid MACS-ADE approach // *Energy Convers. Manag.* – 2013. – Vol. 76. – P. 260–273.
- 60 Wang C., Zhou J., Lu P., Yuan L. Long-term scheduling of large cascade hydropower stations in Jinsha River, China // *Energy Convers. Manag.* – 2015. – Vol. 90. – P. 476–487.
- 61 Tao Y., Mo L., Yang Y., Liu Z., Liu Y., Liu T. Optimization of Cascade Reservoir Operation for Power Generation, Based on an Improved Lightning

- Search Algorithm // Water. – 2023. – Vol. 15. – Article 3417. – DOI: 10.3390/w15193417.
- 62 Azad A. S., Rahaman M. S. A., Watada J. et al. Optimization of the hydropower energy generation using Meta-Heuristic approaches: A review // Energy Reports. – 2020. – № 6. – P. 2230–2248. – DOI: 10.1016/j.egyr.2020.08.009.
- 63 Lai V., Huang Y. F., Koo C. H., Ahmed A. N., El Shafie A. A Review of Reservoir Operation Optimisations: from Traditional Models to Metaheuristic Algorithms // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – Vol. 29. – P. 3435–3457. – DOI: 10.1007/s11831-021-09701-8.
- 64 Ahmad A., El-Shafie A., Razali S. F. M., Mohamad Z. S. Reservoir Optimization in Water Resources: a Review // Water Resour. Manage. – 2014. – DOI: 10.1007/s11269-014-0700-5.
- 65 Dehghani M., Riahi-Madvar H., Hooshyaripor F., Mosavi A., Shamshirband S., Zavadskas E. K., Chau K.-w. Prediction of Hydropower Generation Using Grey Wolf Optimization Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System // Energies. – 2019. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/en12020289.
- 66 Janga Reddy M., Nagesh Kumar D. Optimal Reservoir Operation Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm // Water Resources Management. – 2006. – Vol. 20. – P. 861–878.
- 67 Chen L., McPhee J., Yeh W.-G. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves // Advances in Water Resources. – 2007. – Vol. 30. – P. 1082–1093.
- 68 Zheng J., Yang K., Zhou R., Hao Y., Liu G. Improved Adaptive Genetic Algorithm and Its Application in Short-Term Optimal Operation of Cascade Hydropower Stations // Communications in Information Science and Management Engineering. – 2013. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 167–174.
- 69 Павлюченко Д. А. Разработка и исследование генетических алгоритмов для анализа и оптимизации режимов электроэнергетических систем: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – 2003. – 176 с.
- 70 Swain R. K., Barisal A. K., Hota P. K., Chakrabarti R. N. Short-term Hydrothermal Scheduling using Clonal Selection Algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2011. – Vol. 33. – P. 647–656.
- 71 Mosavi A., Salimi M., Ardabili S. F., Rabczuk T., Shamshirband S., Varkonyi-Koczy A. State of the art of machine learning models in energy

- systems, a systematic review // *Energies*. – 2019. – № 12(7), 1301. – DOI: 10.3390/en12071301.
- 72 Bernardes J., Jr., Santos M., Abreu T., Prado L., Jr., Miranda D., Julio R., Viana P., Fonseca M., Bortoni E., Bastos G. S. Hydropower Operation Optimization Using Machine Learning: A Systematic Review // *AI*. – 2022. – P. 78–99. – DOI: 10.3390/ai3010006.
- 73 Maghrebi M. F., Vatanchi S. M. Comparison of different machine learning methods in river streamflow estimation using isovel contours and hydraulic variables // *International Journal of River Basin Management*. – 2024. – DOI: 10.1080/15715124.2024.2435068.
- 74 Lai J.-P., Chang Y.-M., Chen C.-H., Pai P.-F. A Survey of Machine Learning Models in Renewable Energy Predictions // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – Article 5975. – DOI: 10.3390/app10175975.
- 75 Forootan M. M., Larki I., Zahedi R., Ahmadi A. Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – Article 4832. – DOI: 10.3390/su14084832.
- 76 Al-Nouti A. F., Balogun A.-L., Al-Ansari N., Yaseen Z. M. Reservoir Operation Based Machine Learning Models: Comprehensive Review for Limitations, Research Gap, and Possible Future Research Direction // *Knowledge-Based Engineering and Sciences*. – 2024. – Vol. 5, № 2. – P. 75–139. – DOI: 10.51526/kbes.2024.5.2.75-139.
- 77 Benti N. E., Chaka M. D., Semie A. G. Forecasting Renewable Energy Generation with Machine Learning and Deep Learning: Current Advances and Future Prospects // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Article 7087. – DOI: 10.3390/su15097087.
- 78 Массель Л. В., Гергет О. М., Массель А. Г., Мамедов Т. Г. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2019. – Vol. 3, № 15. – С. 5–17.
- 79 Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Vol. 333, № 7. – С. 115–125.
- 80 Сафаралиев М. Х. и др. Адаптивные ансамблевые модели для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии

- гидроэлектростанциями в изолированных энергосистемах с учётом изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – Vol. 1, № 54. – С. 38–45.
- 81 Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Методы машинного обучения для задач прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2023. – № 2. – С. 146–170. – DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/146-170.
- 82 Сафаралиев М. Х. Разработка моделей прогнозирования электропотребления и генерации ГЭС на среднесрочную перспективу в изолированных энергосистемах: дис. канд. техн. наук: 2.4.3 / М. Х. Сафаралиев; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2022. – 119 с.
- 83 Махмадджонов Ф. Д. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы Республики Таджикистан с использованием эволюционного алгоритма // Политехнический вестник. Серия: Серия Инженерные исследования. – 2022. – № 4 (60). – Душанбе: ТТУ имени акад. М. С. Осими. – С. 24–28.
- 84 Matrenin P. V., Safaraliev M. K., Kiryanova N. G., Sultonov S. M. Monthly Runoff Forecasting by Non-Generalizing Machine Learning Model and Feature Space Transformation (Vakhsh River Case Study) // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. – 2022. – № 3 (55). – DOI: 10.52254/1857-0070.2022.3-55.08.
- 85 Русина А. Г., Филиппова Т. А. и др. ГЭС: искусство управления: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 226 с.
- 86 Клер А. М., Корнеева З. Р., Елсуков П. Ю. Оптимизация режимов работы энергосистем, включающих ТЭЦ и ГЭС с водохранилищами многолетнего регулирования // Изв. РАН. Энергетика. – 2011. – № 2. – С. 92–106.
- 87 Русина А. Г. Развитие теории и методологии анализа электроэнергетических систем управления установившимися режимами: автореферат дис. д.т.н.: 05.14.02 – Томск, 2013. – 41 с.
- 88 Егоров М. В., Протопопова Т. Н. Иммитационное моделирование оперативного водноэнергетического баланса ГЭС Волжско-Камского каскада // Энергия единой сети. – 2013. – Vol. 1, № 6. – С. 40–49.
- 89 Совбан Е. А. Разработка методики управления режимами объединенной электроэнергетической системы в условиях неопределенности баланса:

- дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Совбан Е. А.; науч. рук. А. Г. Русина. – Новосибирск, 2019. – 170 с.
- 90 Матренин П. В., Сафаралиев М. Х., Кирьянова Н. Г., Султонов Ш. М. Прогнозирование среднемесячных значений стоков рек с применением необобщающей модели машинного обучения и преобразованием пространства признаков (на примере реки Вахш) // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 3 (55). – С. 99–110.
- 91 Секретарев Ю. А., Султонов Ш. М., Шальнев В. Г. Повышение выработки электроэнергии в Таджикистане на основе оптимизации режимов ГЭС // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 14–17. – EDN UQFFRV.
- 92 Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС. Гидрология – ОАХК «Барки Точик», Отчет №: Р.002378 РР 07 Ред. Д, Январь 2013.
- 93 Кокин С. Е., Сафаралиев М. Х., Султонов Ш. М. Особенности управления гидроэлектростанциями в энергосистеме республики Таджикистан // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2017. – № 2 (77). – С. 109–118.
- 94 Ахророва А. Д., Аминджанов Р. М., Доронкин К. А. Энергетика Таджикистана: современные тенденции и перспективы устойчивого развития. – Душанбе: РИА "Статус", 2005. – 238 с.
- 95 Петров Г. Н., Ахмедов Х. М. Комплексное использование водноэнергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии. Современное состояние, проблемы и пути их решения. – Душанбе: ООО "Сапфир Компани", 2011. – 234 с.
- 96 Петров Г. Н., Кодиров А. С., Ахмедов Х. М. О правовых вопросах регулирования взаимоотношений стран в области совместного использования водных ресурсов // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 2 (187).
- 97 Петров Г. Н. Оптимизация режимов работы гидроузлов с водохранилищами. – Душанбе, 2009. – 138 с.
- 98 Савичев О. Г., Краснощеков С. Ю., Наливайко Н. Г. Регулирование речного стока: учебное пособие. – Томск, 2009. – 114 с.
- 99 Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС / Фаза II – Том 3. Глава 5: Исследования по моделированию эксплуатации

- водохранилища – ОАХК «Барки Точик», Отчет №: P.002378 RP40 Ред. Д, Август 2014.
- 100 Sulstonov S., Dzhuraev S., Safaraliev M., Kokin S., Dmitriev S., Zicmane I. Specifics of hydropower plant management in isolated power systems // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2022. – № 4. – С. 53–57.
 - 101 Секретарев Ю. А., Султонов Ш. М. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах: монография. – Душанбе: ТТУ имени академика М. С. Осими, 2020. – 144 с.
 - 102 Алябышева Т. М., Цурлуков В. А., Юркин А. Г. Моделирование краткосрочных режимов работы каскадов ГЭС // *Энергия единой сети*. – 2012. – № 4. – С. 62–69.
 - 103 Духовный В. А., Сорокин А. Г. Оценка влияния Рогунского водохранилища на водный режим реки Амударья. – Ташкент: НИЦ МКВК, 2007. – С. 127.
 - 104 Султонов Ш. М. Гидроэнергетические установки: учебное пособие. – Душанбе: ТТУ имени академика М. С. Осими, 2021. – 168 с.
 - 105 UNDP. UNDP unites mountain nations to share practices on glacier preservation. – [Электронный ресурс] <https://www.undp.org/tajikistan/stories/undp-unites-mountain-nations-share-practices-glacier-preservation>.
 - 106 Салохиддинов А. Т., Икрамов Р. К. Управление водными ресурсами: учебное пособие. – Ташкент: ТИМИ, 2013.
 - 107 Савичев О. Г., Краснощёков С. Ю., Наливайко Н. Г. Регулирование речного стока: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 114 с.
 - 108 Kumar S., Tiwari M. K., Chatterjee C., Mishra A. Reservoir inflow forecasting using ensemble models based on neural networks, wavelet analysis and bootstrap method // *Water Resour. Manag.* – 2015. – Vol. 29. – P. 4863–4883.
 - 109 Datta B., Burges S. J. Short-Term, Single, Multiple-Purpose reservoir operation: Importance of loss functions and forecast errors // *Water Resour. Res.* – 1984. – Vol. 20. – P. 1167–1176.
 - 110 Shang L., Li X., Shi H., Kong F., Wang Y., Shang Y. Long-, Medium-, and Short-Term Nested Optimized-Scheduling Model for Cascade Hydropower Plants: Development and Practical Application // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – Article 1586. – DOI: 10.3390/w14101586.

- 111 Valipour M. Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States // *Meteorological Applications*. – 2015. – Vol. 22, № 3. – P. 592–598. – DOI: 10.1002/met.1491.
- 112 Gulakhmadov A., Chen X., Gulahmadov N., Liu T., Anjum M. N., Rizwan M. Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate Change on Streamflow in the Vakhsh River Basin in Central Asia under CMIP5 RCP Scenarios // *Water*. – 2020. – Vol. 12, № 5. – Article 1426. – DOI: 10.3390/w12051426.
- 113 Gulakhmadov A., Davlyatov R., Kobuliev Z. et al. Elevation Dependency of Climatic Variables Trends in the Last Decades in the Snow-Fed and Glacier-Fed Vakhsh River Basin, Central Asia // *Water Resour.* – 2021. – Vol. 48. – P. 914–924. – DOI: 10.1134/S0097807821060075.
- 114 Зуева В. Н., Никитина Ю. Ю. Анализ методов прогнозирования графиков нагрузки электрооборудования // Сборник докладов победителей и лауреатов XXII студенческой научной конференции АМТИ. – 2016. – С. 119–122.
- 115 Альсова О. К. Разработка алгоритмов прогнозирования временных рядов на основе метода главных компонент // *Научный вестник НГТУ*. – 2007. – № 3(28). – С. 79–86.
- 116 Дьяков А. Ф., Сюткин Б. Д., Тимченко В. Ф. Основы вероятностной теории, статистического анализа и интервального прогнозирования режимов потребления электроэнергии в электрических системах // *Изв. АН. Сер. Энергетика*. – 1992. – № 5. – С. 45–73.
- 117 Воропай Н. И., Труфанов В. В. Математическое моделирование развития электроэнергетических систем в современных условиях // *Электричество*. – 2000. – № 10. – С. 6–12.
- 118 Петров Г. Н. Долгосрочный прогноз водного стока реки Вахш // *Доклады академии наук Республики Таджикистан*. – 2007. – Vol. 50, № 6. – P. 539–545.
- 119 Wilks D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. – 2nd ed. – International Geophysics Series. – Academic Press, 1995. – Vol. 59. – 464 p. – ISBN 0127519653, ISBN 978-0127519654.
- 120 Султонов Ш. М. Прогнозирование стока реки Вахш с применением метода нейронных сетей // *Материалы Межд. научно-практ. конф. «Вода для устойчивого развития Центральной Азии», 25–26 марта 2018 г.* – Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии АН РТ. – 2018. – С. 365–369.

- 121 Манусов В. З., Бирюков Е. В. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 6. – С. 153–158.
- 122 Алиев Д. А., Кулешова О. Е. Особенности разработки правил использования малых водохранилищ Дальнего Востока (на примере Нерюнгринской водохозяйственной системы) // Природообустройство. – 2014. – № 2. – С. 79–85.
- 123 Картвелешвили Н. А. Регулирование речного стока. – JL: Гидрометеиздат, 1977.
- 124 Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982.
- 125 Малинин Н. К. Водноэнергетические расчеты и режимы гидроэнергетических установок. – М.: Московский энергетический институт, 1988.
- 126 Liu Y., Qin H., Mo L., Wang Y., Chen D., Pang S., Yin X. Hierarchical Flood Operation Rules Optimization Using Multi-Objective Cultured Evolutionary Algorithm Based on Decomposition // Water Resour. Manag. – 2019. – Vol. 33. – P. 337–354.
- 127 Zhou J., Jia B., Chen X., Qin H., He Z., Liu G. Identifying Efficient Operating Rules for Hydropower Reservoirs Using System Dynamics Approach – A Case Study of Three Gorges Reservoir, China // Water. – 2019. – Vol. 11.
- 128 Guo S., Chen J., Li Y., Liu P., Li T. Joint Operation of the Multi-Reservoir System of the Three Gorges and the Qingjiang Cascade Reservoirs // Energies. – 2011. – Vol. 4. – P. 1036–1050. – DOI: 10.3390/en4071036.
- 129 Гаппаров Ф. А., Кодиров С. М., Гаффарова М. Ф. Диспетчерский график по рациональному наполнению и сработке водохранилищ // Гидроэнергетика. – 2018. – Vol. 4 (53). – С. 48–50.
- 130 Гаппаров Ф. А., Кодиров С. М., Гаффарова М. Ф. Диспетчерский график по рациональному наполнению и сработке водохранилищ // Гидроэнергетика. – 2018. – Vol. 4 (53). – С. 48–50.
- 131 Гаппаров Ф. А., Ирмухамедова Л. Х., Гаффарова М. Ф. Рациональный режим наполнения и сработки ирригационных водохранилищ // Техника. Технологии. Инженерия. – 2018. – № 3(9). – С. 25–29.
- 132 Sulstonov S., Dzhuraev S., Safaraliev M., Kokin S., Dmitriev S., Zicmane I. Specifics of hydropower plant management in isolated power systems // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – № 4. – С. 53–57.

- 133 Yi Y., Wu Q., Sheng Q. Optimal Scheduling Strategy of Cascade Hydropower Plants Under the Joint Market of Day-Ahead Energy and Frequency Regulation // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–1. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071491.
- 134 Marchand A., Gendreau M., Blais M. et al. Optimized operating rules for short-term hydropower planning in a stochastic environment // Comput. Manag. Sci. – 2019. – Vol. 16. – P. 501–519. – DOI: 10.1007/s10287-019-00348-2.
- 135 Духовный В. А., Сорокин А. Г. Оценка влияния Рогунского водохранилища на водный режим реки Амударья. – Ташкент: НИЦ МКВК, 2007.
- 136 Таджикистан. Генеральный план развития энергетического сектора – заключительный отчёт // Региональный проект по передаче электроэнергии: улучшение операционной деятельности сектора. – 2017. – ГРАНТ АБР № 0213-TAJ. – Vol. 1.
- 137 Генеральный план развития энергетического сектора. Том 2 – Приложения / Ed. by – TAJ. – Февраль 2017.

Список научных публикаций соискателя ученой степени

Публикации в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК при президенте Республики Таджикистан:

[1-А]. **Раджабов М.Ш.** Анализ режимов работы водохранилищ гидроэлектростанций, работающих в каскаде / М.Ш. Раджабов, Х.И. Усмонов, Ш.М. Султонов, У.У. Косимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 4 (56) 2021. – С. 6–13.

[2-А]. **Раджабов М.Ш.** Управление энергетической эффективностью предприятия / Юлдашев З.Ш., Касобов Л.С., Раджабов М.Ш. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования № 1 (53)-2021. – С. 14-18.

[3-А]. **Раджабов М.Ш.** Энергокомплекс для энергообеспечения энерготехнологических процессов / Юлдашев З.Ш., Юлдашев Р.З. Касобов Л.С., Раджабов М.Ш., Балобанов Р.Н. // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2022, том 14, № 4 (56). С. 80-90.

[4-A]. **Раджабов М.Ш.** Анализ режимов работы Рогунской ГЭС в электроэнергетической системе республики Таджикистан / М.Ш. Раджабов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 3 (63) 2023. – С. 42–48.

[5-A]. **Раджабов М.Ш.** Оптимальное долгосрочное диспетчерское управление режимами Рогунской ГЭС / М.Ш. Раджабов, Ш.М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 1 (65) 2024. – С. 58–64.

[6-A]. **Раджабов М.Ш.** Оптимизация краткосрочных режимов Вахшского каскада гидроэлектростанций / Ш.М. Султонзода, М.Ш. Раджабов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 3 (71) 2025. – С. 27-34.

[7-A]. **Раджабов М.Ш.** Обзор методов оптимизации в энергетике / М.Ш. Раджабов, Ш.М. Султонзода // Водные ресурсы, энергетика и экология. № 5 (3) 2025. – С. 99-107.

Публикации, входящие в базу данных SCOPUS и IEEE

[8-A]. **Mirzosharif Rajabov.** Factors Influencing the Determination of the Gyrosures Potential of Small Rivers / Alifbek Kirgizov, Sherkhon Sulstonov, Khislatbek Usmonov and Mirzosharif Rajabov // E3S Web of Conferences 264, 03077 (2021). International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO - 2021). 1-3 April 2021, Tashkent, Uzbekistan, 2021. – 03077 (7p): <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126403077>.

[9-A]. **Mirzosharif Rajabov.** Vibration Analysis of Large Hydropower Units under Different Operating Conditions / Ilhom Mahmudov; Sherkhon Sulstonov; Sharaf Boboev; Javod Ahyoev; Mirzosharif Rajabov // 2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 14-16 November 2025, Novosibirsk, Russian Federation. – doi: 10.1109/APEIE66761.2025.11289220.

Публикации в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций:

[10-А]. **Раджабов М.Ш.** Управление режимами водохранилищ каскада ГЭС / Иноятов М.Б., Раджабов М.Ш. Мизробов Д.А. // Материалы III научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Наука – основа инновационного развития”, посвященной Дню науки, Году развития туризма и народных ремесел и началу десятилетия “Вода для устойчивого развития” (2018-2028 гг.). – Душанбе – 2018. – С. 25-28.

[11-А]. **Раджабов М.Ш.** Анализ режимов работы Нурекской ГЭС / М.Ш. Раджабов // Материалы республиканской научно-практической конференции “Наука – основа инновационного развития” – Душанбе – 2019. – С. 40-42.

[12-А]. **Раджабов М.Ш.** Анализ режимов работы Кайраккумской ГЭС / М.Ш. Раджабов, М.И. Исроилзода, Ф. Рахим, рук. Ш.М. Султонзода // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: двадцать девятая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (16-18 марта 2023 г, Москва): Тез. Докл. – М.: ООО “Центр полиграфических услуг «Радуга»», 2024. – С. 1203.

[13-А]. **Раджабов М.Ш.** Принципы управления режимами ГЭС в энергосистеме / Раджабов М.Ш., Хабибов О.С., Рахимов Б.С., Султонзода Ш.М. Материалы международной научно – практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития» // Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. Душанбе. - 2023. С. 361-365.

[14-А]. **Раджабов М.Ш.** Гидроэнергетика в Таджикистане для устойчивого энергетического будущего / М.Ш. Раджабов, Б. Сулаймонов, Ш.М. Султонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тридцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля – 2 марта 2024 г, Москва): Тез. Докл. – М.: ООО “Центр полиграфических услуг «Радуга»», 2024. – С. 1304.

[15-А]. **Раджабов М.Ш.** Гидроаккумулирующая электростанция: преимущество, недостатки, динамика, перспективы / Раджабов М.Ш., Касобов

Л.С. // 20-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики»: материалы конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024, 655 с. С.356-359

[16-А]. **Раджабов М.Ш.** Малая гидроэнергетика Таджикистан / Касобов Л.С., Раджабов М.Ш. // III международная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы», Ташкент, 2024. С. 300-303

[17-А]. **Раджабов М.Ш.** Долгосрочное прогнозирование стока реки Вахш на основе методов машинного обучения / Раджабов М.Ш., Султонзода Ш.М., Гафоров А.Дж. // Материалы Международной научно – практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости» Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими –Душанбе: «Aprint», 2025. – С. 276-281.

[18-А]. **Раджабов М.Ш.** Энергетика стран Центральной Азии: Состояние и перспективы развития Касобов Л.С. Раджабов М.Ш., Материалы республиканской научно-практической конференции “ Суверенитет и обеспечение энергетической независимости: достижения и перспективы развития” // Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. Душанбе. - 2024. С.5-11

[19-А]. **Раджабов М.Ш.** Построение кривой обеспеченности в створе реки Вахш. Материал республиканской научно-практической Конференции на тему «Водноэнергетические ресурсы: состояние и перспективы его рационального использование в Республики Таджикистан» посвященный международному Десятилетию действий «Вода для устойчивого развития»2018-2028 гг. и Дню энергетиков (22 декабря 2022, г. Куляб) С.338-343

Авторские свидетельства и патенты

[20-А]. **Раджабов М.Ш.** База данных ML-VakhshRiver: Прогнозирование стока реки Вахш на основе методов машинного обучения / Султонзода Ш.М., Худойбердиев Х.А., Раджабов М.Ш., Махкамов Д.Ф. // Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №1202400516, 05.06.2024 г.

[21-А]. **Раджабов М.Ш.** База данных: Оптимизация водно-энергетических режимов ГЭС Вахшского каскада методом линейного программирования / Султонзода Ш.М., Бобоев Ш.А., Раджабов М.Ш., Ахъёев Дж.С. // Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №1202400529, 08.04.2025 г.

[22-А]. **Раджабов М.Ш.** СВИДЕТЕЛЬСТВО. RU2025618934. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Государственная регистрация программы для ЭВМ: Оптимизация режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада / Султонов Ш.М., Бобоев Ш.А., Раджабов М.Ш., Худжасаидов Дж.Х., Гуломзода А.Х. // Номер регистрации (свидетельства): № 2025618934, Дата регистрации: 10.04.2025, Номер и дата поступления заявки: 2025617761 10.04.2025. Дата публикации и номер бюллетеня: 10.04.2025 Бюл. № 4.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Свидетельства

	
ВАЗОРАТИ РУШДИ ИҚТИСОД ВА САВДОИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН МУАССИСАИ ДАВЛАТИИ «МАРКАЗИ МИЛЛИИ ПАТЕНТУ ИТТИЛОӢТ» МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ТОРГОВЛИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАТЕНТНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР»	
ШАҲОДАТНОМА дар бораи бақайдгирии давлатии захираи иттилоотӣ СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации информационного ресурса	
Номгӯй	База данных ML-VakhshRiver: Прогнозирование стока реки Вахш на основе
Наименование	методов машинного обучения
Сарзамин	Республика Таджикистан
Страна	Султонзода Ш.М., Худойбердиев Х.А., Раджабов М.Ш., Махкамов Д.Ф.
Доранда	Тахиягар
Владелец	Разработчик
Тахиягар	Султонзода Ш.М., Худойбердиев Х.А., Раджабов М.Ш., Махкамов Д.Ф.
Разработчик	№ қайди давлатӣ
№ қайди давлатӣ	№ государственной
№ государственной	регистрации
регистрации	№ 1202400516
Ба Феҳристи давлатии захираҳои иттилоотии Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил карда шудааст	Внесен в Государственный реестр информационных ресурсов Республики Таджикистан
Внесен в Государственный реестр информационных ресурсов Республики Таджикистан	05 июня 2024 г.
Директор	Исмоилзода М.Х.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618934

Оптимизация режимов работы гидроэлектростанций Вахшского каскада

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (RU)**

Авторы: **Султонов Шерхон Муртазокулович (Т.Ж), Бобоев Шариф
Асрорович (Т.Ж), Раджабов Мирзошариф Шарифович (Т.Ж),
Худжасаидов Джахонгир Худжасаидович (Т.Ж), Гуломзода Анвари
Хикмат (RU)**

Заявка № **2025617761**

Дата поступления **10 апреля 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **10 апреля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e761ca13005f5442401670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



ВАЗОРАТИ РУШДИ ИҚТИСОД ВА САВДОИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
МУАССИСАИ ДАВЛАТИИ «МАРКАЗИ МИЛЛИИ ПАТЕНТУ ИТТИЛОӢТ»
МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ТОРГОВЛИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАТЕНТНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР»



ШАҲОДАТНОМА

дар бораи бақайдгирии давлатии захираи иттилоотӣ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации информационного ресурса

Номи Номгуи База данных «Оптимизация водно-энергетических режимов ГЭС
Наименование Вахского каскада методом линейного программирования».

Сарзамини Сарзамини Республика Таджикистан

Доранда Доранда Султонзода Шерхон Мургазо

Владелец Султонзода Шерхон Мургазо

Тахиягар Тахиягар Султонзода Ш.М., Бобоев Ш.А., Раҷабов М.Ш, Аҳъёев Д.С.

Разработчик Султонзода Ш.М., Бобоев Ш.А., Раҷабов М.Ш, Аҳъёев Д.С.

№ кайди давлати № 1202500529

№ государственной регистрации № 1202500529

Ба Феҳристи давлатии захираҳои иттилоотии

Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил карда шудааст

Внесен в Государственный реестр информационных

ресурсов Республики Таджикистан

08 апреля 2025 г.

Исмонилзода М.Х.

Директор

Исмонилзода М.Х.



Акты внедрения



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10. Тел.: (+992 37) 221-35-11, e-mail: info@ttu.tj

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими
д.э.н., проф. Давлатзода К.К.
2025 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Раджабова
Мирзошарифа Шарифовича в учебный процесс Таджикского технического
университета имени академика М.С. Осими**

Комиссия в составе: начальника учебного управления к.т.н., доцента Рахимзода Дж.Б. - председателя комиссии, начальника управления науки и инновации к.т.н. Бозорова Ш.А. и декана энергетического факультета к.т.н. Юсуфзода М.Ю. - членов комиссии, настоящим подтверждаем, что результаты научного исследования Раджабова М.Ш. на тему **«Оптимизация режимов работы ГЭС Вахшского каскада с вводом в эксплуатацию Рогунской ГЭС»**, внедрены в учебный процесс на энергетическом факультете Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Основные положения и результаты диссертации используются при подготовке студентов и магистров по специальности «Электрические станции» при изучении дисциплин «Оптимизация электроэнергетических систем», «Режимы работы электростанций и электроэнергетических систем» и «Гидроэнергетические установки» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Изучение указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:
Начальник учебного управления

Рахимзода Дж.Б.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:
Начальник управления науки и инновации

Бозоров Ш.А.

Декан энергетического факультета

Юсуфзода М.Ю.



ЧАМЪИЯТИ САХОМИИ КУШОДАИ
«БАРҚИ ТОҶИК»

734026, ш. Душанбе, хиббони Исмоили Сомони-64 Тел: +992 372 235-86-66 Факс: (10992372) 35-86-92;
Сомона: www.barqitojik.tj, Почта: barki.tojik@gmail.com

№ 1/1145-3384 аз «18» 06 соли 2025

Ба № _____ аз « _____ » соли 20 _____

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы Раджабова Мирзошарифа Шарифовича «Оптимизация режимов работы ГЭС Вахшского каскада с вводом в эксплуатацию Рогунской ГЭС» представленной на соискание учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика

Настоящим подтверждается заинтересованность в использовании научной разработки и предложения диссертационной работы Раджабова Мирзошарифа Шарифовича «Оптимизация режимов работы ГЭС Вахшского каскада с вводом в эксплуатацию Рогунской ГЭС».

В Таджикистане на сегодняшний день и в будущем перспективе гидроэнергетика является основным источником экологической чистой и дешевой электрической энергии. Гидроэнергетический комплекс Вахшского каскада играет ключевую роль в энергетической системе Таджикистана, обеспечивая более 95% производства электроэнергии страны. Обладая 60% гидроэнергетическим ресурсом в Центральной Азии, Таджикистан может быть лидером в регионе по экспорту «зелёной» энергии. С вводом в эксплуатацию новых ГЭС и модернизации существующих также важным является эффективная работа этих ГЭС в энергосистеме. Оптимальное управление режимами ГЭС особенно которые работают в каскаде позволяют повысить эффективность работы этих станций в энергосистеме.

ОАО «Барки Точик» рассматривает возможность использования разработанных моделей долгосрочных и краткосрочных режимов работы ГЭС, работающих на каскаде Вахш, для повышения эффективности функционирования ГЭС каскада в энергетической системе Республики Таджикистан.

Заместитель Генерального директора

Курбонзода А.А.