

**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**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Душанбе – 2026

Диссертация выполнена на кафедре «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Научный руководитель:

Султонзода Шерхон Муртазо

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электрические
станции», Таджикский технический
университет имени академика М.С. Осими

Официальные оппоненты:

Русина Анастасия Георгиевна

доктор технических наук, доцент, декан
факультета энергетики, заведующая кафедрой
«Электрические станции», ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск,
Российская Федерация

Давлатов Азамджон Махмадиевич

кандидат технических наук, заведующий
кафедрой «Электрические станции», Институт
энергетики Таджикистана, р. Кушониён

Ведущая организация:

Институт водных проблем, гидроэнергетики и
экологии Национальной академии наук
Таджикистана

Защита диссертации состоится «24» апреля 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-049 на базе Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академика Раджабовых, 10а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и на сайте организации <http://web.ttu.tj>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Давлатшоев Р.А.

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 источникам энергии (ВИЭ) в мире. Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), Международной ассоциации гидроэнергетиков (ИНА), Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) и аналитического центра Ember 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, которая в три раза превышает текущее электропотребление всех государств Центральноазиатского региона. 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.

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, существенно меняет функционирование каскада, формируя новые условия для управления как энергетическими, так и водохозяйственными процессами.

Рогунская ГЭС с общей установленной мощностью 3780 МВт станет самой крупной в Таджикистане, со среднегодовой выработкой около 17 млрд. кВт*ч. 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. Строительства 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.

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 регулирующими 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 надежности 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 развития Республики Таджикистан.

Степень изученности научной темы. 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 [1], Е.В. Цветковым [2], Д.А. Арзамасцевым [3], М.Ш. Мисрихановым, Б.И. Аюевым, В.М. Горнштейном, В.И. Обрезковым, Ю.А. Секретаревым [4], М.Г. Тягуновым [5], С.Н. Никитиным, А.Ш. Резниковским, М.И. Рубинштейном, А.Ю. Александровским [6], А.Г. Русиной [7], П.С. Борща, О. Fosso, R.K. Swain, Wang C., Shang L. также отечественных ученых А.Д. Ахроровой [8], Г.Н. Петровым [9], С.Т. Наврузовым, А.А. Гулахмадовым [10], Ш.М. Султонзода [11] и т.д.

Связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой. 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 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:

1. 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.

2. Построенные диспетчерские графики позволяют оптимизировать режим сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном временном интервале, которые могут быть применены в ОАО «Барки Точик».

3. 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.

Степень достоверности результатов диссертации: 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 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 и внедрение. Основные положения диссертации, отдельные ее части, а также результаты исследования докладывались и обсуждались на: International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (Conmechhydro - 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 конференция «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 46 рисунками, содержит 12 таблиц. Библиографический список включает в себя 131 наименований. В диссертационную работу включено 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе «Обоснование методов и постановка задачи оптимального управления режимами ГЭС Вахшского каскада» проведен критический обзор и анализ методов оптимизации в энергетике, с их классификацией на классические, метаэвристические и методы на основе машинного обучения. Описан объект исследования, режимы работы ГЭС Вахшского каскада включая Рогунскую ГЭС, а также изложена постановка задачи управления режимами работы ГЭС Вахшского каскада. На основе анализа показано, что для решения задач с четкой структурой и ограничениями, характерных для краткосрочного управления каскадом, наиболее эффективны методы математического программирования, а для задач прогнозирования в условиях неопределенности – методы машинного обучения. Дана детальная характеристика всех ГЭС каскада, их параметров и взаимосвязей, на основе чего выполнена формализованная постановка задачи многоуровневого управления.

Методы, 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.

Классификация классических методов оптимизации представлена на рисунке 1.

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.

Метаэвристические алгоритмы предоставляют новые подходы к решению этих задач и обладают повышенной эффективностью, которая широко применяется для решения оптимизационных задач в энергетике.



Рисунок 1 – Классические методы оптимизации

Метаэвристические алгоритмы можно разделить на такие категории, как, эволюционные, роевые, физические, человеческие, биологические, системные, математические, музыкальные и вероятностные. Классификация метаэвристических методов оптимизации приведена на рисунке 2.

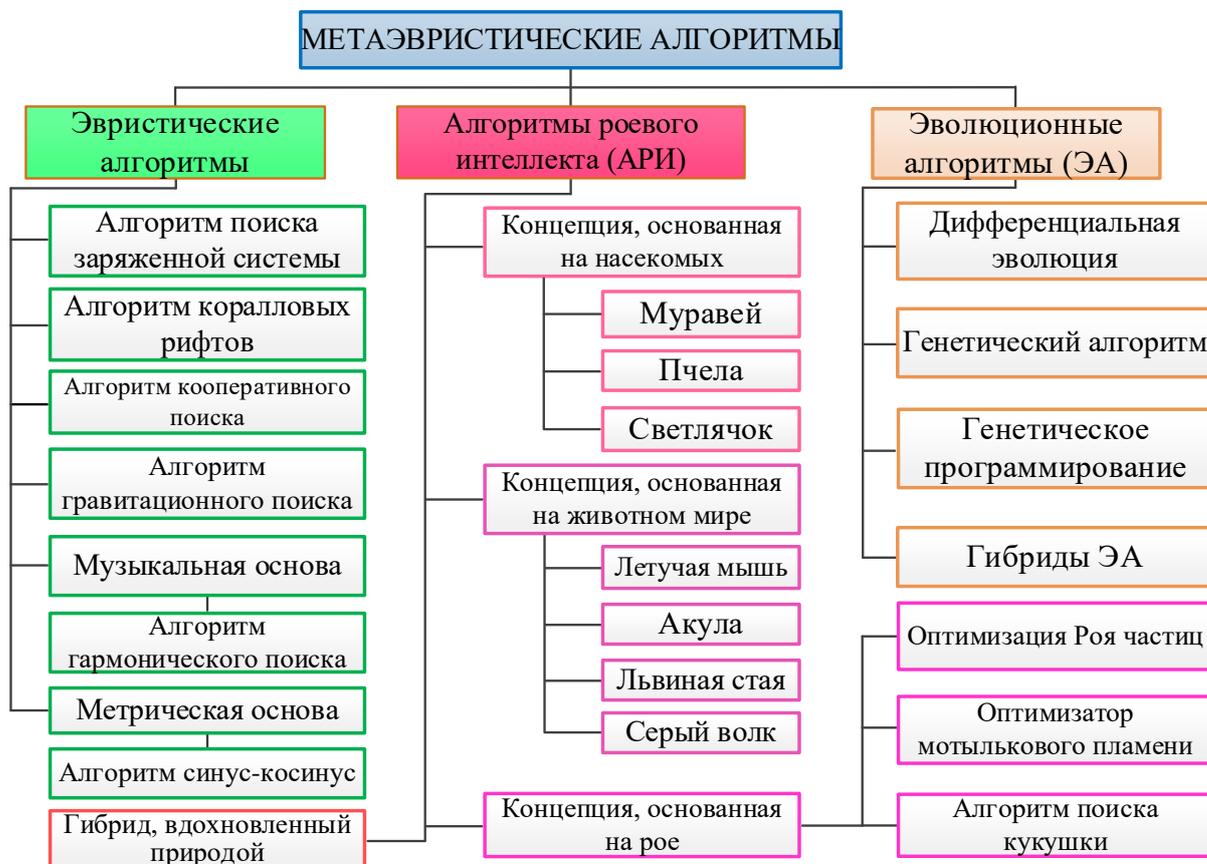


Рисунок 2 – Метаэвристические методы оптимизации

В последние два десятилетия модели машинного обучения (МО) стали незаменимыми инструментами, широко применяемыми для моделирования, проектирования и прогнозирования в различных энергетических системах.

Классификация моделей на основе машинного обучения, используемых в различных задачах энергетики приведена на рисунке 3.

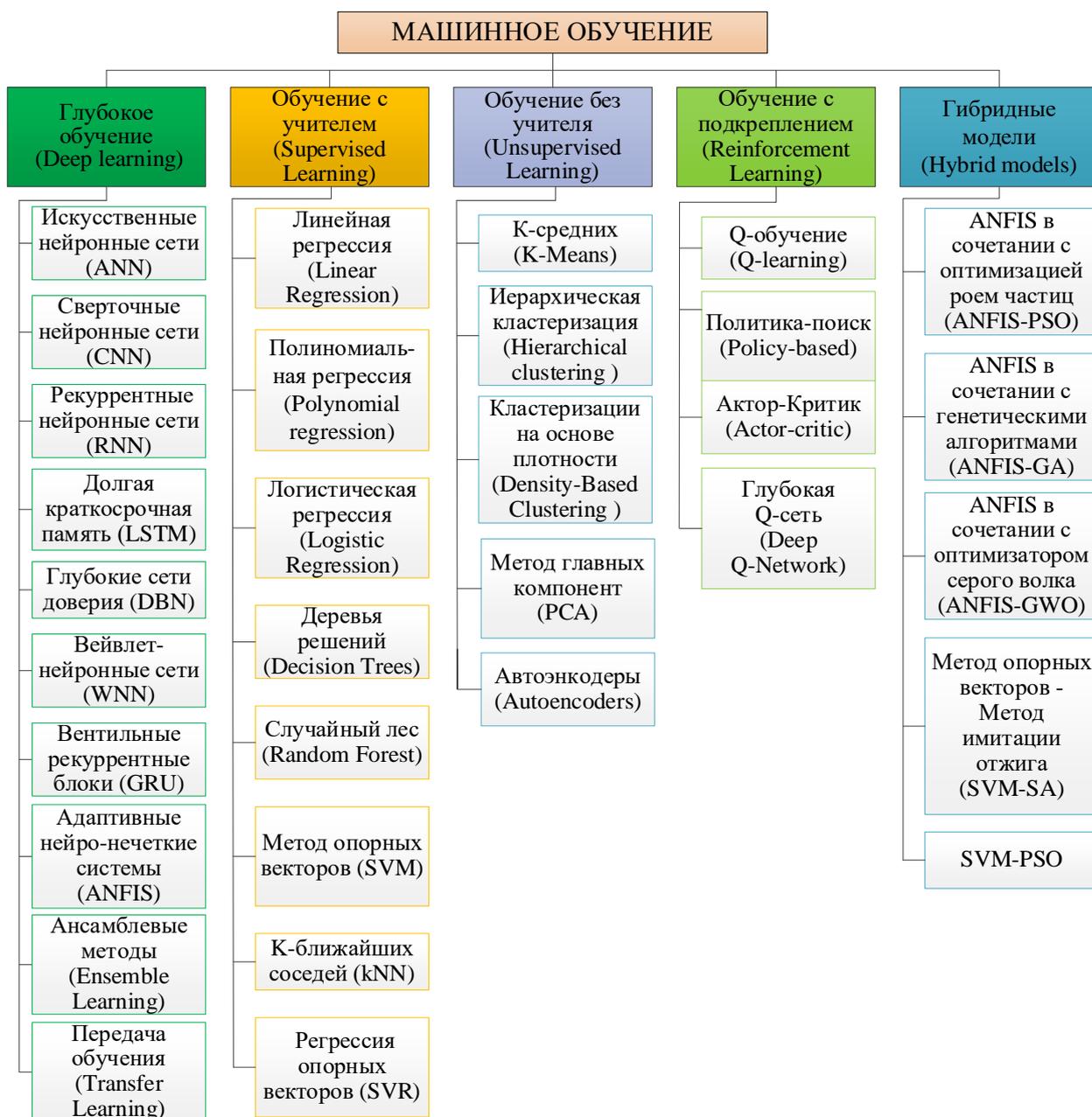


Рисунок 3 – Модели машинного обучения в энергетике

Гидроэлектростанции, как правило, входят в состав гидроузлов многоцелевого назначения и совмещают энергетические и водохозяйственные функции. Они 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. 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.

Разработка и реализация научно обоснованных подходов оптимального управления режимами каскада ГЭС в условиях неопределённости речного стока, требований энергосистемы и технических ограничений позволяет повысить эффективность использования гидроэнергетических ресурсов. Оптимальное управление позволяет повысить эффективность использования гидроэнергетических ресурсов на 10-15%.

Река Вахш является ключевой энергетической и водохозяйственной системой Таджикистана. Бассейн реки Вахш расположен между 37,10 и 39,74 северной широты и 68,31 и 73,70 восточной долготы (рисунок 4). Высота над уровнем моря в бассейне колеблется от 302 до 7050 м над уровнем моря.

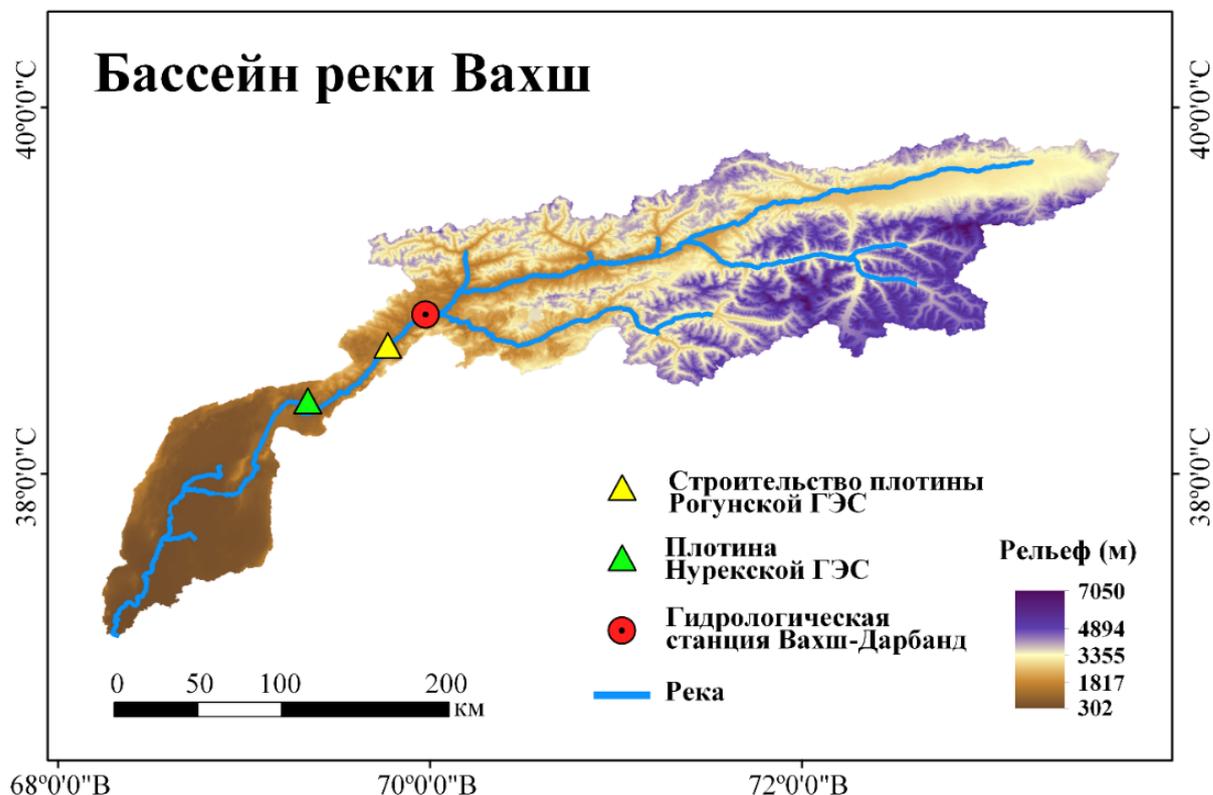


Рисунок 4 – Бассейн реки Вахш

Рогунская ГЭС представляет собой масштабный гидроэнергетический проект, разработанный в 1950–1960-х годах в период существования Советского Союза в рамках стратегического плана комплексного развития Центральной Азии. 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. 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 две агрегаты (ГА №6 и №5) работают на пониженном напоре (от 80 до 120 м) с временными рабочими колесами и временными генераторами на отметке УВБ 1055 м. При напорах от 120 до 185 м выполняется замена временных рабочих колес на постоянные с продолжением работы временных генераторов.

Графики расхода воды, заполнение водохранилища и выработка мощности Рогунской ГЭС приведены на рисунках 5, 6 и 7.

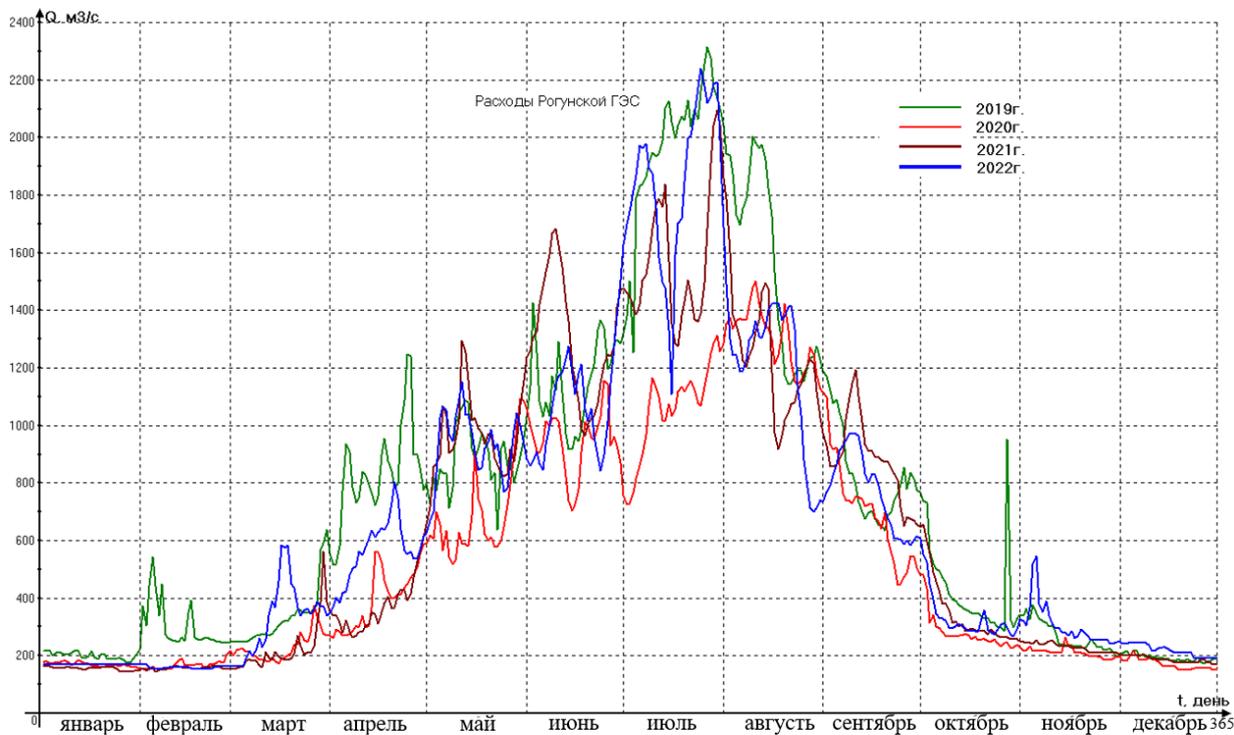


Рисунок 5 – Расходы воды на Рогунской ГЭС с 2019 по 2022 гг.

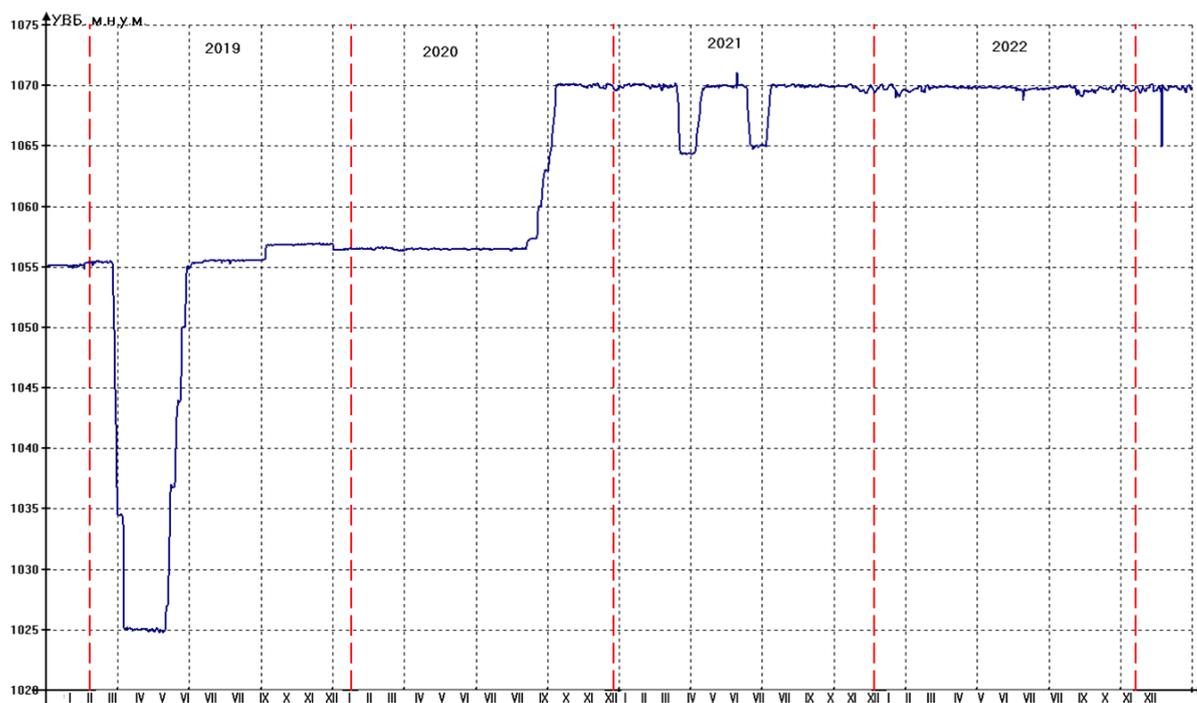


Рисунок 6 – Заполнение водохранилища Рогунской ГЭС.

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., повышением уровня верхнего бьефа на ГЭС повышается напор, что приведет к увеличению выработки мощности. С вводом Рогунская ГЭС на полную мощность решится проблема дефицита электроэнергии в зимнем периоде, что позволит экспортировать электрическую энергию в соседние страны.

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

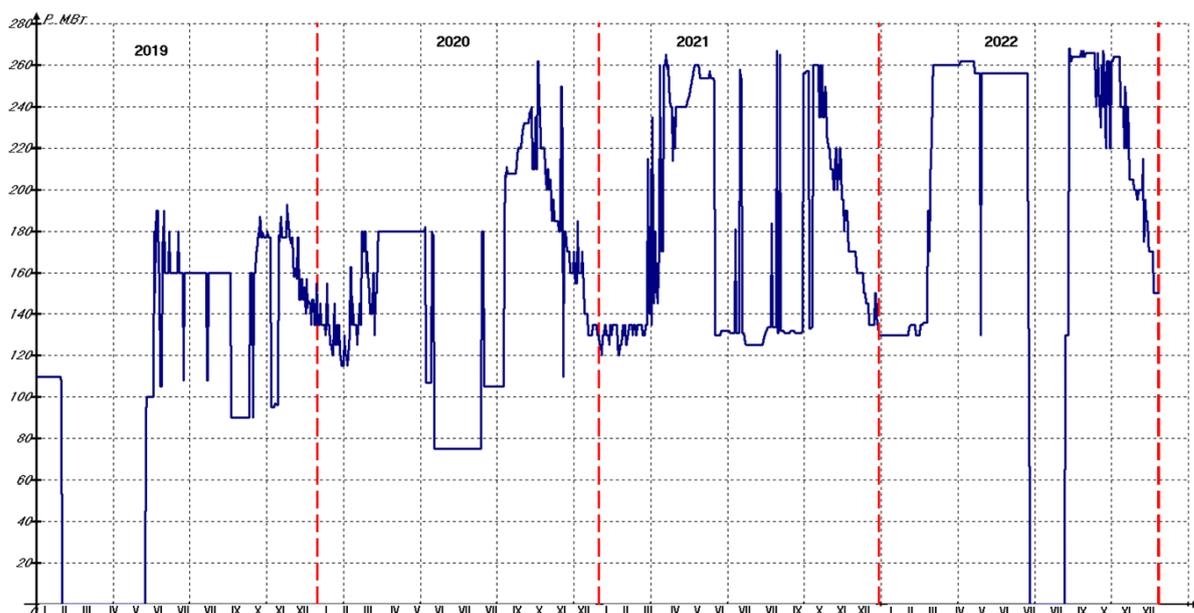


Рисунок 7 – Выработка мощности Рогунской ГЭС

Построение комплексных моделей краткосрочной и долгосрочной оптимизации режимов работы каскада ГЭС, учитывают 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.

Во второй главе «Прогнозирование стока реки Вахш для назначения оптимальных режимов Рогунской ГЭС» приведены теоретические основы регулирования речного стока и его прогнозирование. Выполнено прогнозирование стока реки Вахш для обеспечения оптимальных режимов Рогунской ГЭС, также разработана и реализована на языке Python модель прогнозирования на основе алгоритмов машинного обучения. Созданный программный комплекс «ML-VakhshRiver» (свидетельство №1202400516) позволяет анализировать гидрологические ряды и выполнять прогноз с высоким уровнем точности. Верификация модели показала её превосходство над традиционными методами, что существенно повышает достоверность долгосрочного прогнозирования.

Регулирование речного стока – это процесс перераспределения водных ресурсов во времени и в пространстве, которое осуществляется водохранилищами. Сток реки имеет стохастический и вероятностный характер, который зависит от климатических и атмосферных факторов. В зависимости от формирования стока реки, она характеризуется неравномерностью, то есть меняется по месяцам, сезонам года и год за годом. Виды регулирования речного стока в зависимости от длительности периода регулирования речного стока делятся на: долгосрочные – многолетнее, годовое и сезонное; и краткосрочные – месячное, недельное и суточное. Каждая последующая степень регулирования стока включает в себя регулирующие возможности предыдущих, например, водохранилище с многолетним регулированием может выполнять годовое, сезонное, недельное и суточное регулирование. На рисунке 8 показаны графики сезонного регулирования стока и уровней водохранилища Нурекской ГЭС.

Степень регулирования речного стока характеризуется относительным объёмом водохранилища – коэффициентом ёмкости β , которая определяется по формуле:

$$\beta = \frac{V_{\text{полез}}}{W_0},$$

где, $V_{\text{полез}}$ – полезный объем водохранилища (км^3), W_0 – средний многолетний объем годового стока (км^3).

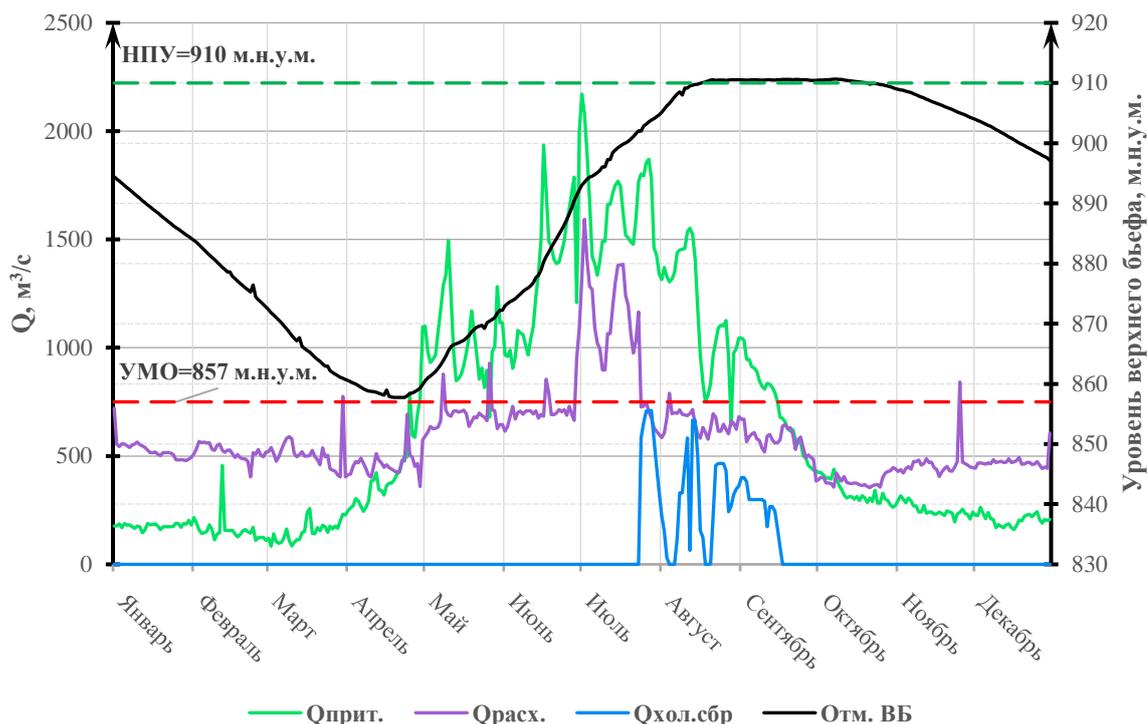


Рисунок 8 – Графики сезонного регулирования стока и уровней водохранилища Нурекской ГЭС

Коэффициент ёмкости обычно составляет для водохранилищ суточного регулирования $\beta = 0,005 \dots 0,01$; сезонного регулирования $\beta = 0,1 \dots 0,3$; и для многолетнего регулирования $\beta = 0,3 \dots 0,5$.

Регулирующая способность водохранилищ ГЭС, эксплуатируемых в Республике Таджикистан приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры водохранилищ ГЭС Таджикистана

Станции	Регулирование	Полный объем, км^3	Полезный объем, км^3	Коэффициент β
Рогунская	многолетнее	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

Прогнозы речного стока на ГЭС с водохранилищами дают возможность заранее информировать о наличии холостых сбросов, и повысить эффективность ГЭС в энергетических системах. Более точные данные прогноза дают возможность назначить оптимальный режим работы водохранилища ГЭС, что достигается путем уменьшения объема холостых сбросов, повышения напора ГЭС, и тем самым увеличению выработки электрической энергии. Прогнозирование стока реки является сложней задачей, из-за большого количества факторов, которые влияют на неё: количества осадков, запаса воды в снежном покрове, и других характеристик бассейна реки.

Бассейн формирования реки Вахш, особенно в зоне до Рогунской ГЭС географически расположен так, что водохозяйственные (ирригационные) расходы практически очень малы, и они в основном используют притоки реки Вахш.

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

Средняя величина расхода реки

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где n – объем выборки.

Коэффициент вариации, отражающий относительную изменчивость:

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

Коэффициент асимметрии, характеризующий смещение распределения:

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

Расчетным маловодным или критическим называется гидрологический период, в котором при полной сработке водохранилища до УМО, ГЭС выдаёт гарантированную мощность.

Разработанный на основе алгоритмов машинного обучения программный комплекс «ML-VakhshRiver» представляет собой базу данных по гидрологическим рядам реки Вахш, которая позволяет проанализировать среднемесячные расходы реки по месяцам, сезонам и годам, она также позволяет прогнозировать сток реки Вахш в долгосрочном периоде. Программный комплекс 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»; «Изменение по сезонам» (рисунок 9); «Прогнозирование» (рисунок 10); «Работа с данными»; «О программе».

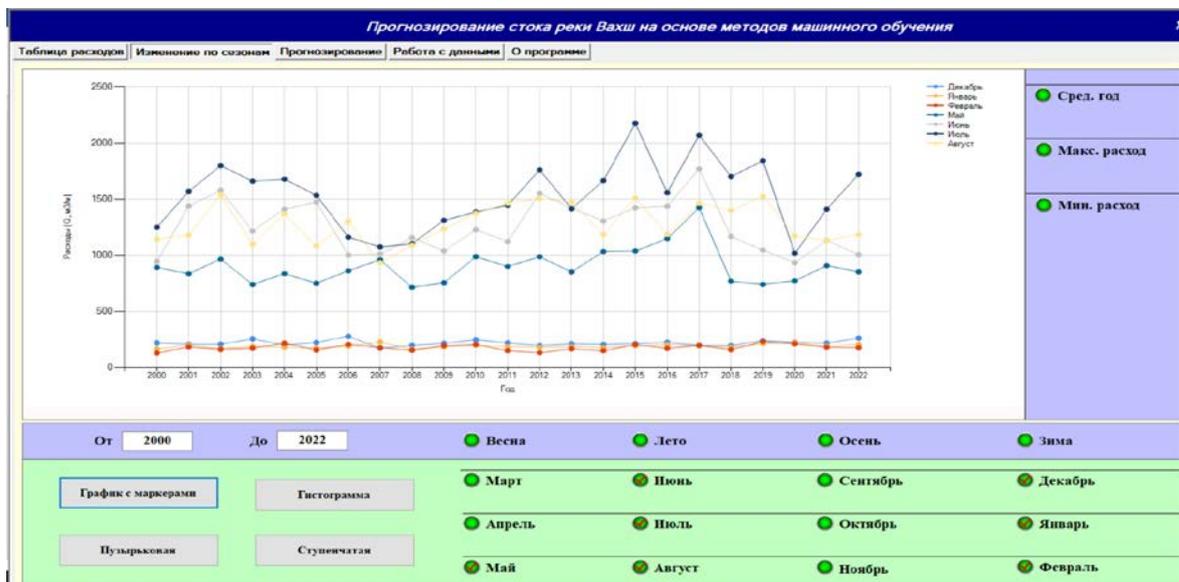


Рисунок 9 – Вкладка программы (Изменение по месяцам)

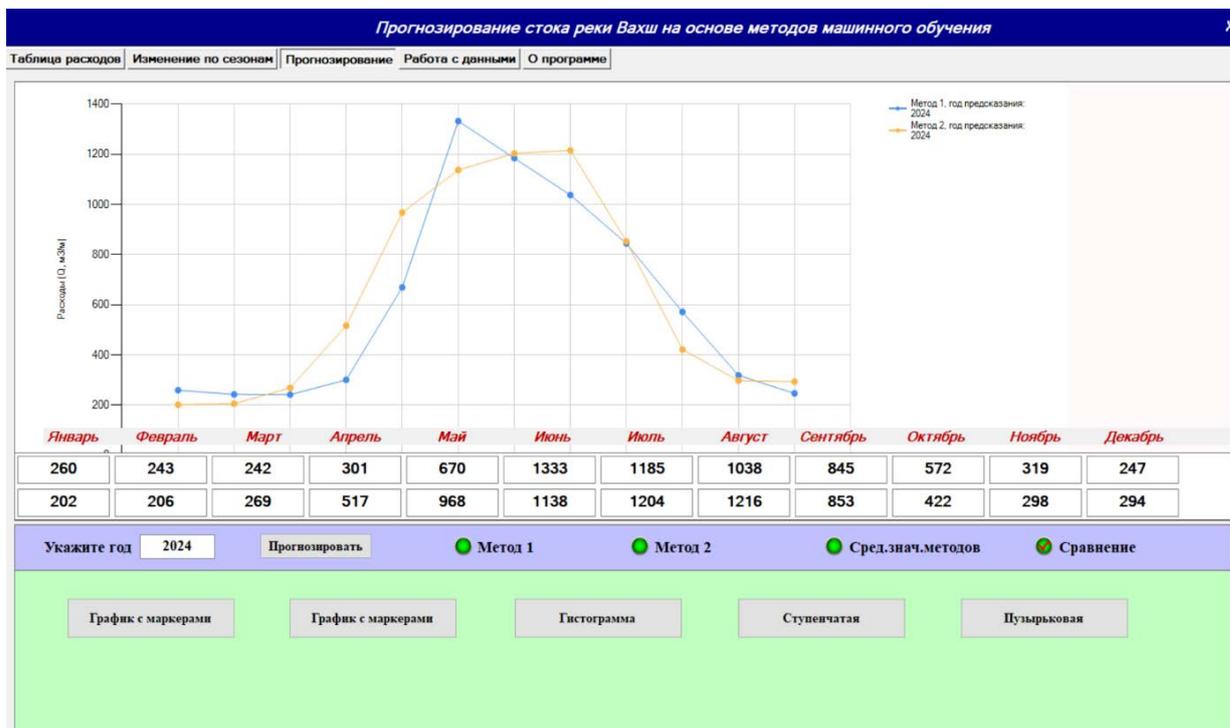


Рисунок 10 – Вкладка программы (Прогнозирование)

Графическое сравнение полученных результатов прогнозирования на основе машинного обучения с фактическими значениями притока реки Вахш приведены на рисунке 11.

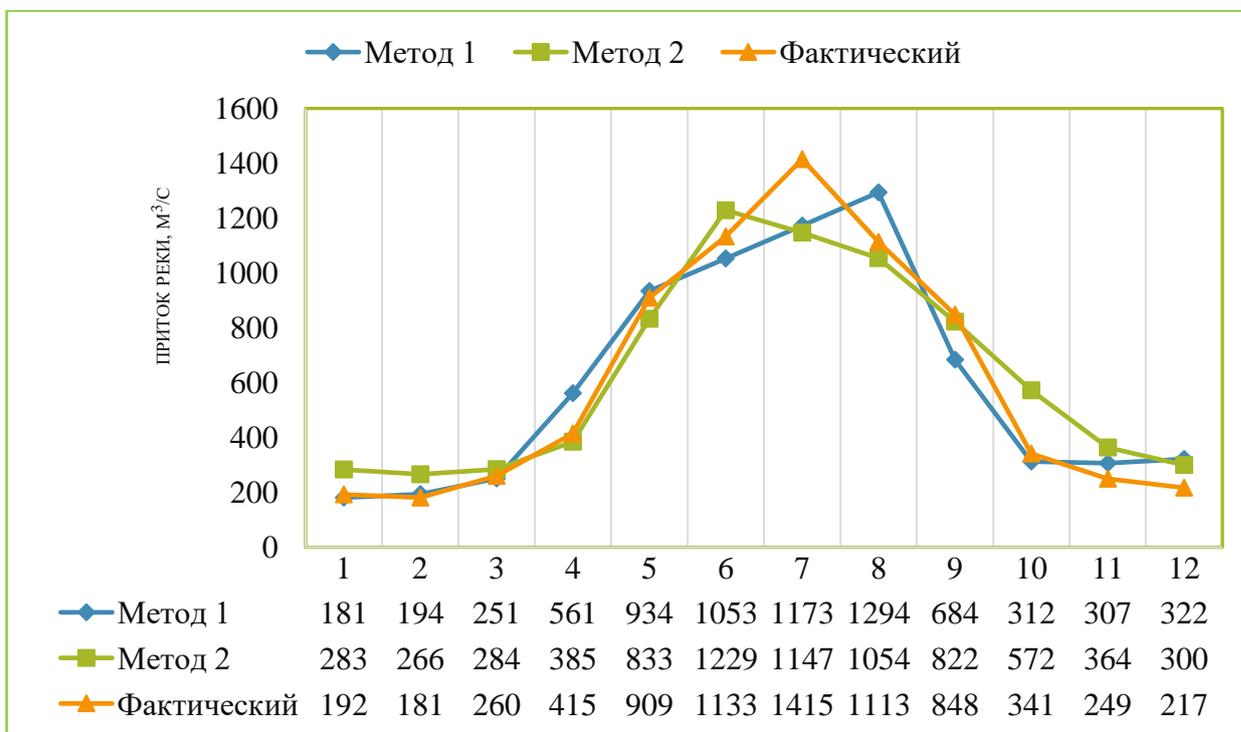


Рисунок 11 – Сравнение результатов прогнозирования с фактическими значениями

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. Метрики, используемые для оценки прогноза стока реки Вахш приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Метрики оценки прогноза стока реки Вахш

Прогноз по первому методу				Прогноз по второму методу			
$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\frac{ Q_t - Q_t^* }{Q_t}$	$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\frac{ Q_t - Q_t^* }{Q_t}$
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 по сравнению с традиционными методами прогнозирования. Разработанный на основе методов машинного обучения программный комплекс позволяет делать более достоверный прогноз речного стока, которая в свое очередь является важным при оптимизации режимов работы каскада ГЭС, эксплуатируемых на реке Вахш, особенно Рогунской ГЭС в условиях климатических и гидрологических изменений.

В третьей главе «*Оптимизация долгосрочных режимов работы ГЭС Вахшского каскада с вводом в эксплуатацию Рогунской ГЭС*» рассмотрена методика диспетчерского управления режимами ГЭС и на основе результатов прогнозирования решена задача долгосрочного оптимального управления. Разработаны диспетчерские графики для Рогунской ГЭС, которые формализуют правила многолетнего регулирования.

Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС и каскада ГЭС, которые имеют водохранилища представляют сложную задачу, сложность которой заключается в том, что сток реки для регулируемого периода особенно в долгосрочном периоде имеет стохастический неопределенный характер или имеют ограниченный точный прогноз. В зависимости от водохранилища и ее назначения диспетчерские графики могут иметь различные формы.

Учитывая все параметры и критерии на основе гидрологических данных рассматриваемой реки, а также используя данные, полученные при долгосрочном прогнозировании на основе машинного обучения в разработанном программном комплексе, прогнозировании стока реки Вахш, автором были построены диспетчерские

графики, которые предназначены для оптимального управления режимами водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном режиме. Разработанный диспетчерский график имеет линии ограничения по уровням (НПУ, УМО), режимные зоны эксплуатации водохранилища, которые задают оптимальные траектории сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС в зависимости от водности года, обеспечивая максимальную выработку при гарантированной надёжности. На рисунке 12 показан, разработанный автором диспетчерский график Рогунской ГЭС.

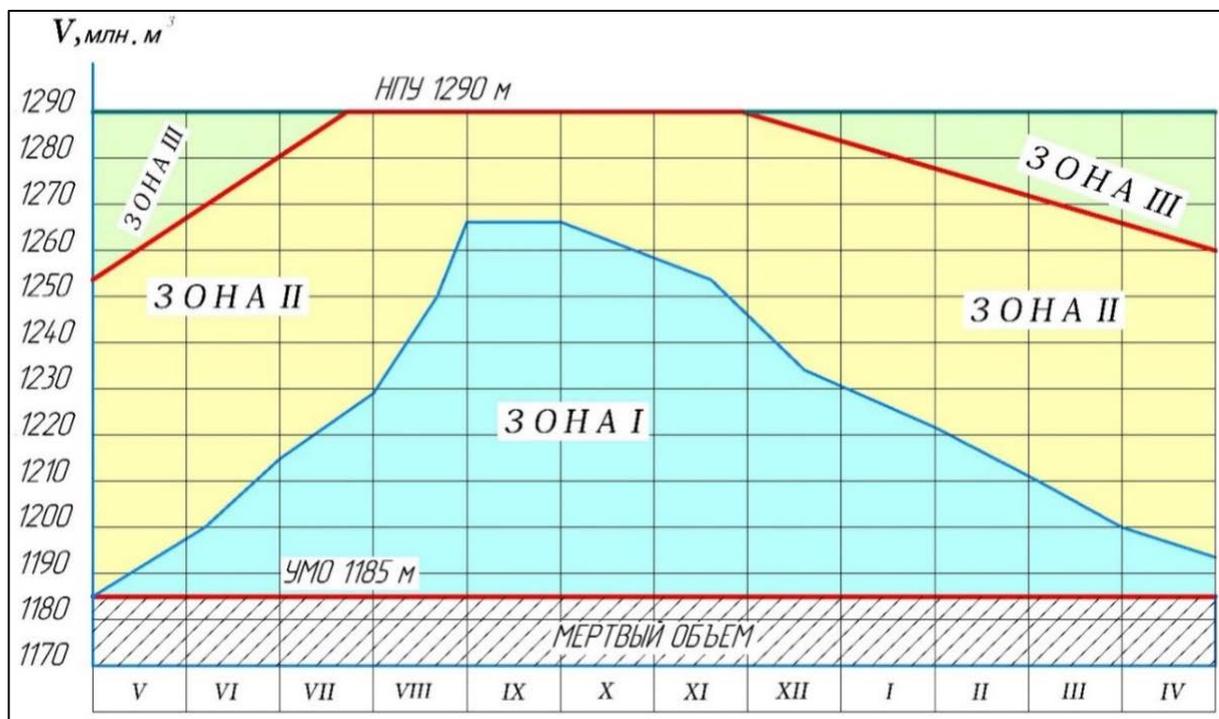


Рисунок 12 – Расчетный диспетчерский график Рогунской ГЭС

При оптимальной эксплуатации уровень воды в водохранилище будет меняться между уровнями НПУ (максимум) и УМО (минимум). **Зона I** область, где станция будет работать с мощностью ниже гарантированной. **Зона II** - станция будет работать с гарантированной мощностью. **Зона III** – зона максимальной выработки. Оптимальными считаются режимы, когда сработка и заполнение водохранилища выполняется по зоне II.

Таким образом, на основе гидрологических данных и данных долгосрочного прогнозирования стока реки Вахш разработаны диспетчерские графики Рогунской ГЭС, предназначенные для оптимальных долгосрочных режимов сработки и заполнения водохранилища, по критерию максимальной выработки электроэнергии и рационального использования водных ресурсов.

В четвертой главе «*Оптимальное краткосрочное управление режимами ГЭС каскада*» решена ключевая задача краткосрочной оптимизации. Разработаны детализированная математическая модель каскада и программное обеспечение для краткосрочного оптимального управления режимами ГЭС каскада реки Вахш.

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. Для разработки математической модели объекта исследования, необходимо схематическое расположение этих ГЭС в каскаде, что иллюстрируется на рисунке 13.

Математическая модель каскада ГЭС на реке Вахи

Целевая функция, критерий оптимизации – максимизация суммарной выработки электроэнергии:

$$F = \max W = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t .$$

Суммарная выработка электроэнергии каскада, состоящего из n станций равна сумме выработанной энергии каждой ГЭС:

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

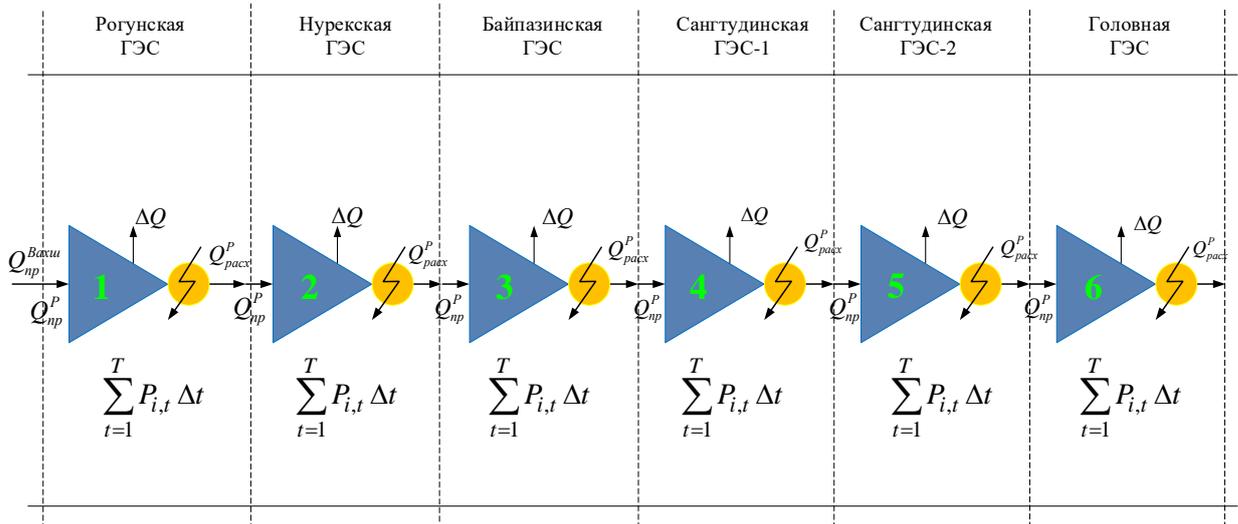


Рисунок 13 – Модель каскада ГЭС реки Вахш

Мощность каждой станции

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

где: ρ – плотность воды ($\approx 1000 \text{ кг/м}^3$), g – ускорение свободного падения (9.81 м/с^2), η_i – коэффициент полезного действия агрегата, $Q_{i,t}$ – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), $H_{i,t}$ – напор (м).

Напор H для ГЭС с водохранилищем изменяется во времени:

$$H_{i,t} = Z_{i,t}^{BB} - Z_{i,t}^{HB} ,$$

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.

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

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

Уравнения ограничений для каждой ГЭС:

По уровням водохранилища:

Для водохранилища каждой ГЭС $Z_{i,t}^{BB}$ задается максимальное $Z_{i,t}^{BB,max}$ и минимальное $Z_{i,t}^{BB,min}$ значение уровня верхнего бьефа:

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

Эквивалентно через объём водохранилища

$$V_i^{min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{max},$$

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

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:

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

Такая зависимость необходимо при водноэнергетических расчетах и при моделировании режимов работы ГЭС, также она важна при оценки изменении объёма водохранилища при изменении уровня верхнего бьефа $Z_{i,t}^{BB}$.

По мощности каждой ГЭС:

$$P_i^{min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max}.$$

По расходу воды для каждой ГЭС:

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

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

$$Q_{i,t}^{min.обяз.} \leq Q_{i,t}^{ГЭС} \leq Q_{i,t}^{сумм., max}.$$

Уравнение баланса воды

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

$$Q_{i,t}^{ГЭС} = Q_{i,t}^{рас.} = Q_{i,t}^{тур.} + Q_{i,t}^{холост.},$$

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

где: $Q_{i-1,t}^{рас.} = Q_{i-1,t}^{ГЭС}$ – приток воды предыдущей ГЭС,

$Q_{i,t}^{водох.}$ – расход воды с водохранилища: «+»-когда водохранилище срабатывается;

«-» - когда водохранилище заполняется,

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

$Q_{i,t}^{водох.}$ – значение расхода воды с водохранилища i -той ГЭС определяется по сработанному $+\Delta V_i$ или накопленному $-\Delta V_i$ объёму воды в водохранилища:

$$Q_{i,t}^{водох.} = \frac{\pm \Delta V_i}{\Delta t}; \quad \left[\frac{M^3}{c} \right],$$

«+»-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 15).

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

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

Ограничение по скорости изменения (интенсивности) уровня верхнего бьефа:

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

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.

Каждая (*i*-ая) ГЭС, работающая в каскаде реки Вахш 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 $Q_{i,t}^{водоз.}$, то есть идет сработка водохранилища $Z_{i,нач.}^{BB} > Z_{i,кон.}^{BB}$, в этом случае:

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

2. *Режим заполнения водохранилища* – когда часть притока воды идет на заполнение водохранилища, $Z_{i,нач.}^{BB} < Z_{i,кон.}^{BB}$, при этом:

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

3. *Транзитный режим* – когда расход воды из водохранилища приравнивается к притоку воды в водохранилище. В данном режиме уровень верхнего бьефа остается постоянным, $Z_{i,нач.}^{BB} = Z_{i,кон.}^{BB}$. 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 можно иллюстрировать рисунком 14.

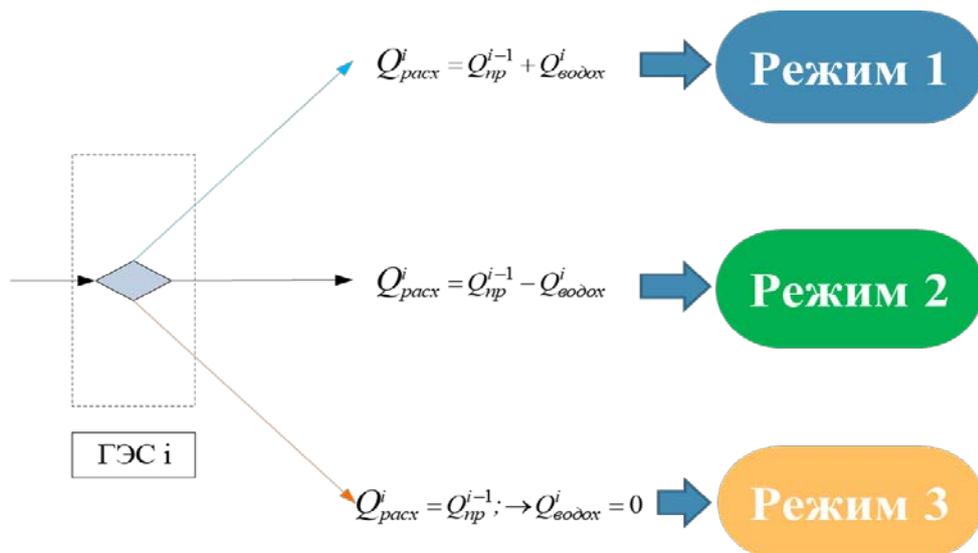


Рисунок 14 – Возможные режимы водохранилищ ГЭС

Каскад ГЭС расположенный на реке Вахш (рисунок 13) при оптимизации по предложенной математической модели и режимов водохранилищ (рисунок 14) будут работать в следующих возможных режимах: допустим ГЭС 1 на рисунке 15 – Рогунская ГЭС, будет работать по заданному графику сработки и заполнения водохранилища, то есть,

по разработанному диспетчерскому графику и расходует количество воды равное $Q_{1,t}^{ГЭС} = Q_{1,t}^{рас.}$.

На Нурекской ГЭС, водохранилище имеет годовое регулирование стока, и она может работать в трех возможных режимах, которые приведены на рисунке 14, то есть водохранилище ГЭС-2 может дополнительно к притоку сработать из собственного водохранилища, заполнять её используя часть притока или же расходовать объём воды равное притоку – работать в транзитном режиме (рисунок 15).

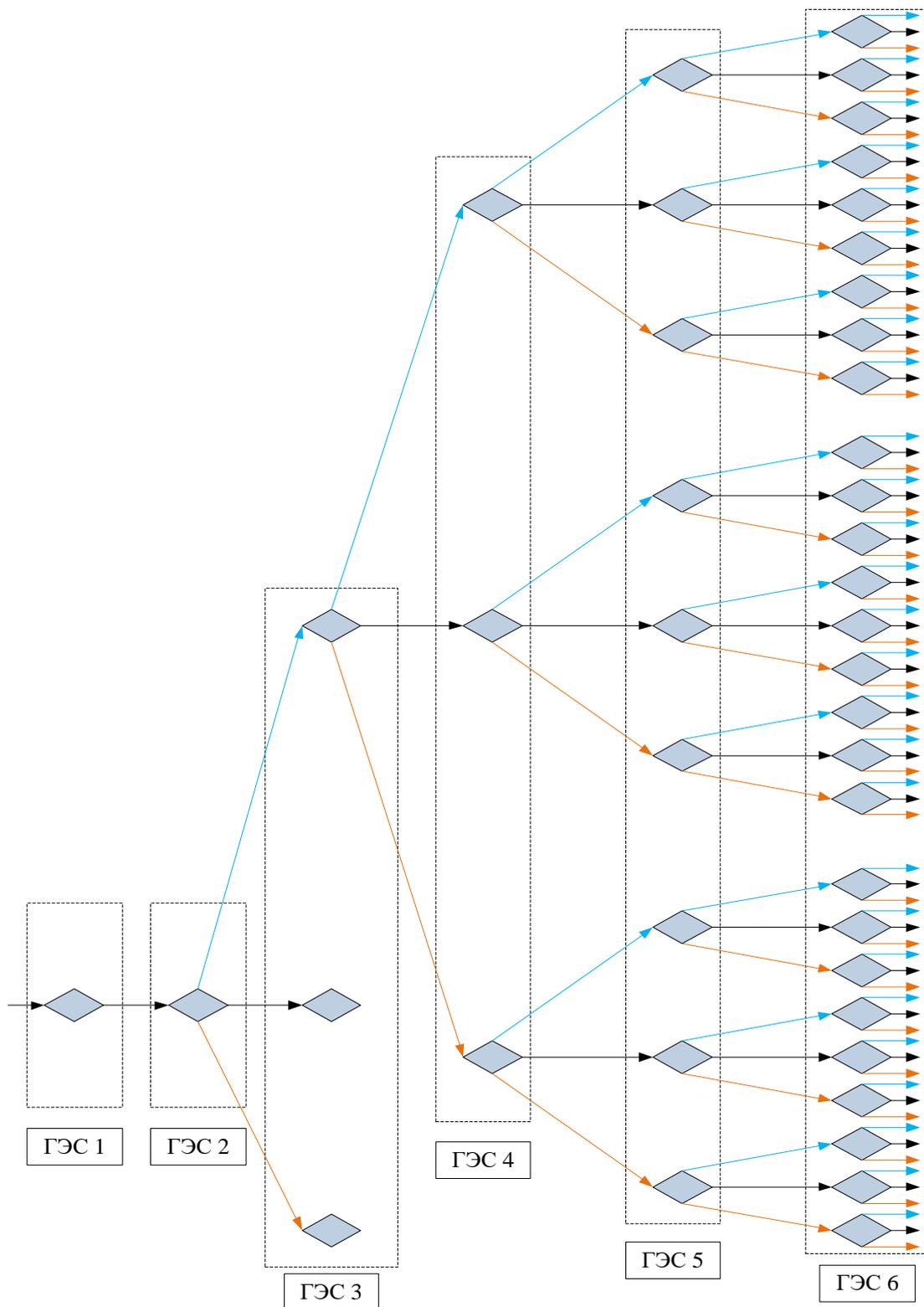


Рисунок 15 – Модель режимов ГЭС каскада реки Вахш

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 16.

Учёт трех возможных режимов каждого водохранилища, что для каскада из 6 ГЭС порождает 243 теоретически возможных комбинаций режимов.

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. Для краткосрочной оптимизации режимов работы ГЭС, работающих в каскаде реки Вахш автором, был предложен алгоритм, учитывающий все ограничения, которая подробно представлена на рисунке 16.

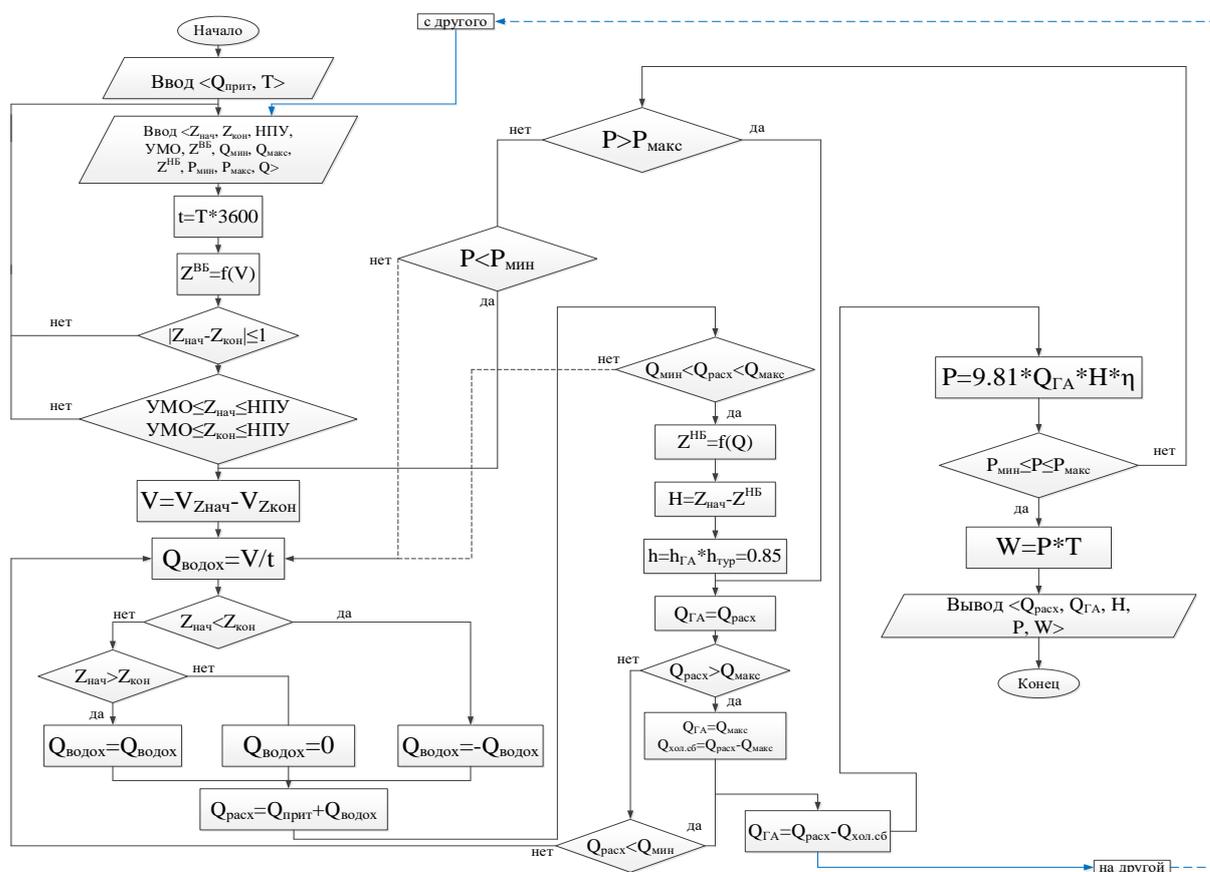


Рисунок 16 – Блок-схема алгоритма оптимального управления Вахшских ГЭС с учетом Рогунской ГЭС

Расчет начинается с притока воды на водохранилище i -й ГЭС, в начале 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 $Z_{i,нач.}^{BB}$ и $Z_{i,кон.}^{BB}$ по кривой зависимости уровня верхнего бьефа от объема $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{BB})$ определяется объем воды, расходуемый из водохранилища (или накопленный) $\pm \Delta V_i$. После определяется расход воды из водохранилища $Q_{i,t}^{водох.}$. Здесь и в зависимости от заданной $Z_{i,нач.}^{BB}$ и $Z_{i,кон.}^{BB}$ определяется что, в каком из режимах будет

работать данная ГЭС. В зависимости от расхода воды на нижний бьеф по кривой нижнего бьефа $Z^{НБ} = f(Q)$ определяется уровень нижнего бьефа. По значениям уровней верхнего и нижнего бьефов определяется напор $H_{i,t}$. Далее определяется коэффициент полезного действия гидроагрегата η_i , мощность ГЭС P и выработка электроэнергии W .

Для решения задачи краткосрочной оптимизации на основе методов линейного программирования разработаны программное обеспечение для ЭВМ «Оптимизация режимов работы электростанций Вахшского каскада» (Свидетельство RU2025618934) и база данных (Свидетельство №1202400529).

На рисунках 17 и 18 приведены вкладки разработанной программы, реализованной на основе алгоритма, представленной на рисунке 16.

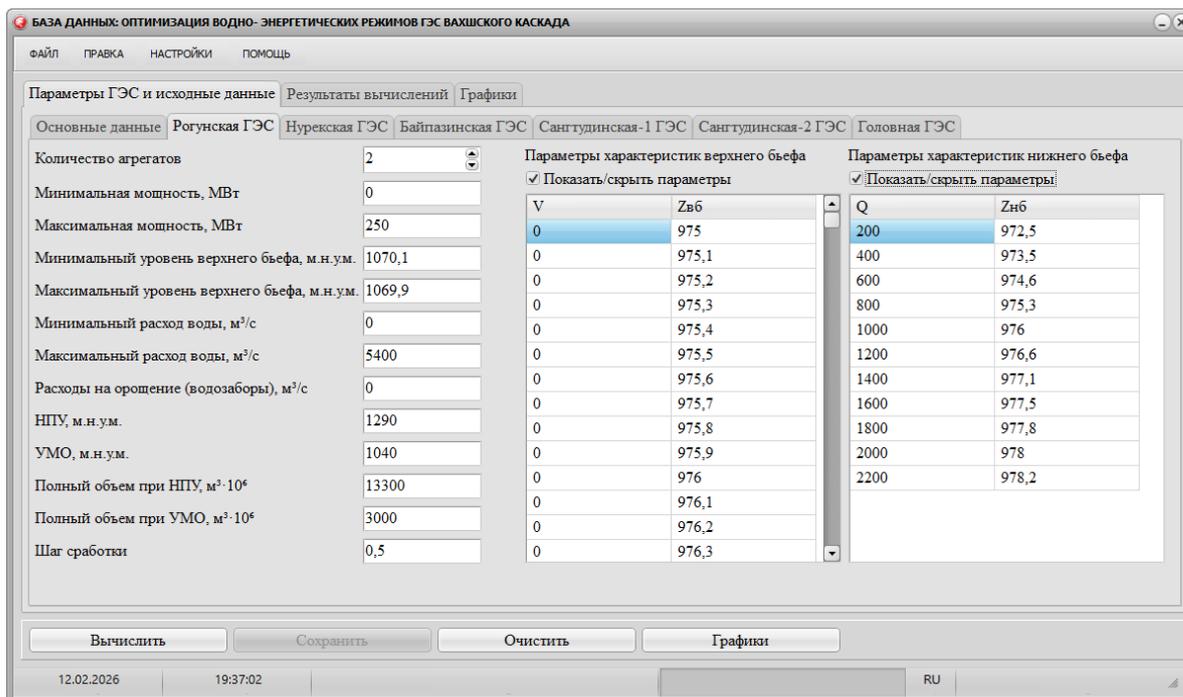


Рисунок 17 – Вкладка программы -«Параметры ГЭС и исходные данные»

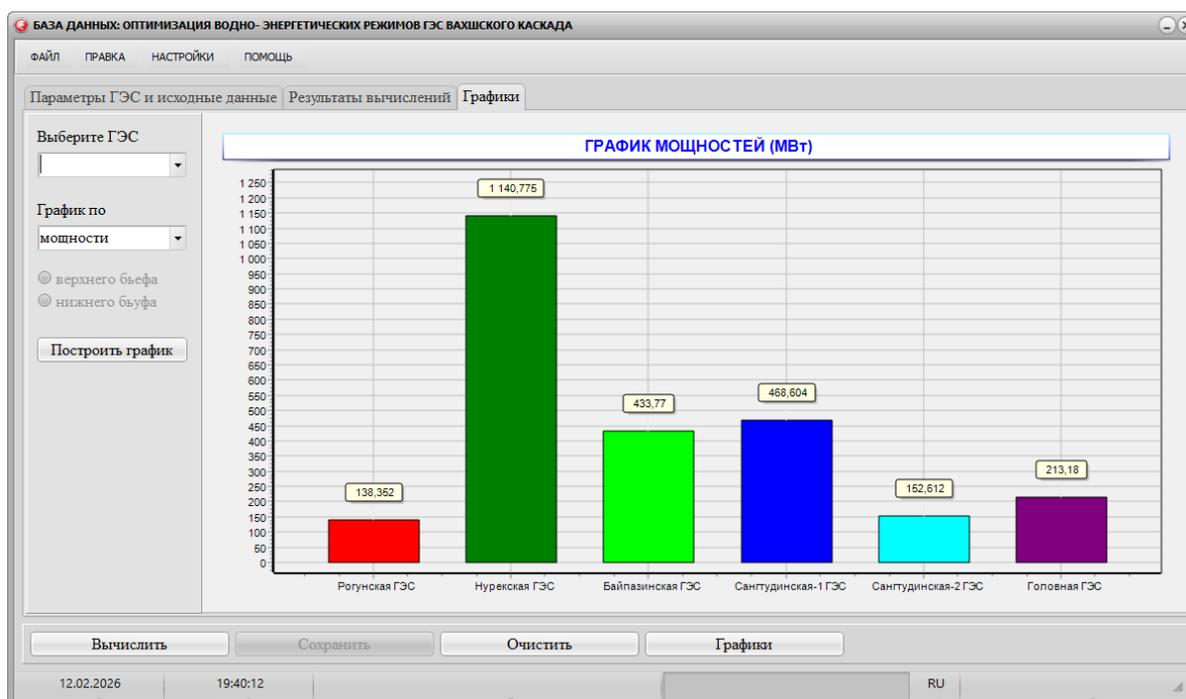


Рисунок 18 – Вкладка программы - «Графики»

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. 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.

Полученные результаты при оптимальной суточной работе ГЭС каскада реки Вахш приведены на рисунках 19 и 20.

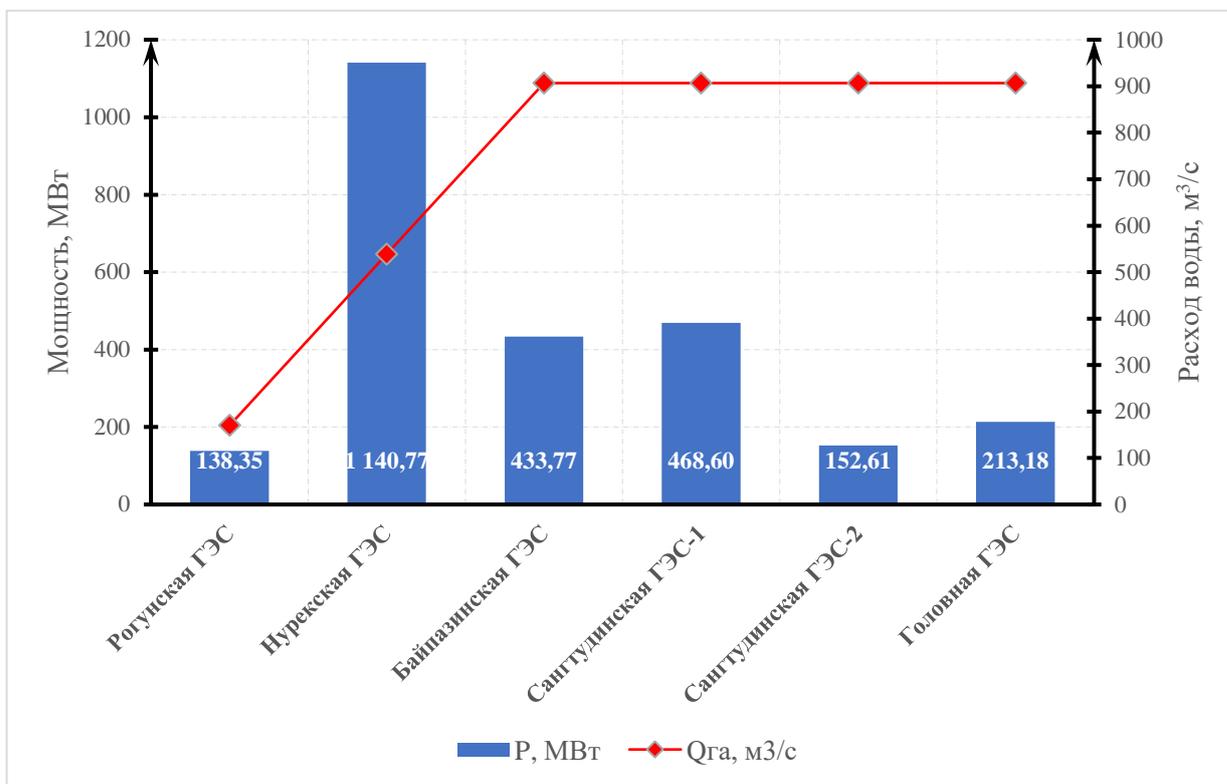


Рисунок 19 – Суточная мощность и расход воды ГЭС каскада Вахш

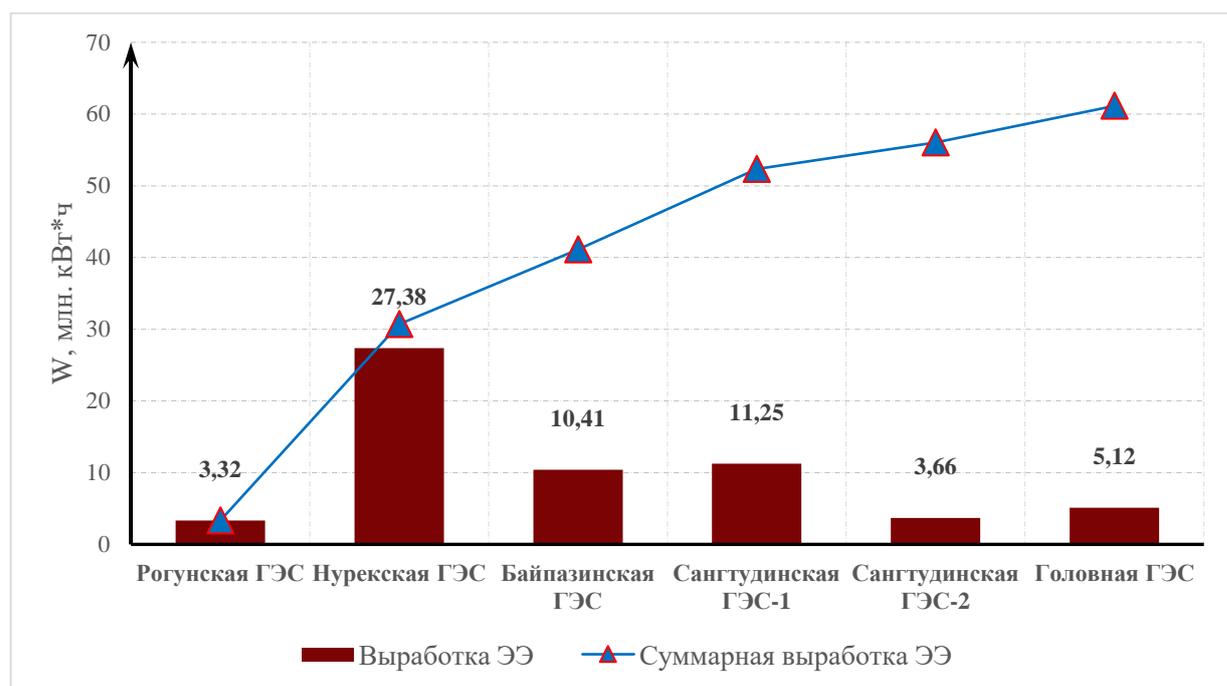


Рисунок 20 – Выработка электроэнергии и суммарная выработка ГЭС каскада

На основе предложенных моделей 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.

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:

Общие 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидроэнергетика: учебное пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. - 2-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 620 с.
2. Цветков Е.В., Алабышева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные режимы электростанций в энергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с.
3. АСУ и оптимизация режимов энергосистем: Учеб. пособие для студентов вузов / Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк. 1983. – 208 с.
4. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы: монография / Ю. А. Секретарев. – Новосибирск, НГТУ, 2007. – 308 с.
5. Тягунов, М.Г. Управление режимами ГЭС. - М.: МЭИ, 1984.
6. Александровский, А. Ю. Теория и методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС: специальность 05.14.10: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александровский Алексей Юрьевич. – Москва, 1991. – 257 с.
7. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина; Новосибирск, 2007. – 356 с.
8. Ахророва А.Д., Аминджанов Р.М., Доронкин К.А. Энергетика Таджикистана: современные тенденции и перспективы устойчивого развития. Душанбе, 2005. 238 с.
9. 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.
10. Колебания температуры и осадков в верховьях бассейна реки Вахш / А. А. Гулахмадов // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 3(188). – С. 152-164.
11. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах = Optimal management of HPP regimes in electric power systems: монография / Ю. А. Секретарев, Ш. М. Султонов. – Душанбе: ТТУ им. акад. М. С. Осими, 2020. – 144 с. – 300 экз. ISBN 978-99975-1-240-6.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

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-А]. **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-А]. **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-А]. **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-А]. **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-А]. **Mirzosharif Rajabov.** Factors Influencing the Determination of the Gyrosures Potential of Small Rivers / Alifbek Kirgizov, Sherkhon Sultonov, 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-А]. **Mirzosharif Rajabov.** Vibration Analysis of Large Hydropower Units under Different Operating Conditions / Ilhom Mahmudov; Sherkhon Sultonov; 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 // Радиотехника, 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 использования 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.

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

**ДОНИШГОҶИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С. ОСИМӢ**

ВБД: 621.311;

Бо ҳуқуқи дастнавис



РАҶАБЗОДА МИРЗОШАРИФ ШАРИФ

(РАҶАБОВ МИРЗОШАРИФ ШАРИФОВИЧ)

**ОПТИМИЗАТСИЯИ РЕҶАҶОИ КОРИИ
СИЛСИЛАИ НБО-и ВАХШ БАӢДИ БА ИСТИФОДА
ДОДАНИ НБО РОӢУН**

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа
(PhD) - доктор аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи электрикӣ
(6D071804 - Системаҳо ва комплексҳои энергетикӣ)

Душанбе – 2026

Диссертатсия дар кафедраи нерӯгоҳҳои электрикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ:

Султонзода Шерхон Муртазо

номзади илмҳои техникӣ, дотсент, мудири кафедраи нерӯгоҳҳои электрикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Муқарризони расмӣ:

Русина Анастасия Георгиевна

доктори илмҳои техникӣ, дотсент, декани факултети энергетика, мудири кафедраи нерӯгоҳҳои электрикии Донишгоҳи давлатии техникии Новосибирск, ш. Новосибирск, Федератсияи Россия

Давлатов Азамчон Маҳмадиевич

номзади илмҳои техникӣ, мудири кафедраи нерӯгоҳҳои электрикии Донишқадаи энергетикаи Тоҷикистон, н. Кушонӣн

Муассисаи пешбар:

Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Ҷимояи диссертатсия санаи «24» апрели соли 2026, соати 14:00 дар ҷаласаи шурои диссертатсионии 6D.КOA-049 назди Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ, дар суроғай: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Рачабовҳо, 10а баргузор мегардад.

Бо диссертатсия ва автореферати он дар китобхона ва сомонаи Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ <https://www.ttu.tj> шинос шудан мумкин аст.

Автореферат санаи «_____» _____ соли 2026 ирсол шудааст.

Котиби илмӣ

Шурои диссертатсионӣ,
номзади илмҳои техникӣ, дотсент



Давлатшоев Р.А.

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзун таҳқиқот. Рушди устувори кишварҳое, ки дорои захираҳои бузурги гидроэнергетикӣ мебошанд, аз ҷумла Ҷумҳурии Тоҷикистон, бо гидроэнергетика зич алоқаманд аст, зеро он дар айни замон рушдэфтатарин ва наъби асосии манбаъҳои барқароршавандаи энергия (МБЭ) дар ҷаҳон ба ҳисоб меравад. Тибқи маълумоти Агентии байналмилалӣ энергетикӣ (IEA), Ассотсиатсияи байналмилалӣ гидроэнергетикон (IHA), Агентии байналмилалӣ оид ба манбаъҳои барқароршавандаи энергия (IRENA) ва маркази таҳлили Ember, соли 2024 истеҳсоли нерӯи барқ дар ҷаҳон тақрибан 30929 ТВт*соатро ташкил дода, ҳиссаи нерӯи барқе, ки дар асоси МБЭ истеҳсол шудааст, 9837 ТВт*соат ё тақрибан 31,8% буд. Аз ин миқдор 14,3% ба ҳиссаи нерӯгоҳҳои барқи обӣ (НБО) рост меояд. Таваҷҷуҳи муқарраршудаи НБО дар ҷаҳон низ мунтазам афзоиш меёбад: агар соли 2000 он 702 ГВт-ро ташкил медод, пас соли 2024 ин нишондиҳанда ба 1443 ГВт расида, 4578 ТВт*соат нерӯи барқ истеҳсол намудааст.

Тоҷикистон дорои иқтисодии бузурги гидроэнергетикӣ мебошад, ки 527×10^9 кВт*соат дар як солро ташкил дода, тақрибан се маротиба аз истеъмоли ҷорӣ нерӯи барқи тамоми кишварҳои минтақаи Осиёи Марказӣ зиёд аст. Захираҳои гидроэнергетикӣ кишвар асосан дар ҳавзаҳои дарёҳои Вахш, Панҷ, Амударё, Қофарниҳон ва Зарафшон мутамарказ шудаанд. Дар сохтори истеҳсоли нерӯи барқ дар кишвар ҳиссаи гидроэнергетика зиёда аз 95%-ро ташкил медиҳад. Соли 2024 дар ҷумҳурӣ аз ҳисоби НБО тақрибан 21×10^9 кВт*соат нерӯи барқ истеҳсол гардидааст.

Комплекси гидроэнергетикӣ силсилаи Вахш дар системаи энергетикӣ Тоҷикистон нақши калидӣ бозида, зиёда аз 90 %-и истеҳсоли нерӯи барқи кишварро таъмин менамояд. Ба истифода додани нерӯгоҳи барқи оби Роғун – бузургтарин иншооти энергетикӣ дар Осиёи Марказӣ – фаъолияти силсиларо ба таври ҷиддӣ тағйир дода, шароити навро барои идоракунии ҳамравандҳои энергетикӣ ва ҳам хоҷагии об фароҳам меорад.

Нерӯгоҳи барқи оби Роғун бо иқтисодии умумии муқарраршудаи 3780 МВт бузургтарин нерӯгоҳ дар Тоҷикистон гардида, истеҳсоли миёнаи солони он тақрибан 17 млрд. кВт*соатро ташкил хоҳад дод. Бо ба истифода додани ин нерӯгоҳ амалан имконияти пурраи азхудкунии иқтисодии гидроэнергетикӣ дарёи Вахш, инчунин танзими самараноки ҷараёни оби ҳавзаи дарёи Амударё фароҳам мегардад.

То имрӯз ду гидроагрегати НБО Роғун ба истифода дода шудаанд. Гидроагрегати аввал бо иқтисодии 360 МВт 16 ноябри соли 2018 ва гидроагрегати дуюм бо иқтисодии 400 МВт 9 сентябри соли 2019 мавриди истифода қарор гирифтанд. Сохтмони нерӯгоҳи идома дошта, ба нақша гирифта шудааст, ки гидроагрегати сеюм дар солҳои наздик ба истифода дода шавад. Ҳамзамон бояд қайд намуд, ки корҳои таҷдид (реабилитатсия) дар НБО Сарбанд анҷом ёфта, дар НБО Норақ айни замон корҳои бозсозӣ идома доранд. Рушди иқтисодии гидроэнергетикӣ ба Тоҷикистон имкон медиҳад, ки ба пешсафи минтақавӣ дар истеҳсол ва транзити нерӯи барқи арзон ва аз лиҳози экологӣ тоза табдил ёбад.

Ба истифода додани НБО Роғун бо танзими бисёрсолаи ҷараёни дарё, сохтор ва динамикаи силсилаи Вахшро, ки асоси системаи электроэнергетикӣ (СЭЭ) Тоҷикистон мебошад, ба таври қуллӣ тағйир медиҳад. Идоракунии ҷунин комплекси мураккаби техникӣ, ки шаш нерӯгоҳи барқи оби пайдарпай ҷойгиршударо бо қобилиятҳои гуногуни танзими ҷараёни об дар бар мегирад, масъалаи илмӣ-техникӣ дорои андозаи баланди мураккаб ба ҳисоб меравад.

Ин масъала бо омилҳои зерин муайян мегардад:

1. Мураккабии системавӣ: зарурати оптимизатсияи ҳамзамони речаи кори якҷанд иншооти гидравликӣ бо ҳам алоқаманд (вобаста).
2. Сатҳи баланди номуайяний: хусусияти стохастикӣ параметри асосии гидрологӣ – ҷараёни оби дарёи Вахш, ки динамикаи он зери таъсири тағйирёбии иқлим боз ҳам мураккаб мегардад.
3. Хусусияти омехтаи маҳдудиятҳо: мавҷудияти маҳдудиятҳои хаттӣ, ғайрихаттӣ ва дискретӣ.

Усулҳои мавҷудаи идоракунии аксаран ин омилҳоро ба таври пурра ба назар намегиранд, ки боиси талафоти иқтисодии эҳтимолии истеҳсоли нерӯи барқ ва паст шудани эътимоднокии таъминоти энергетикӣ мегардад. Масъалаи илмӣ дар синтези методологияи комплексӣ ифода меёбад, ки усулҳои пешгуи қаторҳои вақти стохастикӣ ва усулҳои детерминии оптимизатсияро барои низоми бисёрбӯъектӣ муттаҳид намуда, ҳадафи он ба ҳадди аксар расонидани самарани интегралҳои энергетикӣ мебошад.

Аз ин рӯ, аҳамияти таҳқиқоти мазкур бо зарурати таҳия ва татбиқи усулҳои аз лиҳози илмӣ асосноки оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи нерӯгоҳҳои барқи обии Вахш муайян мегардад, ки хусусиятҳои танзими бисёрсоларо, тағйирёбии гидрологӣ ва параметрҳои техникий НБО-ро ба назар мегиранд. Натиҷаҳои таҳқиқот ба: баланд бардоштани самаранокӣ ва эътимоднокии фаъолияти системаи энергетикӣ Тоҷикистон; афзоиши истеҳсоли нерӯи барқ; беҳтар гардидани идоракунии захираҳои об ва коҳиш додани хавфи норасоии мавсимии энергетикӣ мусоидат хоҳанд кард.

Ҳамин тариқ, таҳияи методологияи комплекси математикӣ-алгоритмӣ барои идоракунии оптималии бисёрсатҳии силсила дар шароити нав вазифаи ниҳоят муҳим барои таъмини амнияти энергетикӣ ва рушди устувори Ҷумҳурии Тоҷикистон ба ҳисоб меравад.

Дарачаи таҳқиқи мавзӯи илмӣ.

Дар рушди назария, анҷоми таҳқиқот ва таҳияи усулу алгоритмҳои оптимизатсияи идоракунии речаҳои кори нерӯгоҳҳои барқи обӣ дар системаҳои электроэнергетикӣ саҳми назаррасро коллективҳои Институти умумииттифоқии таҳқиқоти илмӣ энергетика (ВНИИЭ), Институти системаҳои энергетикӣ ба номи Мелентеви Шуьбаи сибирӣ Академияи илмҳои Русия (ИСЭМ СО РАН), Институти энергетикӣ Москва (МЭИ), Донишгоҳи давлатии техникий Новосибирск (НГТУ), Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ, инчунин як қатор ташкилотҳои дигар гузоштаанд.

Дар даҳсолаҳои охир ба масъалаҳои таҳияи усулҳо ва равишҳои самаранокӣ идоракунии речаҳои кори системаҳои гидроэнергетикӣ таваччуи зиёд зоҳир гардидааст. Саҳми муҳим дар ташаккули асосҳои назариявӣ ва ҳалли амалии ин соҳа аз ҷониби як қатор муҳаққиқон гузошта шудааст, аз ҷумла Т.А. Филиппова [1], Е.В. Светков [2], Д.А. Арзаматсев [3], М.Ш. Мисриханов, Б.И. Аюев, В.М. Горнштейн, В.И. Обрезков, Ю.А. Секретарев [4], М.Г. Тягунов [5], С.Н. Никитин, А.Ш. Резниковский, М.И. Рубинштейн, А.Ю. Александровский [6], А.Г. Русина [7], П.С. Борш, О. Fosso, R.K. Swain, Wang C., Shang L., инчунин олимони ватанӣ А.Д. Ахророва [8], Г.Н. Петров [9], С.Т. Наврузов, А.А. Гулаҳмадов [10], Ш.М. Султонзода [11] ва дигарон.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзӯҳои илмӣ.

Таҳқиқоти илмӣ дар доираи кори диссертатсионӣ ба талаботи меъёрии як қатор стратегияҳо ва барномаҳои стратегӣ мутобиқат мекунад, аз ҷумла: Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030 (№392 аз 01.10.2016 с.), Қонуни Ҷумҳурии Тоҷикистон «Дар бораи энергетика» (№1909 аз 19.07.2022 с.), Стратегияи рушди «иктисоди сабз» дар Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2023–2037 (№482 аз 30.09.2022 с.), Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 30 июли соли 2020, №427 «Дар бораи Нақшаи чорабиниҳо барои солҳои 2020–2025 ҷиҳати татбиқи эълон гардидани солҳои 2020–2040 ҳамчун “Бистсолаи омӯзиш ва рушди илмҳои табиӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илм ва маориф”», Консепсияи ташаккули Ҳукумати электронӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон (№643 аз 30.12.2011 с.), инчунин ба Ҳадафҳои рушди устувори Созмони Милали Муттаҳид дар баҳши таъмини дастрасӣ ба энергияи арзон ва тоза мутобиқ мебошад.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот – баланд бардоштани самаранокӣ ва эътимоднокии системаи энергетикӣ Тоҷикистон тавассути таҳия ва татбиқи маҷмӯи моделҳои математикӣ, алгоритмҳо ва таъминоти барномавӣ барои идоракунии оптималии бисёрсатҳии речаҳои кори силсилаи Вахш бо дарназардошти ба истифода додани нерӯгоҳи барқи обии Роғун мебошад.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба ҳадафи гузошташуда дар доираи таҳқиқоти мазкур вазифаҳои зерин муайян карда шуданд:

1. Гузаронидани таҳлили системавии силсилаи Вахш ҳамчун комплекси ягонаи технологӣ ва анҷом додани баррасии интиқодии усулҳои оптимизатсия дар гидроэнергетика;

2. Таҳия ва верификатсияи модели пешгӯии дарозмуддати чараёни оби дарёи Вахш дар асоси алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ;

3. Дар асоси сценарияҳои пешгӯишуда таҳия намудани чадвалҳои таҳияшудаи танзимгарӣ барои идоракунии дарозмуддати речаҳои обанбори танзими бисёрсолаи НБО Роғун;

4. Таҳия намудани модели муфассали математикӣ барои силсилаи НБО-и Вахш чихати ҳалли масъалаҳои оптимизатсияи кӯтоҳмуддат бо дарназардошти ҳамаи маҳдудиятҳои техникӣ ва гидравликӣ;

5. Таҳия намудани алгоритми самаранок ва маҷмӯи амалии барномавӣ барои ҳалли масъалаи оптимизатсияи кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш бо дарназардошти НБО Роғун.

Объекти таҳқиқоти кори диссертатсионӣ нерӯгоҳҳои барқи обие мебошанд, ки дар силсилаи дарёи Вахш дар шароити нави истифода пас аз ба кор даромадани нерӯгоҳи барқи обии Роғун фаъолият мекунанд.

Мавзӯи таҳқиқот моделҳои математикӣ, алгоритмҳо ва маҷмӯаҳои барномавӣ барои идоракунии бисёрсатҳии речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш мебошанд, ки усулҳои пешгӯӣ, оптимизатсияи дарозмуддат ва кӯтоҳмуддатро дар бар мегиранд.

Асосҳои назариявии таҳқиқот. Дар кори диссертатсионӣ барои пешгӯии чараёни оби дарё усулҳои истифода шудаанд, ки ба алгоритмҳои муосири омӯзиши мошинӣ асос ёфтаанд; барои оптимизатсияи дарозмуддат ва кӯтоҳмуддати речаҳои силсилаи НБО-и дарёи Вахш бошад, усулҳои моделсозии математикӣ пешниҳод гардидаанд.

Навгониҳои илмӣ кори диссертатсионӣ дар нуқтаҳои зерин ифода меёбад:

1. Схемаи оптималии бисёрсатҳии идоракунии речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш ҳамчун масъалаи идоракунии системаи мураккаби техникӣ бо маҳдудиятҳои омехта ва параметрҳои воридотии стохастикӣ сохторбандӣ ва формализатсия карда шудааст.

2. Дар доираи оптимизатсияи дарозмуддат схемаи дусатҳӣ пешниҳод ва татбиқ гардидааст. Дар сатҳи аввал модели гибридӣ барои пешгӯии чараёни оби дарёи Вахш дар асоси омӯзиши мошинӣ таҳия шуда, бартарии он нисбат ба усулҳои анъанавӣ нишон дода шудааст. Дар сатҳи дуюм, дар асоси маълумоти пешгӯишуда чадвалҳои диспетчерӣ барои НБО Роғун таҳия гардидаанд, ки стратегияи танзими бисёрсоларо дар шакли минтақаҳои речаҳои иҷозатдодашуда формализатсия менамоянд.

3. Дар доираи оптимизатсияи кӯтоҳмуддат барои силсилаи Вахш модели муфассали математикӣ дар шакли масъалаи барномарезии хаттии андозаи калон таҳия шудааст, ки алоқаи гидравликӣ, маҷмӯи маҳдудиятҳо аз рӯи сатҳҳо, сарфҳо ва иқтидорҳо барои ҳар як НБО, инчунин се речаи эҳтимолии кори ҳар як обанборро ба назар мегирад, ки то 243 комбинатсияи сохтории речаҳо барои тамоми силсиларо ба вучуд меорад.

4. Бо мақсади таъмини алгоритмӣ ва барномавии масъалаҳои гузошташуда маҷмӯаҳои махсуси барномавӣ ва пойгоҳҳои додаҳо таҳия ва ба қайд гирифта шудаанд, ки методологияи пешниҳодшударо амалӣ менамоянд: а) «ML-VakhshRiver» – барои пешгӯии чараёни оби дарё; б) барои идоракунии кӯтоҳмуддат алгоритми «Оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш», ки ҷустуҷӯи пайдарпайи речаҳои иҷозатдодашударо бо дарназардошти маҳдудиятҳо амалӣ намуда, варианти оптималиро аз рӯи меъёри ҳадди аксари истеҳсоли нерӯи барқ интихоб мекунад.

Нуқтаҳои ба ҷимоя пешниҳодшаванда:

1. Меъморӣ, алгоритмҳо ва натиҷаҳои фаъолияти маҷмӯи барномавӣ барои пешгӯии дарозмуддати чараёни оби дарёи Вахш дар асоси омӯзиши мошинӣ, ки дақиқии баландтари пешгӯиро таъмин менамояд.

2. Маҷмӯи ҷадвалҳои танзимгарӣ барои НБО Роғун, ки формализатсияи стратегияи оптималии танзими бисёрсола дар асоси сенарияҳои пешгуишуда мебошанд.

3. Модели математикӣ, алгоритмҳо ва маҷмӯи барномавӣ барои оптимизатсияи кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО, ки тақсимои оптималии иқтидор ва сарфи обро бо дарназардошти ҳамаи маҳдудиятҳои истифода аз рӯи меъёри ҳадди аксар гардондани истеҳсоли шабонарӯзии нерӯи барқ таъмин менамоянд.

Аҳаммияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот.

Аҳаммияти назариявӣ дар рушди усулҳои таҳлили системавӣ ва моделсозии математикӣ барои идоракунии речаҳои мураккаби силсилаи НБО, инчунин дар мутобиқсозии усулҳои омӯзиши мошинӣ ба масъалаҳои пешгуиши дарозмуддати чараёни оби дарё дар шароити тағйирёбии иқлим зоҳир мегардад.

Аҳаммияти амалӣ бо татбиқи натиҷаҳои зерин тасдиқ мегардад:

1. Барномаи дар асоси омӯзиши мошинӣ таҳияшуда барои пешгуиши чараёни оби дарёи Вахш метавонад ҳангоми оптимизатсияи дарозмуддати речаҳои кори НБО ва банақшагирии истеҳсоли нерӯи барқӣ тамоми силсилаи истифода шавад.

2. Ҷадвалҳои танзимгарии сохташуда имкон медиҳанд, ки речаҳои ҳолӣ қардан ва пур намудани обанбори НБО Роғун дар фосилаи дарозмуддати вақт оптимизатсия гардад ва метавонанд дар ҚСҚ «Барқи Тоҷик» татбиқ шаванд.

3. Алгоритми пешниҳодшуда ва таъминоти барномавии барои оптимизатсияи речаҳои кӯтоҳмуддати кори силсилаи НБО-и Вахш таҳияшуда дар омодакунии донишҷӯён ва магистрантон аз рӯи ихтисоси «Нерӯгоҳҳои барқӣ» ҳангоми омӯзиши фанҳои «Оптимали намудани системаҳои электроэнергетикӣ», «Речаҳои кори нерӯгоҳҳо ва системаҳои электроэнергетикӣ» ва «Дастгоҳҳои гидроэнергетикӣ» дар Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ истифода мешаванд.

Дарчаи эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсия.

Муқарраротҳои илмӣ, ҳулосаҳо ва тавсияҳо, ки дар диссертатсия пешниҳод шудаанд, бо маълумоте асоснок қарда шудаанд, ки ҳангоми анҷом додани ҳисобҳои речаҳои кори силсилаи НБО-и дарёи Вахш ба даст оварда шудаанд. Илова бар ин, эътимоднокии натиҷаҳои ҳосилшуда бо истифодаи дурусти дастгоҳи математикӣ, инчунин бо татбиқи воситаҳои муосири барномасозӣ, аз ҷумла Delphi ва Python, тасдиқ мегардад. Муқоисаи маълумоти ҳисобӣ бо баҳодихиҳои таҳлилии мувофиқат ва беихтилоф будани ҳулосаҳоро нишон медиҳад.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ.

Диссертатсия мутобиқи бахшҳои зерини Шиносномаи номгуи ихтисосҳои қарандони илмӣ иҷро шудааст: аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Системаҳо ва комплексҳои энергетикӣ). Дар диссертатсия муқарраротҳои илмӣ ба самтҳои таҳқиқоти ихтисоси 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Системаҳо ва комплексҳои энергетикӣ) алоқаманд мебошанд. Аз ҷумла:

- **банди 1 «Таҳияи асосҳои илмӣ...»** – дар доираи таҳқиқоти диссертатсионӣ алгоритмҳо барои оптимизатсияи кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш таҳия шудаанд;

- **банди 2 «Моделсозии математикӣ...»** – дар қор модели пешгуиши дарозмуддати чараёни оби дарё ва модели математикӣ барои силсилаи дарёи Вахш ҷиҳати оптимизатсияи речаҳои кӯтоҳмуддат таҳия гардидааст;

- **банди 10 «Таҳияи усулҳо ва...»** – дар диссертатсия барнома барои пешгуиши чараёни оби дарёи Вахш дар асоси усулҳои омӯзиши мошинӣ таҳия шудааст.

Саҳми шахсии доктарабӣ дарчаи илмӣ дар омодакунии диссертатсия дар муайян намудани ҳадаф ва вазифаҳои таҳқиқот; интихоби заминаи методологӣ ва иттилоотӣ; анҷом додани таҳқиқот, таҳияи методикаҳо ва алгоритмҳо; инчунин таҳияи маҷмӯи барномавӣ ифода меёбад.

Тасвиб ва амалисозӣ. Муқарраротҳои асосии диссертатсия, қисмҳои ҷудоғонаи он, инчунин натиҷаҳои таҳқиқот дар ҷорабиниҳои зерин пешниҳод ва муҳокима гардидаанд: – Конфронси байналмилалӣ илмӣ “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources

Engineering” (Conmechhydro-2021), 1–3 апрели соли 2021, Тошкент, Ўзбекистон; – Конфронси илмӣ-амалии III аспирантон, магистрантон ва донишҷӯён «Илм – асоси рушди инноватсионӣ», бахшида ба Рӯзи илм, Соли рушди сайёҳӣ ва хунарҳои мардумӣ ва оғози даҳсолаи «Об барои рушди устувор» (2018–2028), Душанбе – 2018; – Конфронси ҷумхуриявии илмӣ-амалӣ «Илм – асоси рушди инноватсионӣ», Душанбе – 2019; – Бисту нӯҳум ва сиюмин конфронсҳои байналмилалии илмӣ-техникии донишҷӯён ва аспирантон «Радиоэлектроника, электротехника ва энергетика» (16–18 март 2023 ва 29 феврал – 2 март 2024, Москва); – Конфронси байналмилалии илмӣ-амалӣ «Энергетика: ҳолат ва дурнамои рушд», Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе – 2023; – Конфронси байналмилалии илмӣ-амалӣ «Рушди соҳаи энергетикаи Тоҷикистон дар давраи истиқлолият», Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе – 7 апрели соли 2025; – Конфронси байналмилалии илмӣ-амалӣ «Электротехника, электроника ва идоракунии дар системаҳои электротехникӣ: тамоюлҳо, технологияҳо, таҳқиқот», 22–23 апрели соли 2025 (видеоконфронс); – Семинарҳои илмӣ кафедраи нерӯгоҳҳои электрикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ.

Интишорот аз рӯи мавзӯи диссертатсия.

Кори диссертатсионӣ дар мақолаҳо ва маърузаҳои нашршудаи муаллиф инъикос ёфтааст. Аз рӯи мавзӯи диссертатсия 22 кори ҷопӣ ба таърифи расидааст, аз ҷумла 7 мақолаи илмӣ дар нашрияҳои, ки ба рӯйхати тавсияшудаи КОА Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил мешаванд, 2 мақола дар пойгоҳҳои байналмилалии маълумоти Scopus ва IEEE, 10 нашр дар маводҳои конфронсҳои байналмилалӣ, инчунин 3 шаҳодатнома оид ба бақайдгирии давлатии барнома барои МЭҶ ва пойгоҳи додаҳо.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия дар 175 саҳифа пешниҳод гардида, аз муқаддима, чор боб ва хулоса иборат мебошад. Матни таҳқиқот бо 46 расм тасвир ёфта, 12 ҷадвалро дар бар мегирад. Рӯйхати адабиёт 131 номгӯро фаро мегирад. Ба кори диссертатсионӣ 5 замима ворид карда шудааст.

ҚИСМҲОИ АСОСИИ ТАҲҚИҚОТ

Дар боби якум: «**Асосноккунии усулҳо ва гузориши масъалаи идоракунии оптималии речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш**» – баррасии интиқодӣ ва таҳлили усулҳои оптимизатсия дар энергетика бо гурӯҳ бандии онҳо ба усулҳои классикӣ, метаэвристикӣ ва усулҳои ба омӯзиши мошинӣ асосёфта анҷом дода шудааст. Объекти таҳқиқот, речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш, аз ҷумла НБО Роғун, тавсиф гардида, инчунин гузориши масъалаи идоракунии речаҳои кори силсилаи Вахш пешниҳод шудааст.

Дар асоси таҳлил нишон дода шудааст, ки барои ҳалли масъалаҳои, ки дорони сохтори равшан ва маҳдудиятҳо мебошанд ва ба идоракунии кӯтоҳмуддати силсила хосанд, усулҳои барномарезии математикӣ самараноктарин ба ҳисоб мераванд, дар ҳоле ки барои масъалаҳои пешгӯӣ дар шароити номуайяни – усулҳои омӯзиши мошинӣ мувофиқтаранд. Хусусиятҳои муфассали ҳамаи НБО-и силсила, параметрҳо ва робитаҳои мутақобилаи онҳо оварда шуда, дар асоси ин гузориши формализатсияшудаи масъалаи идоракунии бисёрсатҳӣ иҷро гардидааст.

Усулҳои, ки ҳангоми оптимизатсияи речаҳои кори НБО ва силсилаи НБО дар системаҳои электроэнергетикӣ истифода мешаванд, шартан метавон ба се гурӯҳ ҷудо намуд: усулҳои классикӣ; усулҳои метаэвристикӣ; усулҳои ба омӯзиши мошинӣ асосёфта.

Таснифоти усулҳои классикии оптимизатсия дар расми 1 оварда шудааст.

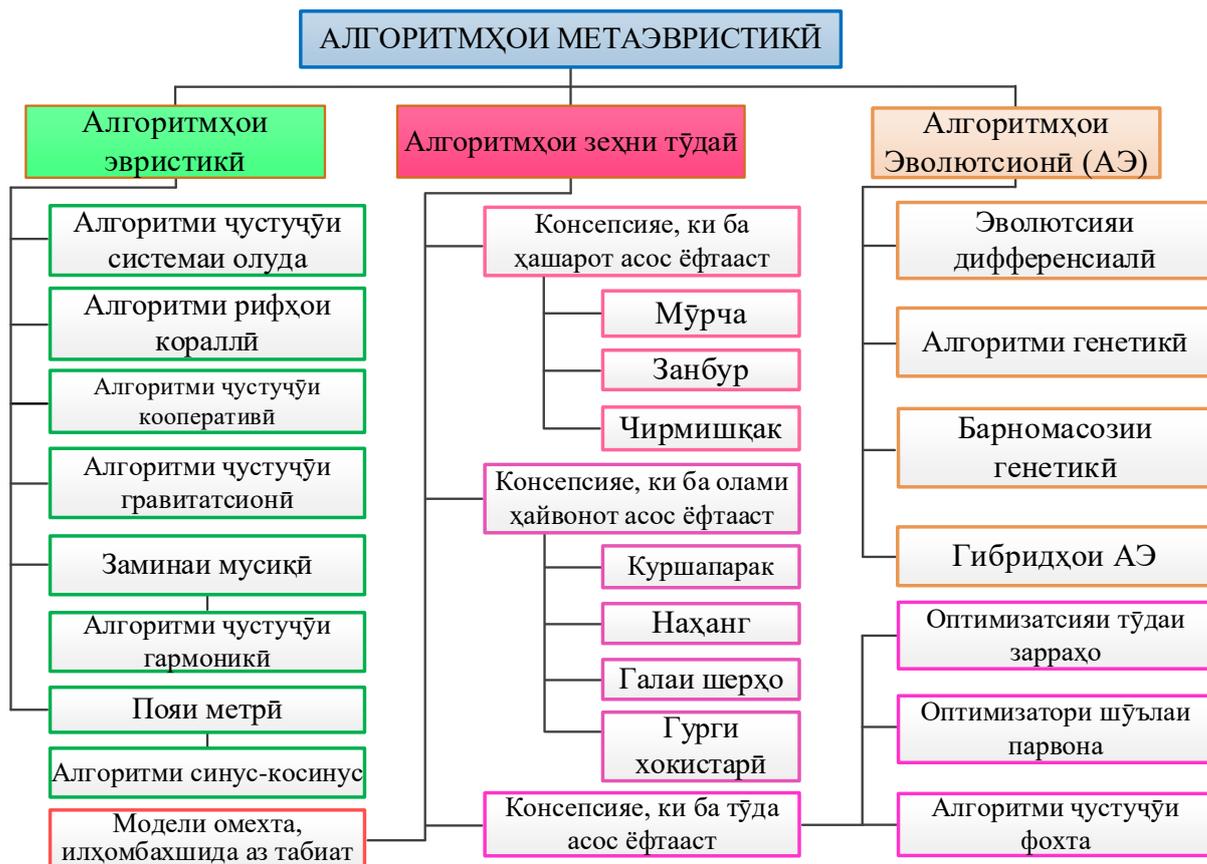
Дар даҳсолаҳои охир усулҳои нави оптимизатсия ихтироъ шудаанд, ки аз лиҳози концептуалӣ аз усулҳои анъанавӣ фарқ мекунанд. Аксари онҳо ба хусусиятҳои асос ёфтаанд, ки ба системаҳои биологӣ, молекулавӣ, физикӣ ва нейробиологӣ хос мебошанд.

Алгоритмҳои метаэвристикӣ равишҳои навро барои ҳалли ҷунин масъалаҳо пешниҳод намуда, дорони самаранокии баланд мебошанд ва барои ҳалли масъалаҳои оптимизатсионӣ дар соҳаи энергетика ба таври васеъ истифода мешаванд.



Расми 1 – Усулҳои классикии оптимизатсия

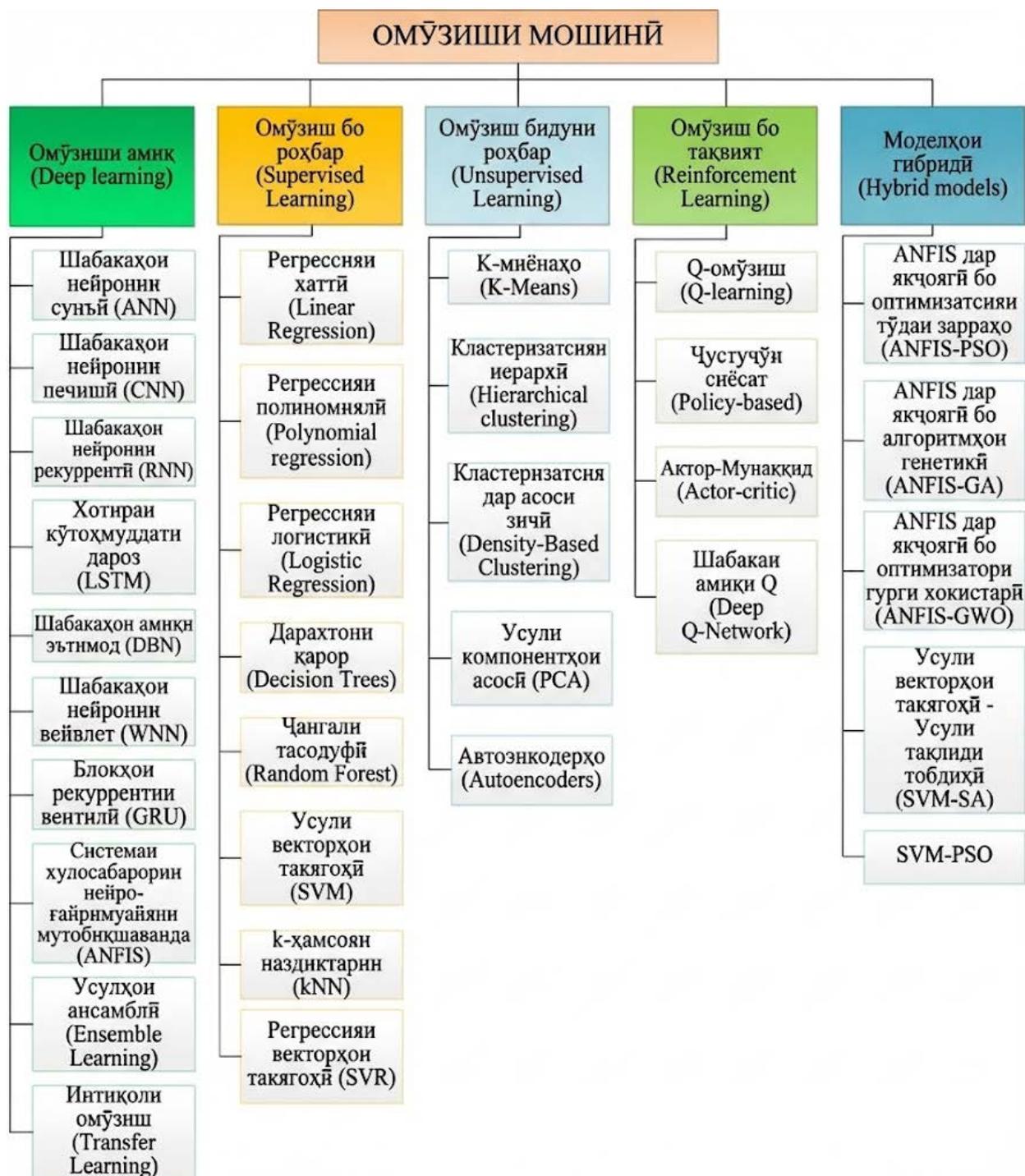
Алгоритмҳои метаэвристикиро метавон ба чунин гурӯҳҳо ҷудо намуд: эволюсионӣ, роевӣ, физикӣ, инсонӣ, биологӣ, системаӣ, математикӣ, мусиқавӣ ва эҳтимолӣ. Таснифоти усулҳои метаэвристикӣ оптимизатсия дар расми 2 оварда шудааст.



Расми 2 – Усулҳои метаэвристикӣ оптимизатсия

Дар ду даҳсолаи охир моделҳои омӯзиши мошинӣ (МО) ба воситаҳои ҷудонашаванда табдил ёфта, барои моделсозӣ, тарҳрезӣ ва пешгӯӣ дар системаҳои гуногуни энергетикӣ ба таври васеъ истифода мешаванд.

Таснифоти моделҳои ба омӯзиши мошинӣ асосёфта, ки дар вазифаҳои гуногуни соҳаи энергетика истифода мегарданд, дар расми 3 оварда шудааст.



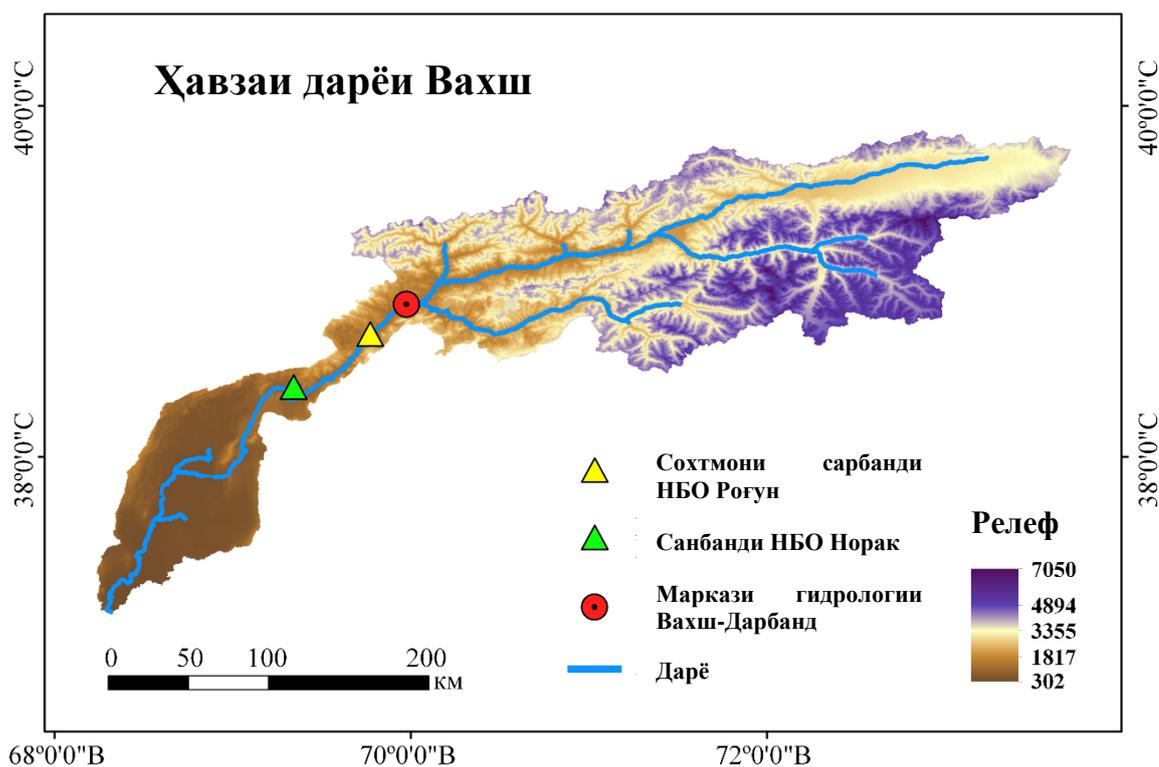
Расми 3 – Моделҳои омӯзиши мошинӣ дар энергетика

Нерӯгоҳҳои барқи обӣ, одатан, ба таркиби гирехҳои гидротехникии дорои таъиноти бисёрмақсад дохил шуда, вазифаҳои энергетикӣ ва хоҷагии обро ҳамзамон иҷро менамоянд. Онҳо самараноктарин ва манёврпазиртарин навъи нерӯгоҳ барои пӯшонидани нобаробарии речаи истеъмоли нерӯи барқ ба ҳисоб рафта, инчунин барои танзими басомад ва таъмини захираи зарурии иқтидор дар системаи энергетикӣ пешбинӣ шудаанд. Идоракунии оқилонаи речаҳои кори нерӯгоҳҳои барқи обӣ яке аз масъалаҳои мураккабтарин дар системаҳои энергетикӣ мебошад, зеро он бо дараҷаи баланди тағйирёбии захираҳои табиӣ об вобастагии зич дорад. Иқтидори гидроэнергетикии дарёҳо метавонад дар доираи васеъ тағйир ёбад ва барои баъзе нерӯгоҳҳо дар ифодаи солона то 20 - 30 % расад, ки ҳангоми

банақшагирӣ ва оптимизатсияи кори онҳо ба ҳисоб гирифтани омилҳои сершуморро талаб менамояд.

Таҳия ва татбиқи равишҳои аз лиҳози илмӣ асосноки идоракунии оптималии речаҳои силсилаи НБО дар шароити номуайянии чараёни дарё, талаботи системаи энергетикӣ ва маҳдудиятҳои техникӣ имкон медиҳад, ки самаранокии истифодаи захираҳои гидроэнергетикӣ баланд бардошта шавад. Идоракунии оптималӣ метавонад самаранокии истифодаи захираҳои обиро то 10 - 15 % зиёд намояд.

Дарёи Вахш яке аз системаҳои калидии энергетикӣ ва хоҷагии оби Тоҷикистон мебошад. Ҳавзаи дарёи Вахш дар байни 37,10 - 39,74 дараҷаи арзи шимолӣ ва 68,31 - 73,70 дараҷаи тӯли шарқӣ ҷойгир шудааст (расми 4). Баландӣ аз сатҳи баҳр дар худуди ҳавза аз 302 то 7050 метр тағйир меёбад.

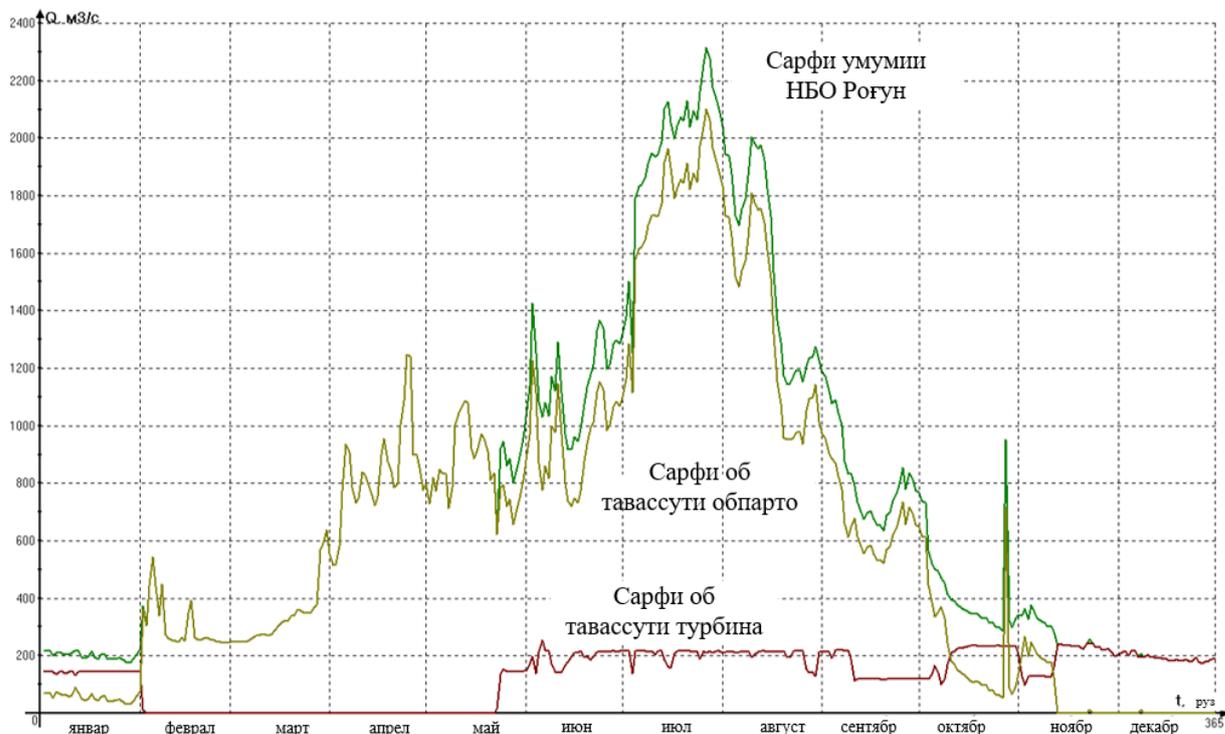


Расми 4 – Ҳавзаи дарёи Вахш

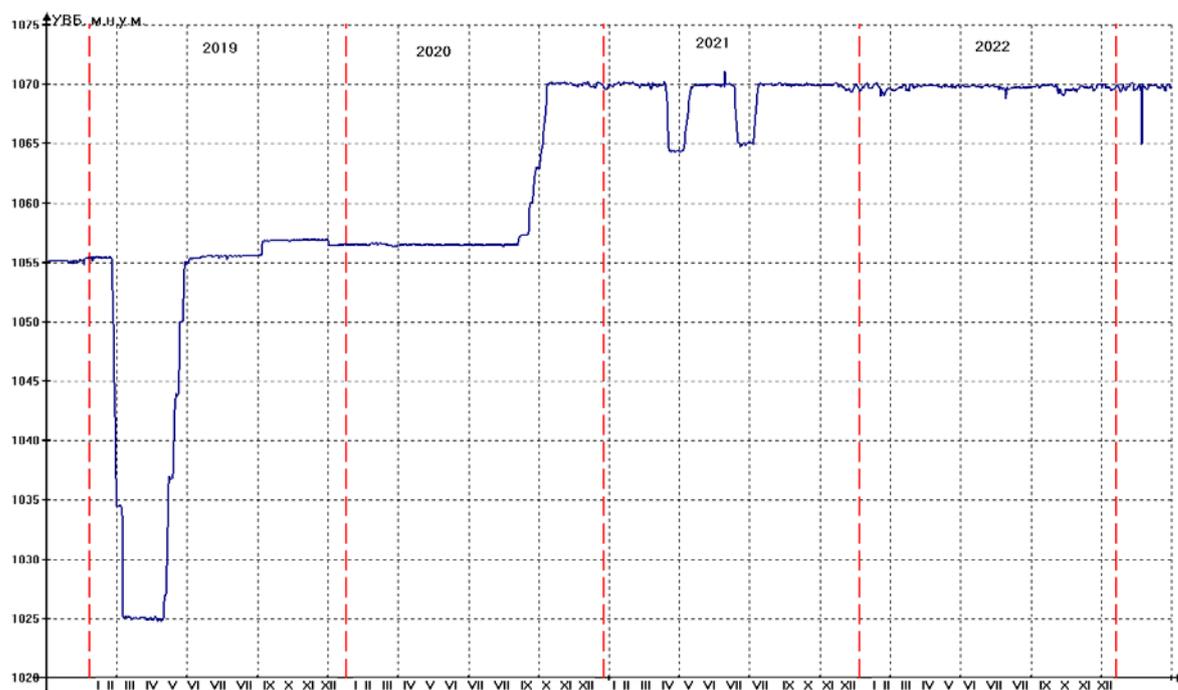
Нерӯгоҳи барқи оби Роғун як лоиҳаи бузурги гидроэнергетикӣ мебошад, ки дар солҳои 1950–1960, дар давраи мавҷудияти Иттиҳоди Шуравӣ, дар доираи нақшаи стратегии рушди комплекси Осиёи Марказӣ таҳия шудааст. Лоиҳа дорои самти бисёрмақсад мебошад: баробари истеҳсоли нерӯи барқ, он танзими чараёни оби дарёи Вахш, коҳиш додани хавфи обхезӣ ва идоракунии таҳшинҳоро пешбинӣ менамояд, ки ин онро ба унсури калидӣ дар системаи идоракунии устувори захираҳои обию энергетикӣ минтақа табдил медиҳад.

Бо сабаби ҳудуди васеи тазйикқое, ки агрегатҳои НБО дар давраи сохтмон ва истифодаи муваққатӣ дар он фаъолият мекунанд – аз 80 м Ҳангоми ба кор даровардани агрегатҳои аввал (СБО 1055,00 м) то 320 м (СМД 1290,00 м) – ба истифода додани таҷҳизоти гидроэнергетикӣ ба таври марҳилавӣ анҷом дода мешавад. Ду агрегати аввалини ба истифода додасуда (ГА №6 ва №5) дар тазйиқи паст (80–120 м) бо чархҳои кори муваққатӣ ва генераторҳои муваққатӣ дар сатҳи СБО 1055 м фаъолият мекунанд. Ҳангоми тазйикҳои 120–185 м иваз намудани чархҳои кори муваққатӣ ба доимӣ бо идомаи кори генераторҳои муваққатӣ анҷом дода мешавад.

Чадвалҳои сарфи об, пуршавии обанбор ва истеҳсоли иқтидори НБО Роғун дар расмҳои 5, 6 ва 7 оварда шудаанд.



Расми 5 – Сарфи об дар НБО Роғун дар солҳои 2019–2022

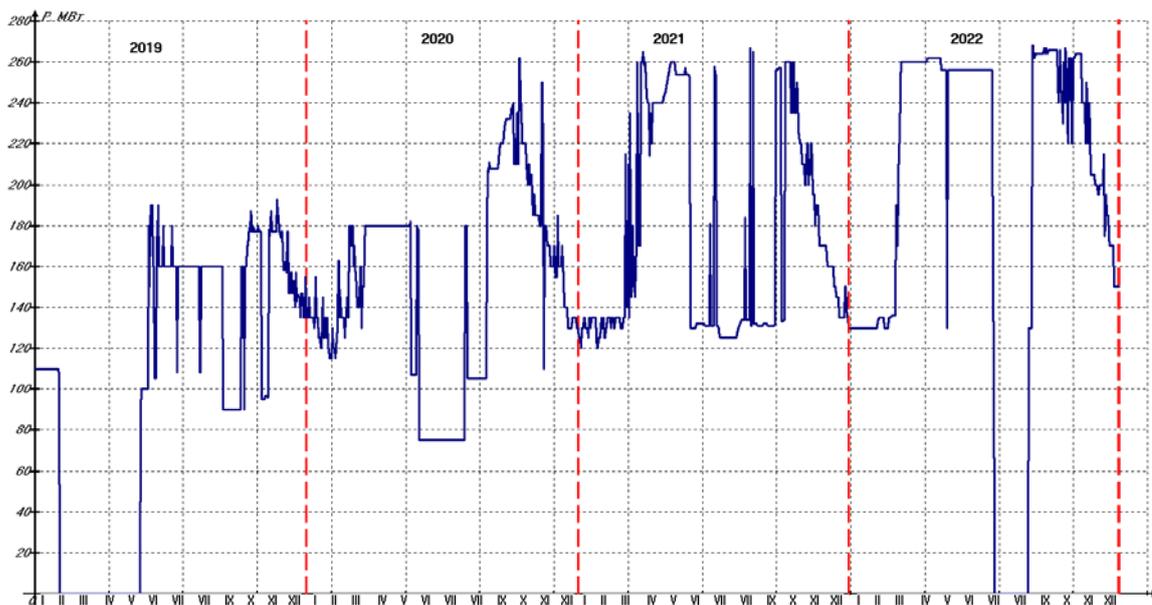


Расми 6 – Пуршавии обанбори НБО Роғун

Ба истифода додани навбати аввали сохтмони НБО Роғун имкон дод, ки истеҳсоли нерӯи барқ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон қариб 8 % зиёд гардад. Аини замон сохтмони сарбанд идома дошта, омодагӣ барои ба истифода додани гидроагрегати сеюм (ГА №4) ва ҳамзамон пур намудани обанбор амалӣ мегардад. Бо пур шудани обанбор, яъне бо баланд гардидани сатҳи болооби НБО, тазйиқ зиёд шуда, ин ба афзоиши истеҳсоли иқтидор оварда мерасонад.

Бо ба иқтидори пурра ба қор даромадани НБО Роғун мушкилоти норасоии нерӯи барқ дар давраи зимистон ҳал гардида, имкони содироти нерӯи барқ ба кишварҳои ҳамсоя фароҳам мешавад.

Таҳия ва татбиқи моделҳои пешгуи чараёни оби дарёи Вахш дар асоси усулҳои омӯзиши мошинӣ имкон медиҳад, ки ҳаҷми бузурги маълумоти гидрометеорологӣ дар шароити тағйирёбии иқлим коркард карда шавад.



Расми 7 – Истеҳсоли иқтидори НБО Роғун

Соختани моделҳои мукаммали оптимизатсияи кӯтоҳмуддат ва дарозмуддати речаҳои кори силсилаи НБО бояд тавозуни об, талаботи энергетикӣ, маҳдудиятҳои техникӣ таҷҳизот ва сенарияҳои эҳтимолии обнокии дарёро ба назар гирад. Чунин моделҳо бояд самаранокии ҳақди аксар, эътимодноки ва устувории фаъолияти силсиларо дар шароити иқлимӣ чорӣ ва оянда таъмин намоянд.

Дар боби дуюм – «**Пешгуи чараёни оби дарёи Вахш барои таъмини речаҳои оптималии НБО Роғун**» – асосҳои назариявии танзими чараёни дарё ва пешгуи он оварда шудаанд. Пешгуи чараёни оби дарёи Вахш барои таъмини речаҳои оптималии НБО Роғун иҷро гардида, инчунин модели пешгуӣ дар асоси алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ бо истифода аз забони Python таҳия ва амалӣ карда шудааст. Маҷмӯи барномавии сохташуда «ML-VakhshRiver» (шаҳодатномаи №1202400516) имкон медиҳад, ки қаторҳои гидрологӣ таҳлил шуда, пешгуӣ бо дараҷаи баланди дақиқӣ анҷом дода шавад. Санҷиши модел баргариши онро нисбат ба усулҳои анъанавӣ нишон дода, эътимоднокии пешгуи дарозмуддатро ба таври назаррас баланд мебардорад.

Танзими чараёни дарё – ин равандест, ки тақсимоли захираҳои обро дар вақт ва фазо тавассути обанборҳо амалӣ менамояд. Чараёни дарё хусусияти стохастикӣ ва эҳтимоли дошта, аз омилҳои иқлимӣ ва атмосферӣ вобаста мебошад. Вобаста ба ташаккули чараёни дарё, он бо нобаробарӣ тавсиф мешавад, яъне аз рӯи моҳҳо, фаслҳои сол ва сол ба сол тағйир меёбад.

Навҳои танзими чараёни дарё аз рӯи давомнокии давраи танзим ба гурӯҳҳои зерин ҷудо мешаванд:

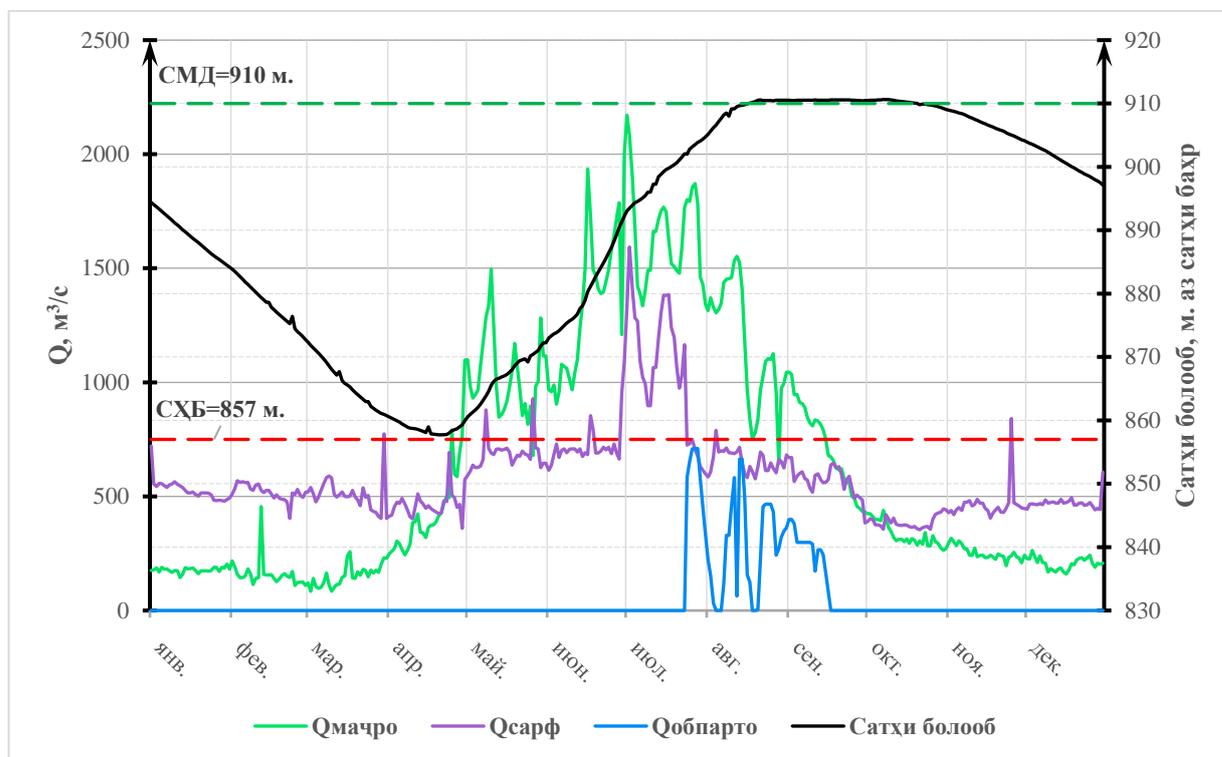
- дарозмуддат – бисёрсола, солана ва мавсимӣ;
- кӯтоҳмуддат – моҳона, ҳафтаина ва шабонарӯзӣ.

Ҳар як дараҷаи минбаъдаи танзими чараён имкониятҳои танзими дараҷаи қаблӣро дар бар мегирад. Масалан, обанборе, ки танзими бисёрсола дорад, метавонад танзими солана, мавсимӣ, ҳафтаина ва шабонарӯзиро низ иҷро намояд. Дар расми 8 графикҳои танзими мавсимии чараён ва сатҳҳои обанбори НБО Норақ нишон дода шудаанд.

Дараҷаи танзими чараёни дарё бо ҳаҷми нисбии обанбор – коэффисиенти ғунҷоиш – β тавсиф мешавад, ки аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$\beta = \frac{V_{\text{фоиданок}}}{W_0},$$

ки дар он: $V_{\text{фоиданок}}$ – ҳаҷми фоиданоки обанбор (км³); W_0 – ҳаҷми миёнаи бисёрсолаи чараёни солона (км³) мебошанд.



Расми 8 – Графикҳои танзими мавсимии чараён ва сатҳҳои обанбори НБО Норак

Коэффисиенти ғунҷоиш барои обанборҳо одатан чунин арзишҳоро дорад:

- барои танзими шабонарӯзӣ: $\beta = 0,005...0,01$;
- барои танзими мавсимӣ: $\beta = 0,1...0,3$;
- барои танзими бисёрсола: $\beta = 0,3...0,5$.

Қобилияти танзими обанборҳои НБО-е, ки дар Ҷумҳурии Тоҷикистон истифода мешаванд, дар ҷадвали 1 оварда шудааст.

Ҷадвали 1 – Параметрҳои обанборҳои НБО-и Тоҷикистон

Нерӯгоҳ	Танзим	Ҳаҷми умумӣ, км ³	Ҳаҷми муфид, км ³	β
Роғун	бисёрсола	13,30	10,30	0,515
Норак	мавсимӣ	10,5	4,5	0,225
Қайроққум	мавсимӣ	4,2	2,3	0,115
Бойғозӣ	шабонарӯзӣ	0,12465	0,0871	0,0043
Сангтӯда 1	шабонарӯзӣ	0,258	0,018	0,0009
Сангтӯда 2	шабонарӯзӣ	0,0665	0,005	0,00025
Сарбанд	шабонарӯзӣ	0,096	0,004	0,0002

Пешгӯиҳои чараёни дарё барои НБО-е, ки дорои обанбор мебошанд, имконият медиҳанд, ки пешакӣ дар бораи мавҷудияти партофтҳои беҳудаи об иттилоъ дода шуда, самаранокии НБО дар низомҳои энергетикӣ баланд бардошта шавад. Маълумоти дақиқтари пешгӯӣ имкон медиҳад, ки реҷаи оптималии кори обанбори НБО таъин гардад, ки ин тавассути кам намудани ҳаҷми партофтҳои беҳудаи об, баланд бардоштани таъйиқи НБО ва мутаносибан, зиёд намудани истеҳсоли нерӯи барқ ба даст меояд. Пешгӯиҳои чараёни дарё

вазифаи мураккаб мебошад, зеро ба он шумораи зиёди омилҳо таъсир мерасонанд: миқдори боришот, захираи об дар қабати барф ва дигар хусусиятҳои ҳавзаи дарё.

Ҳавзаи ташаққули дарёи Вахш, махсусан дар минтақаи то НБО Роғун, аз лиҳози чуғрофӣ чунин ҷойгир шудааст, ки сарфҳои хоҷагии об (ирригатсионӣ) амалан хеле кам буда, асосан аз шохобҳои дарёи Вахш истифода мебаранд.

Дар ҳисобҳои гидрологӣ барои сохтани қачнамои назариявии таъминнокӣ бештар аз ҳама усули моментҳо истифода мешавад, ки муайянкунии омории параметрҳои тақсимотро пешбинӣ менамояд. Хусусиятҳои асосие, ки шакли қачнаморо муайян мекунад, инҳоянд:

– Қимати миёнаи сарфи дарё

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

ки дар он n – ҳаҷми интиҳоб мебошад.

– Коэффисиенти вариатсия, ки тағйирёбии нисбиро инъикос мекунад:

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

– Коэффисиенти асимметрия, ки ҷобачогузори тақсимотро тавсиф менамояд:

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

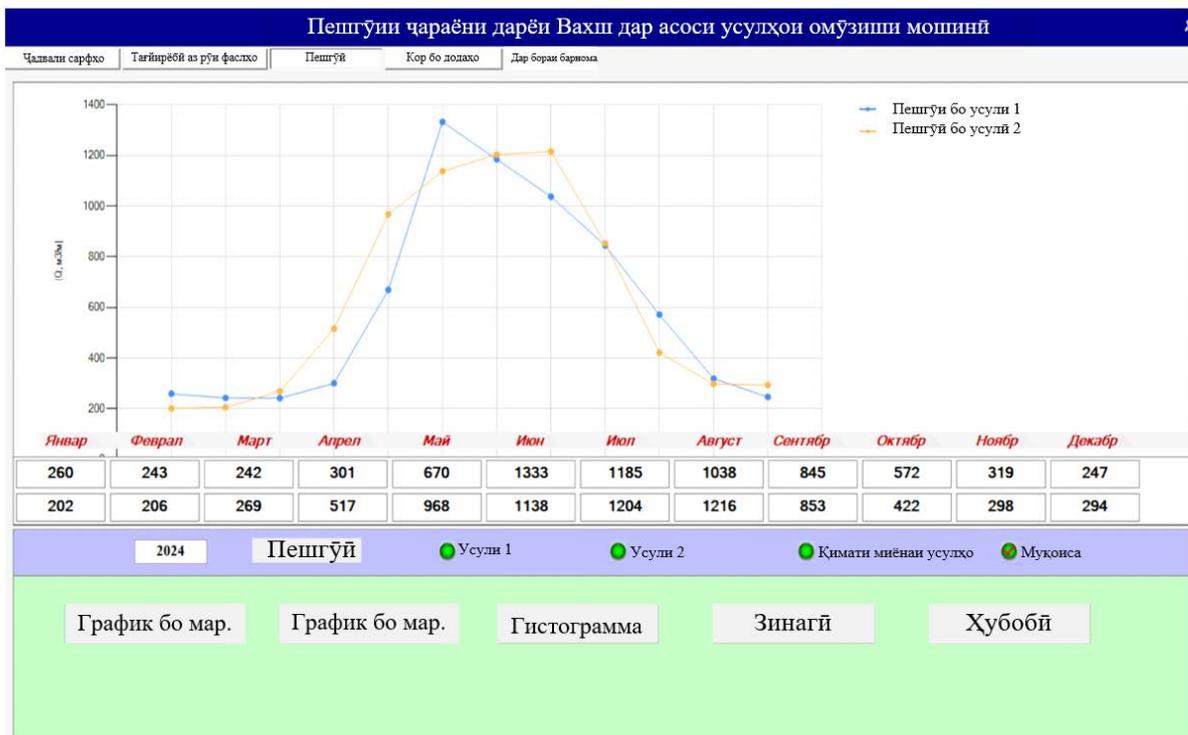
Давраи ҳисобии камобӣ ё давраи танқидии гидрологӣ давраест, ки дар он ҳангоми пурра ҳолӣ намудани обанбор то сатҳи СХБ, НБО иқтидори кафолатнокро таъмин менамояд.

Маҷмӯи барномавии «ML-VakhshRiver», ки дар асоси алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ таҳия шудааст, пойгоҳи додаҳо оид ба қаторҳои гидрологии дарёи Вахш дар бар гирифта, имкон медиҳад сарфҳои миёнамоҳонаи дарё аз рӯи моҳҳо, фаслҳо ва солҳо таҳлил гардида, инчунин пешгӯии дарозмуддати чараёни дарё иҷро карда шавад.

Маҷмӯи барномавӣ як қатор модулҳоро дар бар мегирад, ки ҳар кадом вазифаҳои муайяни таҳлил, намоиш ва пешгӯии чараёни дарёро иҷро менамоянд. Интерфейси барномаи таҳияшуда аз саҳифаҳои зерин иборат аст: «Қадвали сарфҳо»; «Тағйирёбӣ аз рӯи фаслҳо» (расми 9); «Пешгӯӣ» (расми 10); «Қор бо додаҳо»; «Дар бораи барнома».

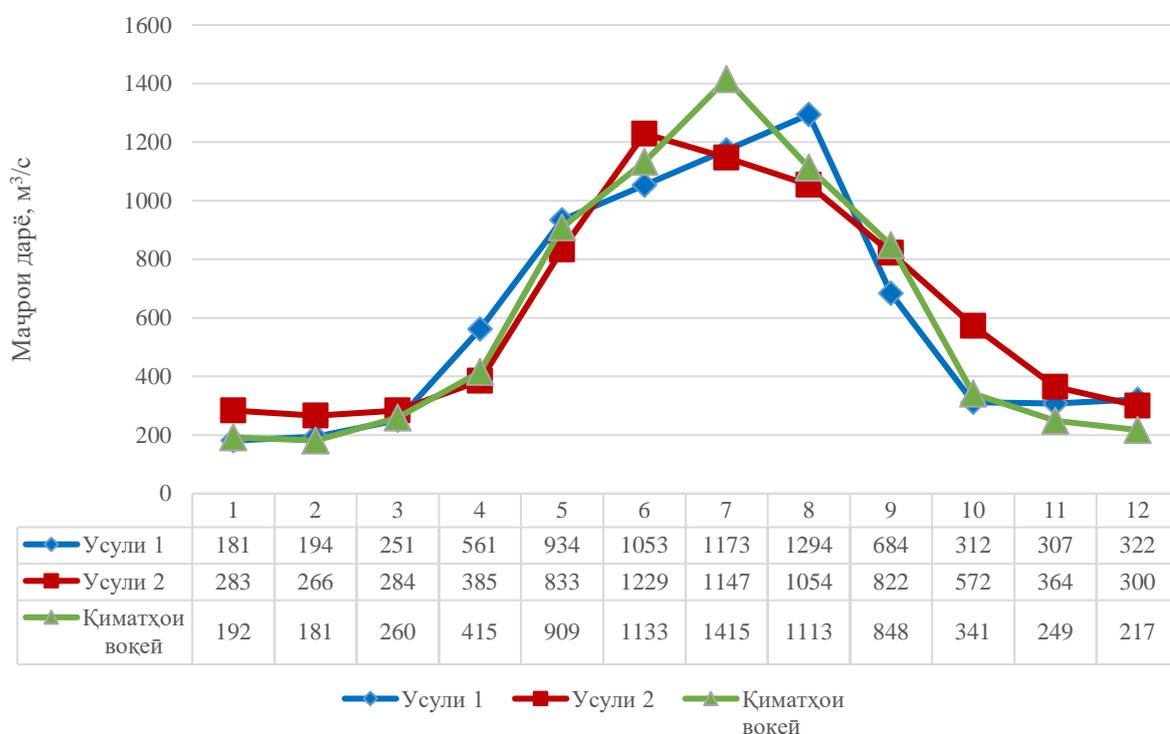


Расми 9 – Қадвали барнома («Тағйирёбӣ аз рӯи моҳҳо»)



Расми 10 – Чадвали барнома («Пешгӯӣ»)

Муқоисаи графикаи натиҷаҳои пешгӯии ба дастмада дар асоси омӯзиши мошинӣ бо қиматҳои воқеии воридоти оби дарёи Вахш дар расми 11 нишон дода шудааст.



Расми 11 – Муқоисаи натиҷаҳои пешгӯӣ бо қиматҳои воқеӣ

Дақиқии пешгӯии чараёни дарё дар ҳисобҳои гидрологӣ нишондиҳандаи муҳим барои идоракунии оқилонаи захираҳои об, банақшагирии речаҳои оптималии кори НБО ва огоҳсозии барвақтӣ дар бораи обхезиҳо мебошад. Метрикаҳои, ки барои арзёбии пешгӯии чараёни дарёи Вахш истифода мешаванд, дар чадвали 2 оварда шудаанд.

Чадвали 2 – Метрикаҳои арзёбии пешгӯии чараёни дарёи Вахш

Пешгӯи бо усули якум				Пешгӯи бо усули дуввум			
$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\frac{ Q_t - Q_t^* }{Q_t}$	$ Q_t - Q_t^* $	$(Q_t - Q_t^*)^2$		$\frac{ Q_t - Q_t^* }{Q_t}$
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 – усули 1 хатои мутлақи миёнаи камтарро нишон медиҳад (88,6 нисбат ба 98,7 м³/с), ки аз дақиқии баландтари пешгӯӣ дар миёна шаҳодат медиҳад.

MSE ва RMSE – дар усули 1 арзишҳо пасттаранд, ки таъсири камтари хатогиҳои калонро низ тасдиқ мекунад.

MAPE – усули 1 хатои нисбии хеле камтар дорад (15,6 % нисбат ба 27,1 %), ки махсусан барои муқоисаҳои гидрологӣ аҳамияти калон дорад.

Арзёбии умумӣ – усули 1 аз рӯи ҳамаи метрикаҳои асосӣ, бахусус аз ҷиҳати дақиқии нисбӣ, аз усули 2 ба таври равшан бартарӣ дошта, онро барои истифодаи амалӣ боэътимодтар мегардонад.

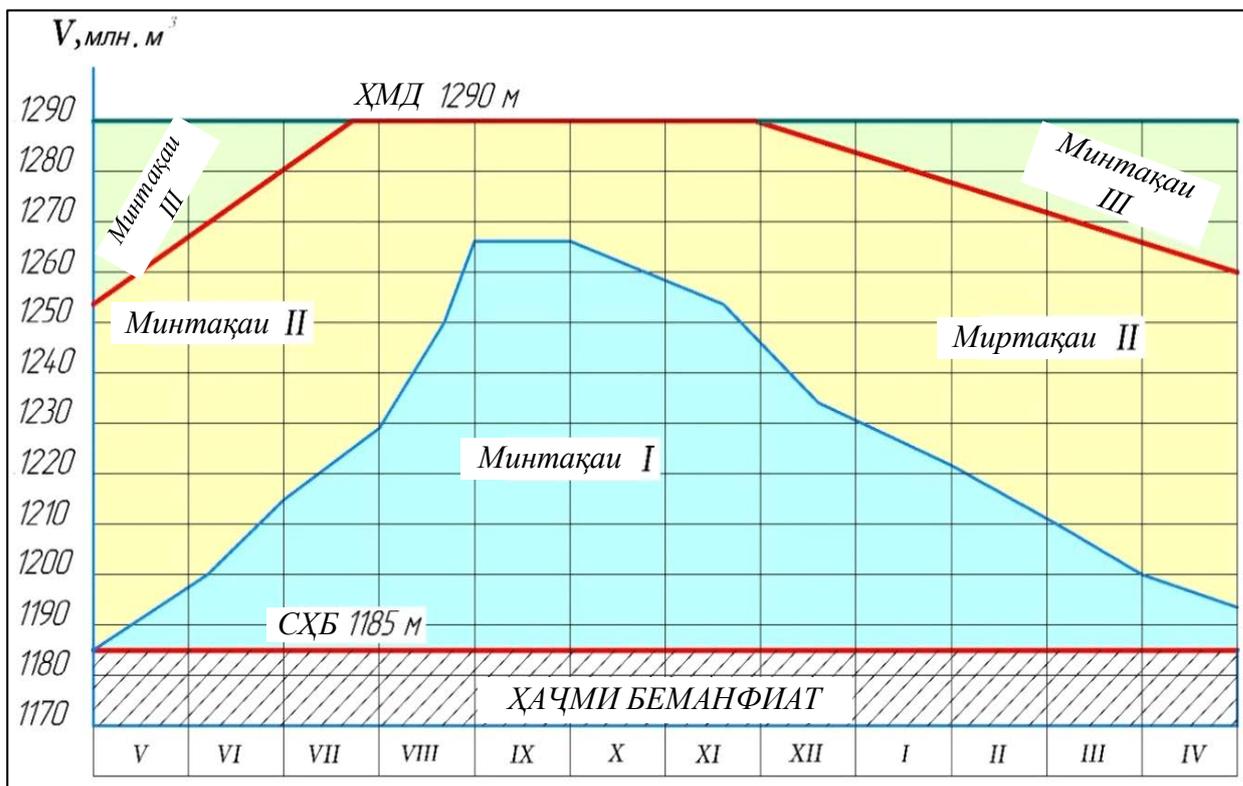
Ҳамин тариқ, натиҷаҳои бадастомадаи пешгӯии чараёни дарё дар асоси алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ нишон медиҳанд, ки онҳо нисбат ба усулҳои анъанавии пешгӯӣ дақиқии баландтар доранд. Маҷмӯи барномавии дар асоси усулҳои омӯзиши мошинӣ таҳияшуда имкон медиҳад, ки пешгӯии боэътимодтари чараёни дарё анҷом дода шавад, ки ин дар навбати худ, барои оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи НБО-и дарёи Вахш, махсусан НБО Роғун, дар шароити тағйирёбии иқлимӣ ва гидрологӣ аҳамияти муҳим дорад.

Дар боби сеюм – «**Оптимизатсияи речаҳои дарозмуддати кори силсилаи НБО-и Вахш бо ба истифода додани НБО Роғун**» – методикаи идоракунии танзимгарии речаҳои кори НБО баррасӣ гардида, дар асоси натиҷаҳои пешгӯӣ масъалаи идоракунии оптималии дарозмуддат ҳал шудааст. Барои НБО Роғун чадвалҳои танзимгарӣ таҳия гардидаанд, ки қоидаҳои танзими бисёрсоларо формализатсия менамоянд.

Оптимизатсияи речаҳои дарозмуддати НБО ва силсилаи НБО-е, ки дорои обанбор мебошанд, масъалаи мураккаб ба ҳисоб меравад. Мушкилии он дар он аст, ки чараёни дарё дар давраи танзимшаванда, махсусан дар давраи дарозмуддат, хусусияти стохастикӣ ва номуайян дошта ё бо пешгӯии дақиқи маҳдуд тавсиф мешавад. Вобаста ба навъ ва таъиноти обанбор, чадвалҳои танзимгарӣ метавонанд шаклҳои гуногун дошта бошанд.

Бо дарназардошти ҳамаи параметрҳо ва меъёрҳо дар асоси маълумоти гидрологии дарёи мавриди баррасӣ, инчунин бо истифода аз маълумоти бадастомада аз пешгӯии дарозмуддати чараёни дарёи Вахш дар асоси омӯзиши мошинӣ дар доираи маҷмӯи барномавии таҳияшуда, муаллиф чадвалҳои танзимгариро сохтааст, ки барои идоракунии оптималии речаҳои обанбори НБО Роғун дар давраи дарозмуддат пешбинӣ шудаанд.

Чадвали танзимгари тахияшуда дорои хатҳои маҳдудияти сатҳҳо (СМД, СХБ) ва минтақаҳои речагии истифодаи обанбор мебошад, ки траекторияҳои оптималии ҳоли намудан ва пур кардани обанбори НБО Роғунро вобаста ба обнокии сол муайян намуда, истеҳсоли ҳадди аксарро бо таъмини эътимоднокии кафолатнок таъмин менамояд. Дар расми 12 чадвали танзимгари НБО Роғун, ки аз ҷониби муаллиф тахия шудааст, нишон дода шудааст.



Расми 12 – Чадвали танзимгари ҳисобшудаи НБО Роғун

Ҳангоми истифодаи оптималии сатҳи об дар обанбор байни сатҳҳои СМД (ҳадди аксар) ва СХБ (ҳадди ақал) тағйир меёбад. **Минтақаи I** – соҳае, ки дар он нерӯгоҳ бо иқтидори камтар аз иқтидори кафолатнок фаъолият мекунад. **Минтақаи II** – нерӯгоҳ бо иқтидори кафолатнок кор мекунад. Минтақаи III – минтақаи истеҳсоли ҳадди аксар. Речаҳои он вақт оптималии ба ҳисоб мераванд, ки ҳоли намудан ва пур кардани обанбор дар доираи **минтақаи II** амалии гардад.

Ҳамин тариқ, дар асоси маълумоти гидрологӣ ва натиҷаҳои пешгӯии дарозмуддати чараёни дарёи Вахш чадвалҳои танзимгари НБО Роғун тахия гардидаанд, ки барои таъмини речаҳои оптималии дарозмуддати ҳоли намудан ва пур кардани обанбор бо меъёри ҳадди аксари истеҳсоли нерӯи барқ ва истифодаи оқилонаи захираҳои об пешбинӣ шудаанд.

Дар боби чорум – «Идоракунии оптималии кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО» – масъалаи калидии оптимизатсияи кӯтоҳмуддат ҳал гардидааст. Модели муфассали математикӣ барои силсила ва таъминоти барномавӣ чиҳати идоракунии оптималии кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО-и дарёи Вахш тахия шудаанд.

Ҳангоми идоракунии оптималии речаҳои кори НБО ҳам дар давраи дарозмуддат ва ҳам кӯтоҳмуддат – ба ҳисоб гирифтани маҷмӯи маҳдудиятҳо, аз ҷумла маҳдудиятҳои истифода, техникӣ, гидрологӣ ва ғайра, ҳатмӣ мебошад. Барои тахияи модели математикӣ ҷойгиршавии схемавии ин НБО дар таркиби силсила зарур аст, ки он дар расми 13 нишон дода шудааст.

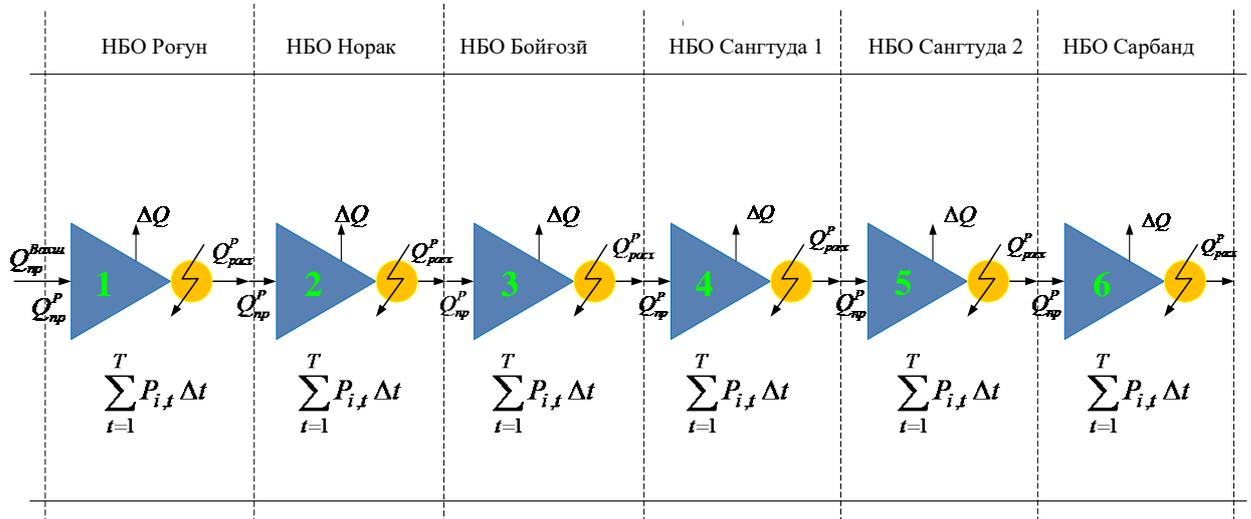
Модели математикӣ барои силсилаи НБО-и дарёи Вахш.

Функсияи мақсаднок (меъёри оптимизатсия) – ҳадди аксар гардондани истеҳсоли умумии нерӯи барқ:

$$F = \max W = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_{i,t} \cdot \Delta t .$$

Истехсоли умумии нерӯи барқи дар силсила, ки аз n нерӯгоҳ иборат аст, ба суммаи нерӯи барқи истехсолнамудаи ҳар як НБО баробар мебошад:

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



Расми 13 – Модели силсилаи НБО-и дарёи Вахш

Тавоноии ҳар як нерӯгоҳ

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

ки дар он: ρ – зичии об (тақрибан 1000 кг/м^3);

g – шитоби афтиши озод ($9,81 \text{ м/с}^2$);

η_i – коэффисиенти фоиданокии агрегат;

Q_i – сарфи об ($\text{м}^3/\text{с}$);

H_i – тазйик (м).

Тазйиқи H барои НБО-ҳои дорои обанбор бо мурури вақт тағйир меёбад:

$$H_{i,t} = Z_{i,t}^{cb} - Z_{i,t}^{cn} ,$$

ки дар он: $Z_{i,t}^{cb}$ – сатҳи болооби НБО-и i ; $Z_{i,t}^{cn}$ – сатҳи поёноби НБО-и i .

Дар обанборҳои НБО сатҳи поёноб вобаста ба сарфи об тағйир меёбад. Он бо қанҷамои поёноб тавсиф мешавад, яъне вобастагии $Z^{cn} = f(Q)$, ки ҳангоми оптимизатсияи речаҳои кори силсила барои ба ҳисоб гирифтани тағйирёбии тазйиқи воқеӣ ва мутаносибан, истехсоли нерӯи барқ истифода мешавад.

Коэффисиенти фоиданокии гидроагрегат

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

яъне он аз КФ-и турбина ва генератор вобаста мебошад.

Муодилаҳои маҳдудият барои ҳар як НБО чунинанд:

Аз рӯи сатҳҳои обанбор:

Барои обанбори ҳар як НБО $Z_{i,t}^{cb}$ қиматҳои ҳадди аксар $Z_i^{cb,min}$ ва ҳадди ақали сатҳи болооб $Z_i^{cb,max}$ дода мешаванд:

$$Z_i^{cb,min} \leq Z_{i,t}^{cb} \leq Z_i^{cb,max} , \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall t = 1, \dots, T .$$

Ба таври эквивалентӣ тавассути ҳаҷми обанбор:

$$V_i^{min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{max},$$

$$Z_{i,t}^{c\bar{o}} = f_i^{-1}(V_{i,t}),$$

ки дар он: $V_{i,t}$ – ҳаҷми обанбори i -ум дар лаҳзаи вақт t .

Вобастагии сатҳи болооби обанбор аз ҳаҷми он, ки онро инчунин тавсифи болооби НБО меноманд ва дар асоси маълумоти топографӣ ва батиметрии маҳал муайян карда мешавад, шакли зерин дорад:

$$V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{c\bar{o}}) \leftrightarrow Z_{i,t}^{c\bar{o}} = f_i^{-1}(V_{i,t}).$$

Чунин вобастагӣ ҳангоми ҳисобҳои обию энергетикӣ ва моделсозии речаҳои кори НБО зарур буда, инчунин барои арзёбии тағйирёбии ҳаҷми обанбор ҳангоми тағйири сатҳи болооб аҳамияти муҳим дорад.

Аз рӯи тавоноии ҳар як НБО:

$$P_i^{min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max}.$$

Аз рӯи сарфи об барои ҳар як НБО:

Барои ҳар як НБО-и силсила маҳдудиятҳо аз рӯи сарфи об тавассути турбина, партофтҳои беҳуда ва сарфи умумии оби нерӯгоҳ мавҷуданд:

$$Q_i^{мур,min} \leq Q_{i,t}^{мур} \leq Q_i^{мур,max}, \quad 0 \leq Q_{i,t}^{обпарто} \leq Q_i^{обпарто,max},$$

$$Q_{i,t}^{min.хатми} \leq Q_{i,t}^{НБО} \leq Q_{i,t}^{сумм.,max}.$$

Муодилаи тавозуни об

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + 3600 \cdot (Q_{i,t}^{мачро} - Q_{i,t}^{НБО}) \Delta t,$$

$$Q_{i,t}^{НБО} = Q_{i,t}^{сарфа} = Q_{i,t}^{мур} + Q_{i,t}^{обпарто},$$

$$Q_{i,t}^{НБО} = Q_{i,t}^{сарфа} = Q_{i-1,t}^{НБО} \pm Q_{i,t}^{обанбор} + \Delta Q_{i-1,i},$$

ки дар он: $-Q_{i-1,t}^{сарфа} = Q_{i-1,t}^{НБО}$ – воридоти об аз НБО-и қаблӣ;

$Q_{i,t}^{обанбор}$ – сарфи об аз обанбор: «+» – ҳангоми ҳолӣ шудани обанбор; «-» – ҳангоми пур шудани обанбор;

$Q_{i,t}^{обанбор} = 0$ – ҳолати кори гузаришӣ (транзитӣ) низ ба назар гирифта мешавад.

Қимати сарфи об аз обанбори НБО-и i -ум аз рӯи ҳаҷми $-\Delta V_i$ холишуда ё ҷамъшудаи об муайян карда мешавад:

$$Q_{i,t}^{обанбор} = \frac{\pm \Delta V_i}{\Delta t}; \quad \left[\frac{M^3}{c} \right],$$

ки дар он:

«+» – ҳангоми ҳолӣ шудани обанбор $Z_{i,убт}^{c\bar{o}} \succ Z_{i,охир}^{c\bar{o}}$;

«-» – ҳангоми пур шудани обанбор $Z_{i,убт}^{c\bar{o}} \prec Z_{i,охир}^{c\bar{o}}$.

ΔV_i вобаста ба сатҳи болооб $Z_{i,убт}^{c\bar{o}}$ ва $Z_{i,охир}^{c\bar{o}}$ бо роҳи графикӣ ё бо усули аппроксиматсияи қисмӣ-хаттӣ аз рӯи қачнамои вобастагии сатҳи болооб нисбат ба ҳаҷм муайян карда мешавад: $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{c\bar{o}})$ (расми 15).

$\Delta Q_{i-1,i}$ – обгириҳо, воридоти паҳлӯӣ ва дигар таъсирҳо ба обанборҳои i -ум ва НБО-ҳои ҳамсоя:

$$\Delta Q_{i-1,i} = Q_{i,t}^{\text{вор.пах.}} - Q_{i,t}^{\text{обгир.}} - \Delta Q_i^{\text{бухорш.}} - \Delta Q_i^{\text{фил.}} + Q_i^{\text{боришот}} - \Delta Q_i^{\text{яхбан.}}$$

Маҳдудият аз рӯи суръати тағйирёбии сатҳи болооб:

$$\left| Z_{i,t+1}^{cb} - Z_{i,t}^{cb} \right| \leq \Delta Z^{cb \text{ max.}}$$

Нерӯгоҳҳои барқи обӣ, ки дар таркиби силсила фаъолият мекунад, метавонанд имкониятҳои гуногуни танзими чараёни об дошта бошанд, яъне обанборҳои дорои таъиноти гуногун, инчунин робитаҳои мураккаб миёни худ доранд, аз ҷумла аз рӯи сарфи об, тазйик, иқтидор ва истехсоли нерӯи барқ, ҳамчунин дорои маҳдудиятҳои муайяни истифода ва техникӣ мебошанд.

Ҳар як НБО-и i -ум, ки дар силсилаи дарёи Вахш фаъолият мекунад, вобаста ба воридоти об ба обанбор метавонад дар се речаи корӣ фаъолият намояд.

1. **Речаи ҳолӣ намудани обанбор** – вақте ки илова ба воридоти об ба обанбор аз худи обанбор низ об сарф мешавад $Q_{i,t}^{\text{обанбор}}$, яъне раванди ҳолӣ шудани обанбор ба амал меояд, $Z_{i,убт.}^{cb} > Z_{i,охир}^{cb}$, дар ин ҳолат:

$$Q_{i,t}^{НБО} = Q_{i,t}^{\text{сарфа}} = Q_{i-1,t}^{НБО} + Q_{i,t}^{\text{обанбор}} + \Delta Q_{i-1,i}$$

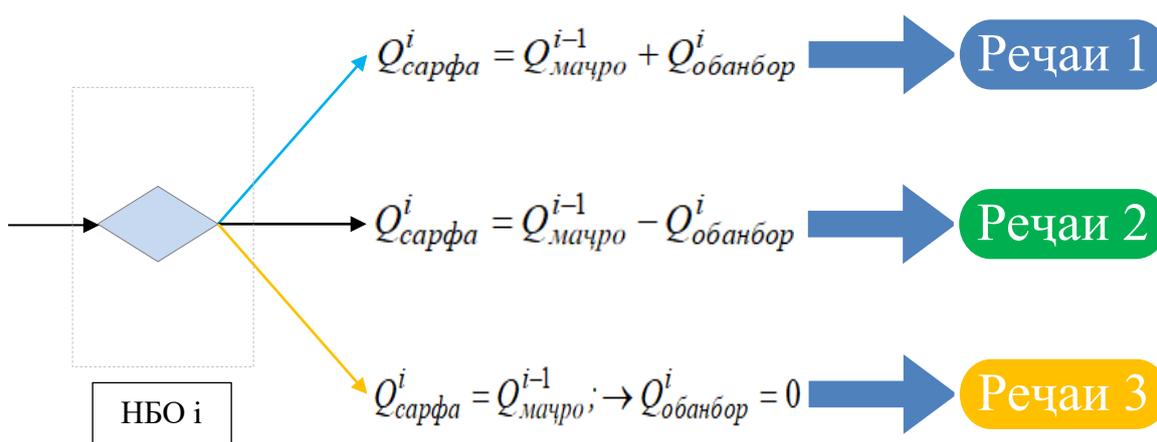
2. **Речаи пур намудани обанбор** – вақте ки қисми воридоти об барои пур кардани обанбор равона мешавад. $Z_{i,оғоз}^{cb} < Z_{i,охир}^{cb}$, дар ин ҳолат:

$$Q_{i,t}^{НБО} = Q_{i,t}^{\text{сарфа}} = Q_{i-1,t}^{НБО} - Q_{i,t}^{\text{обанбор}} + \Delta Q_{i-1,i}$$

3. **Речаи транзитӣ** – вақте ки сарфи об аз обанбор ба худаш баробари воридоти об ба обанбор мегардад. Дар ин реча сатҳи болооб доимӣ мемонад: $Z_{i,убт.}^{cb} = Z_{i,охир}^{cb}$. Ин реча самаранокии бештар дорад, хусусан вақте ки сатҳи болооб ба СМД баробар аст, зеро дар ин ҳолат НБО дорои тазйиқи ҳадди аксар буда, мутаносибан тавоноии максималиро ба даст меорад:

$$Q_{i,t}^{НБО} = Q_{i,t}^{\text{сарфа}} = Q_{i-1,t}^{НБО} + \Delta Q_{i-1,i}$$

Ба таври графикӣ речаҳои имконпазири обанбори ҳар як НБО дар расми 14 нишон дода шудаанд.

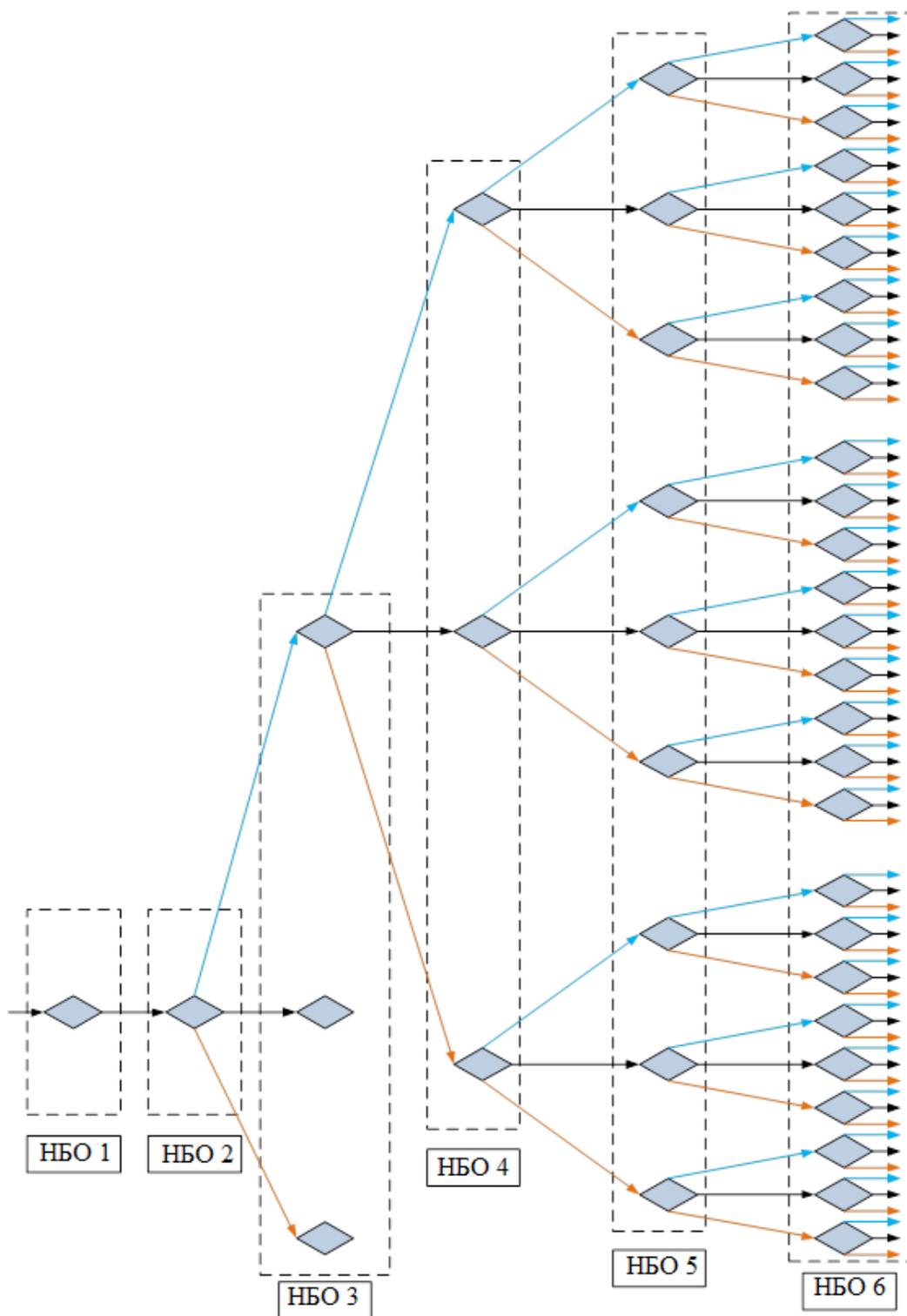


Расми 14 – Речаҳои имконпазири обанборҳои НБО

Силсилаи НБО-е, ки дар дарёи Вахш ҷойгир шудаанд (расми 13), ҳангоми оптимизатсия аз рӯи модели математикии пешниҳодшуда ва речаҳои обанборҳо (расми 14) метавонанд дар речаҳои зерини эҳтимолӣ фаъолият намоянд. Масалан, НБО-1 дар расми 15 – НБО Роғун – аз рӯи чадвали додашудаи ҳолӣ ва пур намудани обанбор, яъне мутобиқи

чадвали танзимгари таҳияшуда фаъолият намуда, миқдори муайяни обро сарф мекунад, ки ба $Q_{1,t}^{НБО} = Q_{1,t}^{сарфа}$ баробар аст.

Дар НБО Норақ обанбор дорои танзими солонаи чараён буда, он метавонад дар се речаи имконпазир фаъолият намояд, ки дар расми 14 нишон дода шудаанд. Яъне обанбори НБО-2 метавонад илова ба воридоти об аз обанбори худ низ об холи намояд, онро бо истифода аз қисми воридот пур кунад ё ҳаҷми обе, ки ба воридот баробар аст, сарф намуда, дар речаи транзитӣ фаъолият кунад (расми 15).



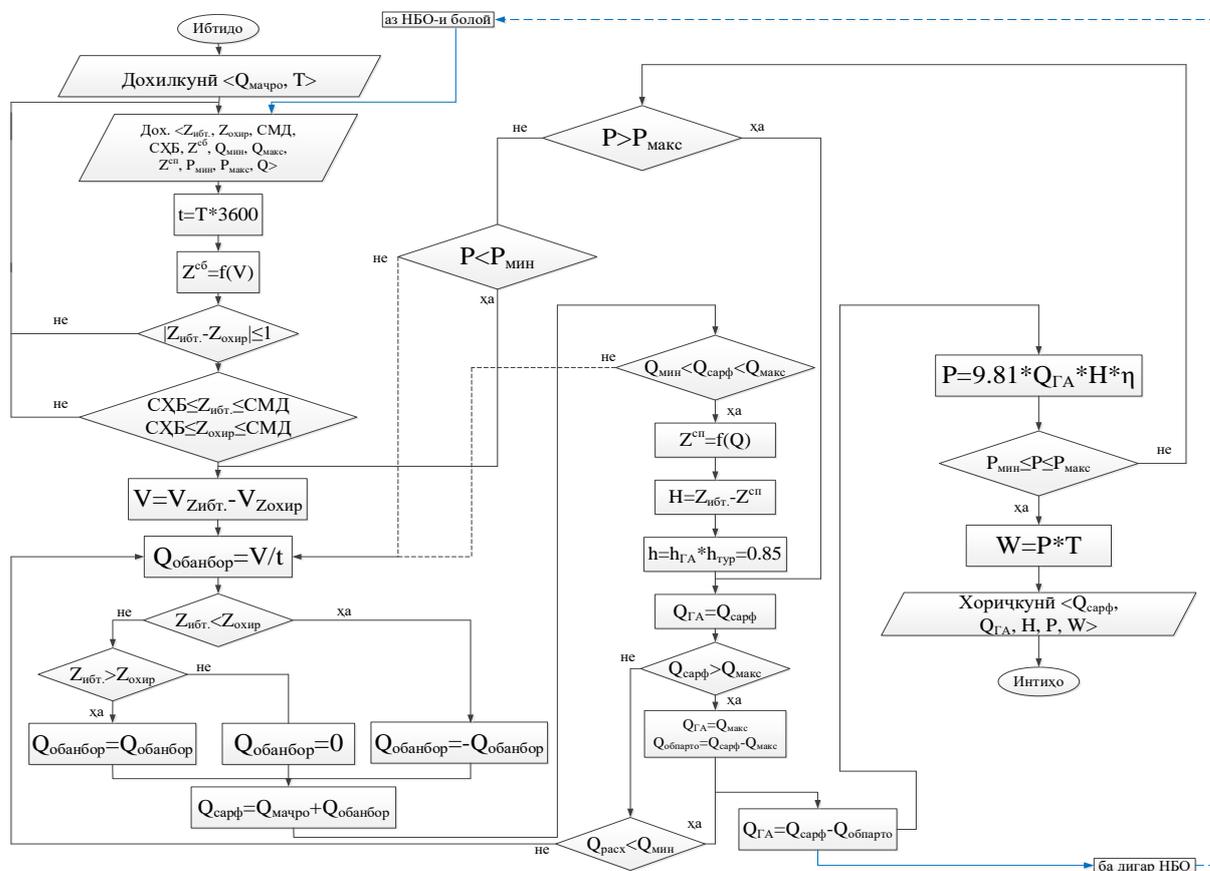
Расми 15 – Модели речаҳои кори силсилаи НБО-и дарёи Вахш

Минбаъд дар силсила чараёни об аз НБО-2 ба обанбори НБО-3 - НБО Бойғозӣ ворид мегардад. Ба ҳар яке аз се речаи имконпазири НБО-2 се речаи НБО-3 мувофиқат мекунад, яъне ба се речаи НБО-2 - 9 речаи эҳтимолии НБО-3 рост меояд. Ба ҳамин монанд, дар поёноби силсила чараёни об ба НБО-4 (Сангтӯда-1), НБО-5 (Сангтӯда-2) ва НБО-6 (НБО Сарбанд) ворид шуда, ҳар яке онҳо низ метавонад дар се речаи корӣ фаъолият намояд, чуноне ки дар расми 15 нишон дода шудааст.

Бо дарназардошти се речаи имконпазири ҳар як обанбор, барои силсилае, ки аз 6 НБО иборат аст, 243 комбинатсияи назариявии эҳтимолии речаҳо ба вуҷуд меояд.

Барои оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш тибқи модели идоракунии пешниҳодшуда зарурати таҳияи алгоритм барои идоракунии оптималии кӯтоҳмуддат ба миён меояд, ки имкон медиҳад ҳамаи маҳдудиятҳои дар боло зикршуда ва дигар параметрҳои истифодаи НБО-ҳои силсила ба ҳисоб гирифта шаванд.

Барои оптимизатсияи кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО-и дар дарёи Вахш фаъолияткунанда, муаллиф алгоритмери пешниҳод намудааст, ки ҳамаи маҳдудиятҳоро ба назар гирифта, ба таври муфассал дар расми 16 нишон дода шудааст.



Расми 16 – Блок-схемаи алгоритми идоракунии оптималии силсилаи НБО-и Вахш бо дарназардошти НБО Роғун

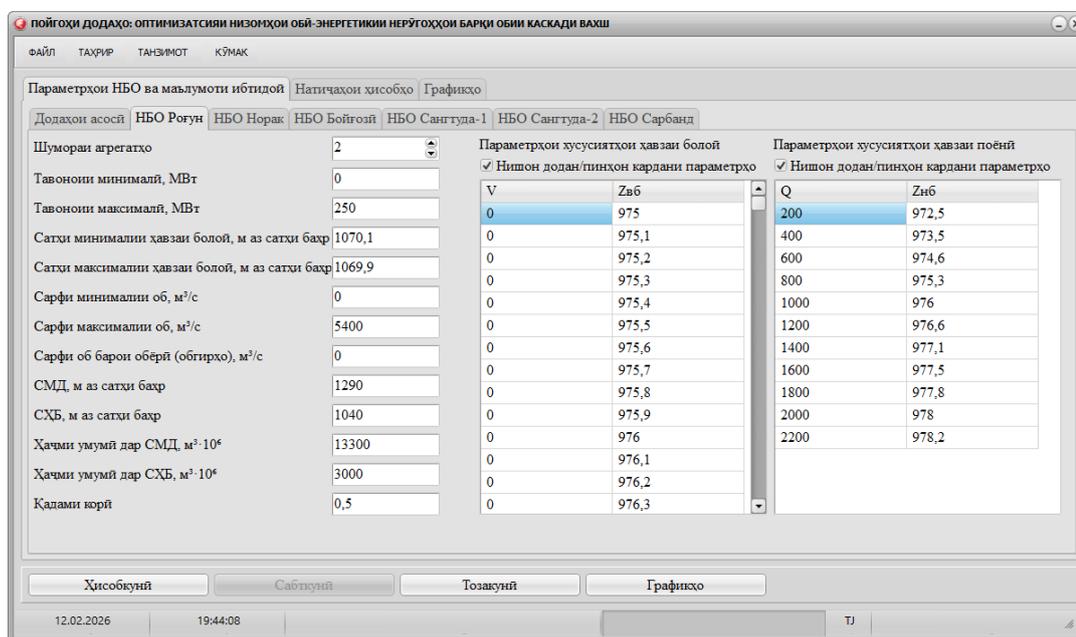
Ҳисоб аз воридоти об ба обанбори НБО-и i -ум оғоз мегардад; дар ибтидо барои НБО-и Роғун ва барои давраи ҳисоб – оптимизатсия (соатҳо, шабонарӯз) муайян карда мешавад. Сипас барои ҳар як НБО параметрҳои зерин дода мешаванд: – қиматҳои ҳадди аксар ва ҳадди ақали иқтидор; – сатҳҳои болооб – ҳадди аксар ва ҳадди ақал; – сарфи ҳадди аксар ва ҳадди ақали об; – инчунин сатҳҳои СМД ва СХБ.

Баъдан бо истифода аз $Z_{i,ибт.}^{сб}$ ва $Z_{i,охир}^{сб}$ вобастагии сатҳи болооб аз ҳаҷм $V_{i,t} = f_i^{zv}(Z_{i,t}^{сб})$, ҳаҷми оби аз обанбор сарфшаванда (ё чамъшаванда) муайян карда

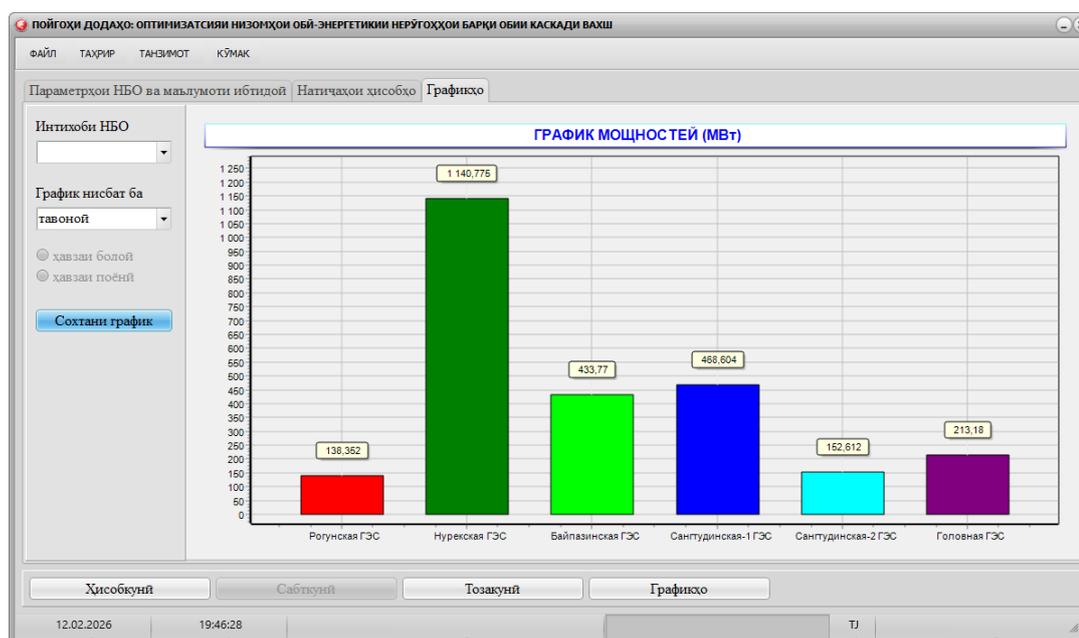
мешавад $\pm \Delta V_i$. Пас аз он сарфи об аз обанбор $Q_{i,t}^{HBO}$ ҳисоб мегардад. Дар ин марҳила вобаста ба сарфи додашуда $Z_{i,убт}^{cb}$ ва $Z_{i,охир}^{cb}$ муайян карда мешавад, ки НБО дар кадом реча ҷаъолият мекунад. Аз рӯи сарфи об ба поёноб, бо истифода аз қачнамои поёноб $Z_{i,t}^{cn} = f(Q)$, сатҳи поёноб муайян карда мешавад. Бо донишони сатҳҳои болооб ва поёноб, таъйиқ $H_{i,t}$ ҳисоб карда мешавад. Сипас коэффисиенти ғоиданокии гидроагрегат η_i , иқтидори НБО P ва истехсоли нерӯи барқ W муайян мегарданд.

Барои ҳалли масъалаи оптимизатсияи кӯтоҳмуддат дар асоси усулҳои барномарезии ҳаттӣ таъминоти барномавӣ барои МЭҲ таҳия шудааст – «Оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи нерӯгоҳҳои барқи обии Вахш» (шаҳодатномаи RU2025618934) ва инчунин пойгоҳи додаҳо (шаҳодатнома №1202400529).

Дар расмҳои 17 ва 18 саҳифаҳои барномаи таҳияшуда нишон дода шудаанд, ки дар асоси алгоритми дар расми 16 пешниҳодгардида амалӣ шудаанд.



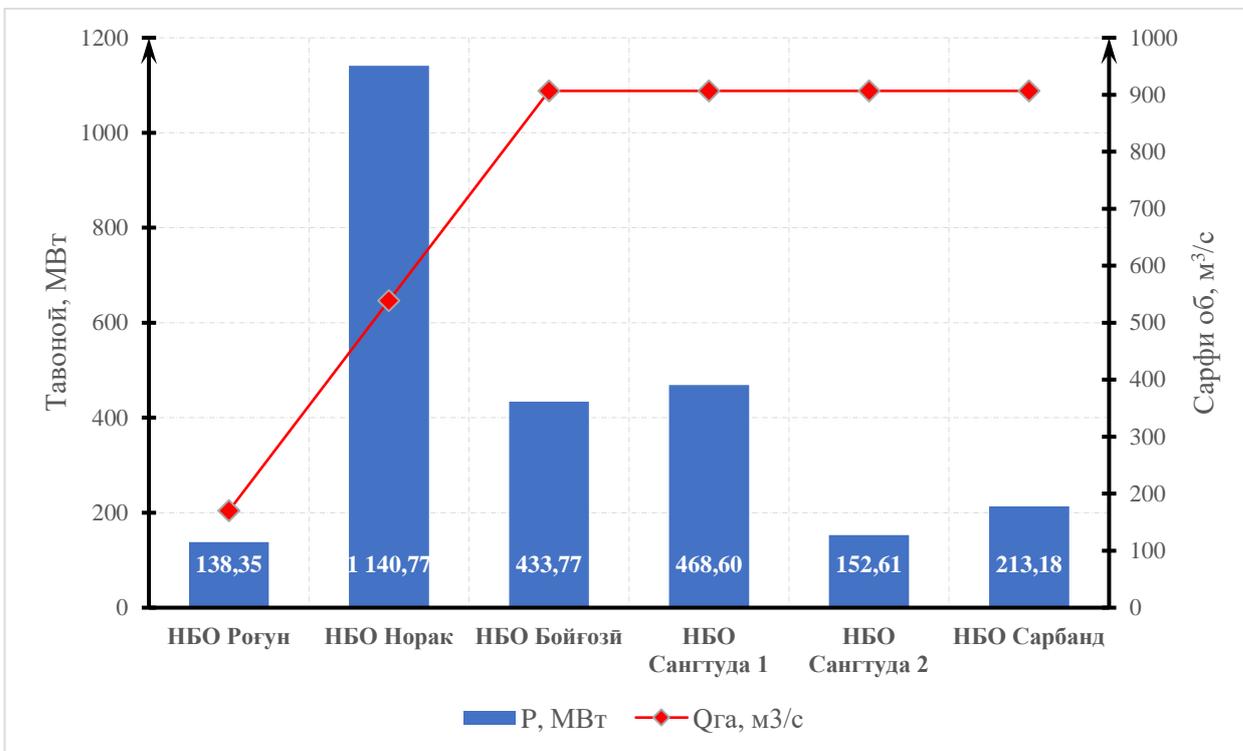
Расми 17 – Ҷадвали барнома «Параметрҳои НБО ва додаҳои ибтидоӣ»



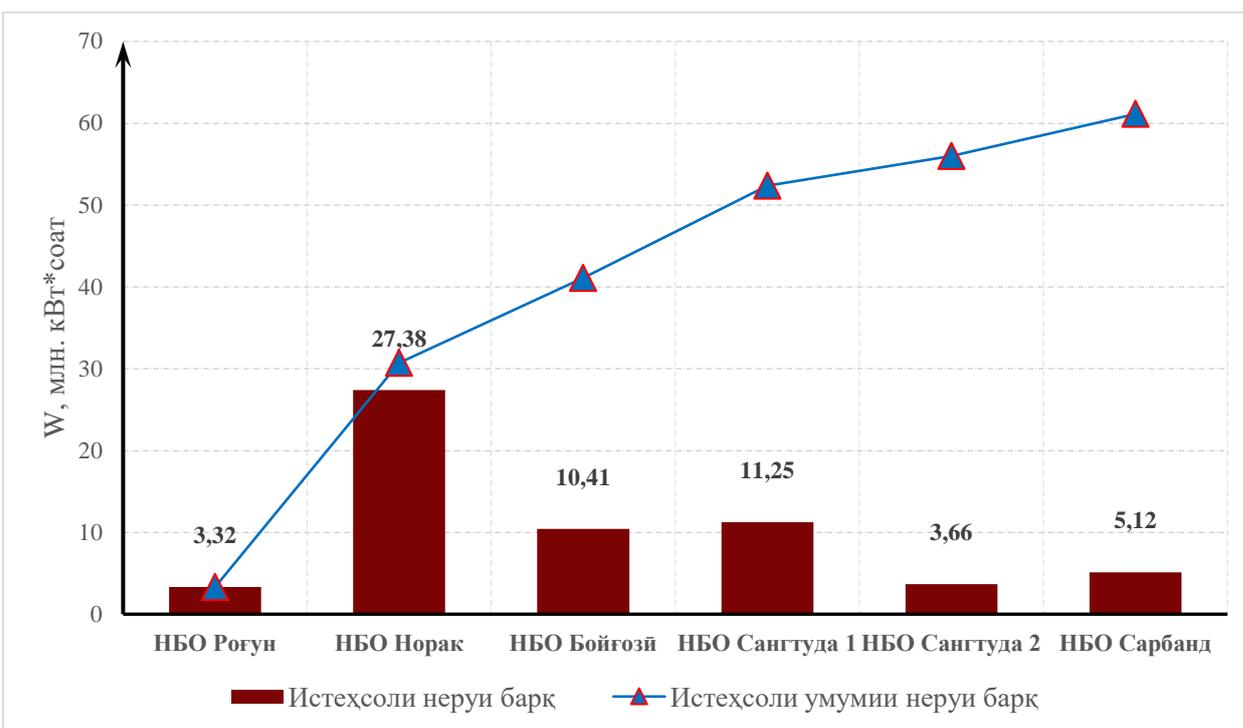
Расми 18 – Ҷадвали барнома «Графикҳо»

Интерфейси барнома аз саҳифаҳои зерин иборат аст: «*Параметрҳои НБО ва додаҳои ибтидоӣ*», ки дар он ворид намудани *додаҳои асосӣ* зарур мебошад, аз ҷумла воридоти об ба обанбори НБО-и яқум – НБО Роғун ва давомнокии давраи оптимизатсия. Ҳамчунин дар ҳамин саҳифа параметрҳои ҳар як НБО-и силсилаи Вахш ворид карда мешаванд, аз ҷумла қиматҳои ҳадди аксар ва ҳадди ақали иқтидор; сатҳҳои болооб; сарфи ҳадди аксар ва ҳадди ақали об; қадами ҳолӣ намудани обанбор ва дигар параметрҳо.

Натиҷаҳои бадастомада хангоми кори оптималии шабонарӯзии НБО-и силсилаи дарёи Вахш дар расмҳои 19 ва 20 нишон дода шудаанд.



Расми 19 – Иқтидори шабонарӯзӣ ва сарфи оби силсилаи НБО-и Вахш



Расми 20 – Истеҳсоли нерӯи барқ ва истеҳсоли умумии силсилаи НБО

Дар асоси моделҳо ва алгоритмҳои пешниҳодшуда дар забони барномасозии Delphi маҷмӯи барномавӣ таҳия шудааст, ки ҳисобҳои оптимизатсиониро бо истифода аз усули барномарезии хаттӣ дар давраи кӯтоҳмуддат иҷро намуда, меъёри ҳадди аксари истеҳсоли нерӯи барқро бо дарназардошти маҳдудиятҳои гидравликӣ, техникӣ, истифода ва энергетикӣ таъмин менамояд.

Равишҳои дар ин боб аз ҷониби муаллиф таҳияшуда имкон медиҳанд, ки речаҳои кори НБО-и дар силсилаи дарёи Вахш фаъолияткунанда дар давраи кӯтоҳмуддат оптимизатсия гардида, самаранокии фаъолияти онҳо ҳам дар сатҳи силсила ва ҳам дар тамоми системаи энергетикӣ баланд бардошта шавад.

ХУЛОСАҲО ВА ТАВСИЯҲО

Дар кори диссертатсионӣ масъалаи муҳими идоракунии оптималии речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш бо дарназардошти ба истифода додани НБО Роғун ҳал карда шудааст. Аз рӯи натиҷаҳои таҳқиқоти анҷомдодашуда хулосаҳои умумӣ ва тавсияҳои аз лиҳози илмӣ асоснок барои истифодаи амалии натиҷаҳои бадастомада пешниҳод мегарданд.

Хулосаҳои умумӣ

1. Баррасӣ ва таҳлили усулҳои оптимизатсия дар соҳаи энергетика ва таснифоти онҳо нишон медиҳад, ки барои ҳалли масъалаҳои дорои хусусияти детерминистӣ ва шумораи маҳдуди тағйирёбандаҳо истифодаи усулҳои классикӣ мувофиқ мебошад; барои ҳалли масъалаҳои бисёрченакаи ғайрихаттӣ усулҳои бар пояи алгоритмҳои метаэвристикӣ самараноканд; ва барои ҳалли масъалаҳои оптимизатсионӣ бо ҳаҷми бузурги додаҳои ибтидоӣ истифодаи алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ афзалият дорад [7-М, 13-М, 17-М].

2. Таҳлили речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш, аз ҷумла пас аз ба истифода додани ду агрегати НБО Роғун дар асоси агрегатҳои муваққатӣ, нишон медиҳад, ки аз ҷониби силсила тақрибан 89 % нерӯи барқи кишвар истеҳсол мешавад, ки аз он 8 % ба ҳиссаи НБО Роғун рост меояд. Ба иқтисори пурра ба кор даромадани НБО Роғун бо обанбори дорои танзими бисёрсолаи чараёни дарё имкон медиҳад, ки самаранокии фаъолияти силсила НБО-и дарёи Вахш тавассути идоракунии оптималии речаҳои дарозмуддат баланд бардошта шуда, истеҳсоли нерӯи барқ дар кишвар афзоиш ёбад [1-М, 4-М, 14-М, 18-М].

3. Модел ва маҷмӯи барномавии барои пешгӯии дарозмуддати чараёни дарёи Вахш таҳияшуда дар асоси усулҳои омӯзиши мошинӣ имкон медиҳанд, ки речаҳои оптималии ҳолӣ ва пур намудани обанбори НБО Роғун дар давраи дарозмуддат муайян гардида, самаранокии кори НБО Роғун ва тамоми силсила баланд бардошта шавад [10-М, 17-М, 19-М, 20-М].

4. Ҷадвалҳои танзимгарии таҳияшуда барои НБО Роғун имконият медиҳанд, ки речаҳои оптималии ҳолӣ ва пур намудани обанбор бо дарназардошти хусусиятҳои истифодаи он муайян карда шаванд [4-М, 5-М, 17-М].

5. Модели математикӣ ва алгоритми пешниҳодшуда барои оптимизатсияи кӯтоҳмуддати речаҳои кори силсилаи НБО-и дарёи Вахш имкон медиҳанд, ки маҳдудиятҳои гидрологӣ, истифода ва техникӣ ба назар гирифта шаванд [1-М, 6-М, 21-М, 22-М].

6. Барномаи барои МЭҲ таҳияшуда дар асоси модели пешниҳодшуда ва алгоритм имкон медиҳад, ки речаҳои кори ҳар як НБО-и силсила дар давраи кӯтоҳмуддат бо истифода аз усули барномарезии хаттӣ оптимизатсия карда шаванд [6-М, 21-М, 22-М].

7. Татбиқи маҷмӯии идоракунии бисёрзинагӣ (пешгӯии чараёни дарё – оптимизатсияи дарозмуддат – оптимизатсияи кӯтоҳмуддат) дар асоси моделҳои математикӣ, алгоритмҳо ва таъминоти барномавии таҳияшуда ба идоракунии самаранокии речаҳои силсилаи НБО-и Вахш бо ба кор даровардани НБО Роғун мусоидат менамояд [1-М, 6-М, 7-М, 13-М, 19-М, 20-М, 21-М, 22-М].

Тавсияҳои барои истифодаи амалӣ

Методикаҳои дар чараёни таҳқиқот бадастомада ва маҷмӯи барномаҳои таҳияшуда дар асоси омӯзиши мошинӣ [20-М], ки барои пешгӯии дарозмуддати чараёни дарёи Вахш

таъйин шудаанд, метавонанд ҳангоми банақшагирии речаҳои оптималии кори НБО-и Роғун ва тамоми силсилаи НБО истифода шаванд.

Чадвалҳои танзимгариӣ таҳияшуда [5-М] барои идоракунии оптималии речаҳои дарозмуддати НБО Роғун, метавонанд ҳамчун заминаи меъёрию методӣ барои идоракунии дарозмуддати речаҳои обанбори танзими бисёрсола истифода шаванд. Ин чадвалҳо кори мувофиқашуда ва аз ҷиҳати энергетикӣ самараноки НБО Роғунро бо силсилаи НБО-и поёнобӣ таъмин намуда, имкон медиҳанд, ки тавоноии кафолатӣ дар соли камобии ҳисобӣ нигоҳ дошта шавад ва онҳо метавонанд дар ҶСК «НБО Роғун» ҷорӣ карда шаванд.

Натиҷаҳои бадастомада оид ба оптимизатсияи кӯтоҳмуддат - моделҳои математикӣ ва таъминоти барномавии таҳияшуда [20-М, 21-М, 22-М] метавонанд дар ҶСК “Барқи Тоҷик” ҳангоми идоракунии оптималии речаҳои энергетикӣ силсилаи НБО-и Вахш, барои тақсимоии оптималии захираҳои об байни НБО, афзоиши истеҳсоли шабонарӯзии нерӯи барқи силсила, инчунин ҳангоми рушди минбаъдаи системаи электроэнергетикӣ Тоҷикистон истифода шаванд.

Моделҳо ва алгоритмҳои математикӣ дар натиҷаи таҳқиқот ба дастомада, дар раванди таълими Донишгоҳи техникӣ Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ ҷорӣ карда шудаанд ва дар иҷрои корҳои илмӣ-таҳқиқотӣ магистрантҳо ва докторантони PhD истифода мешаванд.

РҶҲАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА

1. Гидроэнергетика: учебное пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. - 2-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 620 с.
2. Цветков Е.В., Алабышева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные режимы электростанций в энергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с.
3. АСУ и оптимизация режимов энергосистем: Учеб. пособие для студентов вузов / Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк. 1983. – 208 с.
4. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы: монография / Ю. А. Секретарев. – Новосибирск, НГТУ, 2007. – 308 с.
5. Тягунов, М.Г. Управление режимами ГЭС. - М.: МЭИ, 1984.
6. Александровский, А. Ю. Теория и методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС: специальность 05.14.10: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александровский Алексей Юрьевич. – Москва, 1991. – 257 с.
7. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина; Новосибирск, 2007. – 356 с.
8. Ахророва А.Д., Аманджанов Р.М., Доронкин К.А. Энергетика Таджикистана: современные тенденции и перспективы устойчивого развития. Душанбе, 2005. 238 с.
9. 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.
10. Колебания температуры и осадков в верховьях бассейна реки Вахш / А. А. Гулахмадов // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 3(188). – С. 152-164.
11. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах = Optimal management of HPP regimes in electric power systems: монография / Ю. А. Секретарев, Ш. М. Султонов. – Душанбе: ТТУ им. акад. М. С. Осими, 2020. – 144 с. – 300 экз. ISBN 978-99975-1-240-6.

РЎӢХАТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМИИ ДОВТАЛАБИ ДАРАЧАИ ИЛМӢ
Наирияхо дар маҷаллаҳои илмӣ, ки Комиссияи олии аттестатсионии назди
Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсия додааст:

[1-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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.

Интишорот дар пойгоҳҳои байналмилалӣ SCOPUS ва IEEE

[8-М]. **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-М]. **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.

Интишорот дар навириҳои илмӣ, маводҳои конференсияҳои минтақавӣ ва байналмилалӣ:

[10-М]. **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-М]. **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-М]. **Раджабов М.Ш.** Анализ режимов работы Кайраккумской ГЭС / М.Ш. Раджабов, М.И. Исроилзода, Ф. Рахим, рук. Ш.М. Султонзода // Радиотехника, 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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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.

Шаҳодатномаҳои муаллифӣ ва патентҳо

[20-М]. **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-М]. **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-М]. **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.

АННОТАТСИЯ

ба автореферати диссертатсияи Раҷабов Мирзошариф Шарифович дар мавзуйи “Оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш ба истифода додани НБО Роғун”, барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа (PhD) - доктор аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи электрикӣ (6D071804 - Системаҳо ва комплексҳои энергетикӣ)

Калимаҳои калидӣ: гидроэнергетика, нерӯгоҳи барқӣ обӣ, оптимизатсияи реча, силсилаи НБО-и Вахш, НБО Роғун, пешгуи чараёни дарё, омӯзиши мошинӣ, обанбор, чадвалҳои диспетчерӣ, системаи электроэнергетикӣ.

Мақсади таҳқиқот – баланд бардоштани самаранокӣ ва эътимоднокии системаи энергетикӣ Тоҷикистон тавассути таҳия ва татбиқи маҷмӯи моделҳои математикӣ, алгоритмҳо ва таъминоти барномавӣ барои идоракунии оптималии бисёрсатҳии речаҳои кори силсилаи Вахш бо дарназардошти ба истифода додани нерӯгоҳи барқӣ обии Роғун мебошад.

Объекти таҳқиқот – нерӯгоҳҳои барқӣ обие мебошанд, ки дар силсилаи дарёи Вахш дар шароити нави истифода пас аз ба кор даромадани нерӯгоҳи барқӣ обии Роғун ҷаъолият мекунад.

Навгони илмӣ таҳқиқот:

1. Схемаи оптималии бисёрсатҳии идоракунии речаҳои кори НБО-ҳои силсилаи Вахш ҳамчун масъалаи идоракунии системаи мураккаби техникӣ бо маҳдудиятҳои омехта ва параметрҳои воридотии стохастикӣ сохторбандӣ ва формализатсия карда шудааст.

2. Дар доираи оптимизатсияи дарозмуддат схемаи дусатҳӣ пешниҳод ва татбиқ гардидааст. Дар сатҳи аввал модели гибридӣ барои пешгуи чараёни оби дарёи Вахш дар асоси омӯзиши мошинӣ таҳия шуда, бартарии он нисбат ба усулҳои анъанавӣ нишон дода шудааст. Дар сатҳи дуюм, дар асоси маълумоти пешгуишуда чадвалҳои диспетчерӣ барои НБО-и Роғун таҳия гардидаанд, ки стратегияи танзими бисёрсоларо дар шакли минтақаҳои речаҳои иҷозатдодашуда формализатсия менамоянд.

3. Дар доираи оптимизатсияи кӯтоҳмуддат барои силсилаи Вахш модели муфассали математикӣ дар шакли масъалаи барномарезии хаттии андозаи калон таҳия шудааст, ки алоқаи гидравликӣ, маҷмӯи маҳдудиятҳо аз рӯи сатҳҳо, сарфҳо ва иқтидорҳо барои ҳар як НБО, инчунин се речаи эҳтимолии кори ҳар як обанборро ба назар мегирад, ки то 243 комбинатсияи сохтори речаҳо барои тамоми силсиларо ба вуҷуд меорад.

4. Бо мақсади таъмини алгоритмӣ ва барномавии масъалаҳои гузашташуда маҷмӯаҳои махсуси барномавӣ ва пойгоҳҳои додаҳо таҳия ва ба қайд гирифта шудаанд, ки методологияи пешниҳодшударо амалӣ менамоянд: а) «ML-VakhshRiver» – барои пешгуи чараёни оби дарё; б) барои идоракунии кӯтоҳмуддат алгоритми «Оптимизатсияи речаҳои кори силсилаи НБО-и Вахш», ки ҷустуҷӯи пайдарпайи речаҳои иҷозатдодашударо бо дарназардошти маҳдудиятҳо амалӣ намуда, варианти оптималиро аз рӯи меъёри ҳадди аксари истеҳсоли нерӯи барқ интихоб мекунад.

Соҳаи татбиқ:

1. Барномаи дар асоси омӯзиши мошинӣ таҳияшуда барои пешгуи чараёни оби дарёи Вахш метавонад ҳангоми оптимизатсияи дарозмуддати речаҳои кори НБО ва банақшагирии истеҳсоли нерӯи барқӣ тамоми силсилаи истифода шавад.

2. Чадвалҳои танзимгари сохташуда имкон медиҳанд, ки речаҳои ҳоли кардан ва пур намудани обанбори НБО-и Роғун дар фосилаи дарозмуддати вақт оптимизатсия гардад ва метавонанд дар ҚСҚ «Барқи Тоҷик» татбиқ шаванд.

3. Алгоритми пешниҳодшуда ва таъминоти барномавии барои оптимизатсияи речаҳои кӯтоҳмуддати кори силсилаи НБО-и Вахш таҳияшуда дар омодагии донишҷӯён ва магистрантон аз рӯи ихтисоси «Нерӯгоҳҳои барқӣ» ҳангоми омӯзиши фанҳои «Оптимали намудани системаҳои электроэнергетикӣ», «Речаҳои кори нерӯгоҳҳо ва системаҳои электроэнергетикӣ» ва «Дастгоҳҳои гидроэнергетикӣ» дар Донишгоҳи техникийи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ истифода мешаванд.

АННОТАЦИЯ

к автореферату диссертации Раджабова Мирзошарифа Шарифовича на тему «Оптимизация режимов работы ГЭС Вахшского каскада с вводом в эксплуатацию Рогунской ГЭС» на соискание учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 - Энергетические системы и комплексы).

Ключевые слова: гидроэнергетика, гидроэлектростанции, оптимизация режимов, ГЭС Вахшского каскада, Рогунская ГЭС, прогнозирование стока, машинное обучение, водохранилища, диспетчерские графики, электроэнергетическая система.

Цель 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.

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

Научная новизна диссертационной работы:

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..

Область применения:

1. 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.

2. Построенные диспетчерские графики позволяют оптимизировать режим сработки и заполнения водохранилища Рогунской ГЭС в долгосрочном временном интервале, которые могут быть применены в ОАО «Барки Точик».

3. 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.

ANNOTATION

to the abstract of the dissertation of Radzhabov Mirzosharif Sharifovich on the topic "Optimization of the operating modes of the Vakhsh cascade hydro power plants with the commissioning of the Rogun hydro power plant" for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)-doctor in the specialty 6D071800 – Electrical Power Engineering (6D071804 - Energy systems and complexes).

Keywords: hydropower, hydroelectric power plants, optimization modes, Vakhsh cascade HPP, Rogun HPP, streamflow forecasting, machine learning, reservoirs, dispatch schedules, electric power system.

The aim of the research. The purpose of the study is to increase the efficiency and reliability of Tajikistan's energy system by developing and implementing a set of mathematical models, algorithms and software for optimal multi-level control of the Vakhsh cascade modes, taking into account the commissioning of the Rogun HPP.

The object of the dissertation research is the hydroelectric power plants operating in the cascade of the Vakhsh River under new operating conditions after the commissioning of the Rogun HPP.

Scientific novelty of the research.

1. The optimal multi-level control scheme for the operating modes of the Vakhsh cascade hydropower plants has been structured and formalized as a control problem of a complex technical system with mixed constraints and stochastic input parameters.

2. As part of long-term optimization: a two-level scheme is proposed and implemented. At the first level, a hybrid model has been developed for predicting the flow of the Vakhsh River based on machine learning, which has shown superiority over traditional methods. At the second level, dispatching schedules for the Rogun HPP have been developed based on forecast data, formalizing a multi-year regulatory strategy in the form of acceptable regime zones.

3. As part of short-term optimization, a detailed mathematical model has been developed for the Vakhsh cascade in the form of a large-scale linear programming problem that takes into account hydraulic coupling, a set of restrictions on levels, costs and capacities for each hydroelectric power station, as well as three possible operating modes for each reservoir, which generates up to 243 structural combinations of modes for the entire cascade.

4. To provide algorithmically and programmatically support the tasks set, specialized software systems and databases have been developed and registered that implement the proposed methodology: a) "ML-VakhshRiver" for predicting river flow; b) for short-term management, the algorithm "Optimization of operating modes of the Vakhsh Cascade hydro power plant", which implements a sequential enumeration of permissible modes, taking into account restrictions, and a choice of optimal according to the criterion of maximum power generation.

Field of application:

1. The program developed on the basis of machine learning for predicting the flow of the Vakhsh River can be used for long-term optimization of HPP modes and planning of power generation of the entire cascade.

2. The constructed dispatch schedules make it possible to optimize the mode of operation and filling of the reservoir of the Rogun HPP in the long-term time interval, which can be applied at JSC Barki Tojik.

3. The proposed algorithm and the created software for optimizing the short-term modes of the Vakhsh cascade HPP are used in the preparation of students and masters in the specialty "Electric power plants" in the study of the disciplines "Optimization of electric power systems", "Operating modes of power plants and electric power systems" and "Hydropower plants" of the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.

Подписано к печати 06.02.2026 Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ТТУ имени акад. М.С. Осими.
г. Душанбе, 734042, пр. акад. Раджабовых, 10а.

Ба чоп 06.02.2026 имзо шуд. Андоза 60x84 1/16.
Қоғаз офсетӣ. Адади нашр 100 нусха.
Нашриёти ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ.
ш. Душанбе, 734042, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10а.