

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ

им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Издание основано в 1931 году

Том 311

Санкт-Петербург
2024

УДК 626/627 (06)
ISSN 0368-0738

Учредитель:
АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ:

В.Б. Штильман (главный редактор), В.Б. Глаговский, Е.Н. Беллендир, А.Г. Василевский, В.В. Елистратов, И.И. Загрядский, Т.В. Иванова, Д.А. Ивашинов, В.И. Климович, Г.Л. Козинец, Д.В. Козлов, В.С. Кузнецов, М.Р. Мишина, Р.Н. Орищук, А.Б. Пономарев, В.А. Прокофьев, С.В. Сольский, А.М. Юделевич

В сборнике представлены материалы XV научно-технической конференции ПАО «РусГидро» «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии», прошедшей 25–27 октября 2023 года в Санкт-Петербурге на базе АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и Санкт-Петербургского Политехнического университета.

Включенные в сборник статьи соответствуют тематике секций по оборудованию ГЭС и ГТС, гидравлическим исследованиям ГТС, основаниям и грунтовым ГТС объектов энергетики и промышленности, гидротехнике для ТЭС, АЭС и промышленных предприятий, обеспечению безопасности ГТС с учетом новых требований законодательства, гидротехническому строительству в Арктике.

Сборник предназначен для специалистов в области инженерной геологии и гидрогеологии, механики грунтов, гидравлики, гидротехники, экологии, а также для студентов, аспирантов и преподавателей соответствующих дисциплин.

The collection includes materials of the XV Scientific and Technical Conference «Hydropower. Hydraulic Engineering. New Developments and Technologies», held on October 25–27 in St. Petersburg on the base of Vedeneev VNIIG and St. Petersburg Polytechnic University.

The articles included in the collection correspond to the topics of the sections on equipment for HPP and hydraulic structures, hydraulic research of hydraulic structures, foundations and ground hydraulic structures of energy and industrial facilities, hydraulic engineering for thermal power plants, nuclear power plants and industrial enterprises, ensuring the safety of hydraulic structures taking into account new legal requirements, hydraulic engineering construction in the Arctic.

The collection is intended for specialists in the field of engineering geology and groundwater hydrology, soil mechanics, hydraulic, hydraulic engineering, ecology, as well as for students, postgraduates and lectures of the respective branches of study.

Сборник «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» входит в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК) по следующим группам научных специальностей:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения,
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения,
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС-77-36233 от 15 мая 2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс» – 60490.

E-mail: izvestia@vniig.ru

ПРЕДИСЛОВИЕ

Крупнейшее в нашей стране мероприятие для специалистов-гидротехников и энергетиков – научно-техническая конференция (НТК) «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» – впервые прошло в Санкт-Петербурге в 2005 году, продолжая традицию 60–90-х годов прошлого столетия, связанную с регулярным проведением координационных научных совещаний по гидроэнергетике.

Организаторами НТК являются ПАО «РусГидро», АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), на базе которого конференция проводится с самого начала.

В 2023 году конференция состоялась в 15-й раз и собрала на своей площадке около 600 специалистов из более 200 организаций страны и иностранных государств. Программа мероприятия включала два пленарных заседания, молодежный день, 10 научных секций с участием 150 докладчиков, а также семинар Ассоциации «Гидроэнергетика России» по защите сооружений от повышенной вибрации.

На пленарном заседании, открывшем работу конференции, выступили руководители крупнейших отраслевых компаний, включая ПАО «РусГидро», ПАО «ТГК-1», Ассоциацию «Гидроэнергетика России». Эксперты предложили вниманию участников НТК аналитические материалы о современных тенденциях в отрасли, инновационных технологиях и новых компетенциях в области исследований, в том числе в Арктике, о состоянии и перспективах гидроэнергетики и гидротехнического строительства, государственной поддержке строительства и модернизации объектов.

Арктическая тематика нашла свое отражение и в программе молодежного дня. Его участники – около 60 молодых специалистов и студентов крупнейших технических вузов – прослушали лекции экспертов из ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и Восточного центра государственного планирования Министерства развития Дальнего Востока и Арктики о стратегических приоритетах России в Арктике и текущих проектах гидротехнического строительства. Полученные знания будущие специалисты смогли закрепить на кейс-семинаре «Перспективы развития Арктики до 2050 года. Технологии. Экология. Экономика».

Вопросы, связанные с развитием Арктического региона, впервые в рамках конференции были также выделены в отдельную секцию «Арктический центр: гидротехническое строительство в Арктике». Ее участники обсудили моделирование волновых и ледовых воздействий на ГТС, реализацию проектов сооружений для производства сжиженного природного газа, разработку специальных легких бетонов для конструкций в суровых климатических условиях, особенности проведения буровзрывных работ при строительстве портов в районах Крайнего Севера и другое.

Большой интерес участников вызвали и традиционные для конференции секции.

На секции «Оборудование ГЭС и ГТС» значительное количество докладов было посвящено оценке фактического технического состояния основного и вспомогательного оборудования станций, а также вопросам измерения и оценки параметров вибраций.

В рамках секции «Гидравлические исследования ГТС» были рассмотрены актуальные исследования для водосбросных сооружений Рогунской ГЭС, исследования волновых воздействий на портовые сооружения и моделирование защиты морского дна от размывов.

На секции «Бетонные и железобетонные конструкции ГТС. Новые разработки и методы исследований» специалисты обсудили совершенствование методов расчета бетонных и железобетонных конструкций ГТС, развитие численных методов расчета.

Секция «Основания и грунты ГТС объектов энергетики и промышленности» включала в себя широкий круг вопросов, в том числе обеспечение надежности ГТС в сложных инженерно-геологических условиях, фильтрационной прочности оснований ГТС, применение современных геосинтетических материалов.

Участники секции «Гидротехника для ТЭС, АЭС и промышленных предприятий» обменялись опытом эксплуатации гидротехнических сооружений и энергетического оборудования ТЭС, АЭС и промышленных предприятий.

Экологические вопросы обсудили участники одноименной секции «Экологические проблемы энергетики и гидротехники».

Актуальными темами секции «Новые материалы и технологии в строительстве» стали: продление сроков эксплуатации конструкций гидротехнических сооружений, улучшение характеристик бетонных смесей и бетона, использование вторичных ресурсов и др.

Докладчики на секции «Обеспечение безопасности ГТС с учетом новых требований законодательства. Методы и средства контроля состояния ГТС» представили результаты работы по пересмотру ряда Постановлений Правительства РФ и подзаконных актов и обсудили предложения по дальнейшему совершенствованию нормативно-правовой базы. В рамках секции обозначена актуальность внедрения ИДС, АСДК как элемента системы мониторинга и оперативной оценки состояния ГТС, а также дальнейшего развития информационных систем.

На секции «Малая гидроэнергетика» участники затронули как частные вопросы, связанные, например, с поиском и применением оптимальных архитектурно-строительных решений по зданиям МГЭС, так и тенденции, касающиеся инвестиционной привлекательности проектов малой гидроэнергетики.

Доклады, получившие высокую оценку экспертов и рекомендованные организационным комитетом НТК для публикации, включены в данный выпуск сборника научных трудов «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Также ряд докладов по рекомендации оргкомитета был опубликован в журнале «Гидротехническое строительство».

Главный редактор – доктор техн. наук,
генеральный директор АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»
Б.В. Штильман

Научная статья
УДК 626/627.03.042.019.3

РОЛЬ АНАЛИТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО БЛОКА ПАО «РУСГИДРО» В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ ГТС

**Сергей Борисович Кондратьев¹, Елена Александровна Филиппова²,
Андрей Борисович Веселов³, Георгий Владимирович Охалкин⁴¹**

¹ ПАО «РусГидро», Москва, Россия

^{2,3,4} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ KondratievSB@rushydro.ru

² FilippovaEA@vniig.ru

³ VeselovAB@vniig.ru

⁴ OkhapkinGV@vniig.ru

Аннотация. Рассмотрены основные направления по цифровой трансформации деятельности производственного блока Группы РусГидро в области обеспечения безопасности и надёжности гидротехнических сооружений. Приведены перспективные для разработки базы данных и программные продукты для ЭВМ.

Ключевые слова: *цифровая трансформация, безопасность и надёжность гидротехнических сооружений, производственный блок, Аналитический центр ПАО «РусГидро»*

Для цитирования: Кондратьев С.Б., Филиппова Е.А., Веселов А.Б., Охалкин Г.В. Роль Аналитического центра в цифровой трансформации производственного блока ПАО «РусГидро» в области обеспечения безопасности и надёжности ГТС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 5–13.

Original article

THE ANALYTICAL CENTER'S ROLE IN THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE PRODUCTION UNIT OF PJSC RUSHYDRO IN THE FIELD OF ENSURING THE SAFETY AND RELIABILITY OF HYDRAULIC STRUCTURES

**Sergey B. Kondratiev¹, Elena A. Filippova², Andrey B. Veselov³,
Georgy V. Okhapkin⁴**

¹ PJSC «RusHydro», Moscow, Russia

^{2,3,4} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ KondratievSB@rushydro.ru

² FilippovaEA@vniig.ru

³ VeselovAB@vniig.ru

⁴ OkhapkinGV@vniig.ru

Abstract. The article discusses the main directions for digital transformation of the activities of the Production unit of the RusHydro Group in the field of ensuring the safety and reliability of

hydraulic structures. Promising databases and computer software products for development are presented.

Keywords: *digital transformation, safety and reliability of hydraulic structures, production unit, Analytical Center of PJSC RusHydro*

Forcitation: Kondratiev S.B., Filippova E.A., Veselov A.B., Okhapkin G.V. The analytical center's role in the digital transformation of the production unit of PJSC RusHydro in the field of ensuring the safety and reliability of hydraulic structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:5-13. (In Russ.).

Цифровая трансформация является одним из стратегически важных направлений для устойчивого развития и безопасного функционирования топливно-энергетической отрасли Российской Федерации [1–10].

Целью цифровой трансформации является ускоренный переход энергетического сектора страны на новые управленческие и технологические уровни, обеспечивающие условия для развития топливно-энергетической отрасли и долгосрочного устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации путем оптимизации и трансформации бизнес-процессов с применением цифровых технологий и платформенных решений в условиях высокой динамики изменений внешних и внутренних факторов [1].

Для обеспечения инновационного лидерства в энергетической отрасли в стратегии развития Группы РусГидро до 2035 г. одним из основных направлений развития является цифровая трансформация Группы РусГидро, посредством которой, в том числе, планируется обеспечить надежность и эффективность работы информационных ресурсов, доступность и оперативность управления данными, формирование единого информационного пространства Группы РусГидро на основании ИТ-систем и бизнес-приложений.

В соответствии с выбранной стратегией, вопросам цифровой трансформации (цифровизации) уделено особое внимание в Технической политике Группы РусГидро [11] – документе высшего уровня в иерархии нормативно-технической документации на всех стадиях жизненного цикла производственных объектов Группы РусГидро, обязательном для исполнения всеми структурными подразделениями, филиалами ПАО «РусГидро» и его подконтрольными обществами.

Техническая политика Группы РусГидро [11] определяет понятие «цифровизация» как процесс внедрения цифровых технологий в деятельность Компании в целях повышения операционной эффективности технологических и бизнес-процессов. Это предлагается достигать за счёт применения цифровых технологий, реализации платформы взаимодействия всех участников производственных и управленческих процессов, создания и поддержания цифровой корпоративной культуры.

Среди приоритетных направлений цифровизации в Технической политике Группы РусГидро [11] отмечены:

 построение развитой и интегрированной мультисервисной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры;

 трансформация производственных процессов, моделей управления и процедур планирования;

 использование аналитических систем для обработки больших данных с целью поддержки принятия решений;

создание современных цифровых инструментов мониторинга, удаленной диагностики и прогноза состояния, позволяющих выявлять на ранних стадиях изменения технического состояния основного оборудования и сооружений, определять время и причины возникновения отклонений и возникновения аварийных ситуаций с прогнозированием вероятности наступления аварийных событий, предоставлять уведомления о возможных неисправностях основного технологического оборудования и выдавать рекомендации по их устранению.

Среди ключевых технологий цифровизации в Технической политике Группы РусГидро отмечены:

цифровые технологии автоматизации задач и функций оперативно-технологического управления;

технологии больших данных (Big Data) в рамках создания предиктивной аналитики состояния и оборудования, и сооружений;

технологии искусственного интеллекта;

цифровые двойники;

технологии цифрового проектирования, в том числе технологии информационного моделирования (BIM-технологии).

Осознавая значимость цифровой трансформации для развития, оптимизации и совершенствования различных процессов в рамках своего функционирования, Производственный блок ПАО «РусГидро» уделяет повышенное внимание вопросам цифровизации, в первую очередь, связанным с обеспечением безопасности и надежности ГТС.

Одна из ключевых ролей в инициации и успешном осуществлении цифровой трансформации деятельности Производственного блока ПАО «РусГидро» по отмеченным вопросам принадлежит научно-исследовательским и проектным подразделениям Группы, в частности Аналитическому центру ПАО «РусГидро», выполняющему функции по оценке и прогнозу технического состояния гидротехнических сооружений и оборудования производственных объектов Группы РусГидро, а также техническому сопровождению вопросов эксплуатации ГТС, выработке рекомендаций по выбору технических воздействий в отношении ГТС, контролю их реализации и оценке эффективности в целях обеспечения требований Системы управления безопасностью и надёжностью ГТС Группы РусГидро.

Значимость Аналитического центра в цифровизации процессов по обеспечению безопасности и надежности ГТС связана с особенностями функционирования Аналитического центра, являющегося местом сбора и анализа информации об эксплуатации и выявленных в ее ходе проблемах в работе курируемых комплексов ГТС и механического оборудования (МО) ГТС и одновременно центром компетенций по разработке рекомендаций оптимальных технических решений по ремонту/реконструкции ГТС, использованию современных строительных материалов и технологий, по организации систем мониторинга состояния ГТС (в том числе с учетом импортозамещения) и другим направлениям, связанным с оценкой состояния и обеспечением безопасности ГТС.

Процессы контроля технического состояния ГТС и обеспечения их безопасности, которые осуществляет Аналитический центр, также нуждаются в цифровизации.

Аналитическим центром ВНИИГ в 2020 г. разработана Программа цифровизации основных процессов деятельности Аналитического центра ПАО «РусГидро» по гидротехническим сооружениям, которая в настоящее время совместно с Производственным блоком ПАО «РусГидро» актуализируется с учетом ранее достигнутых результатов и новых задач. В новой редакции Программы, в рамках реализации стратегии развития Общества, предусмотрен значительный технологический шаг в сторону цифровизации деятельности Производственного блока ПАО «РусГидро», касающейся совершенствования систем мониторинга ГТС, оценки состояния ГТС, разработки рекомендаций по воздействиям на ГТС и прогнозированию их состояния.

Применительно к обеспечению безопасности и надёжности ГТС укрупненно можно выделить два основных блока задач по цифровизации деятельности Производственного блока и Аналитического центра.

Первый блок задач связан со сбором, систематизацией, обработкой и анализом данных, получаемых в ходе эксплуатации ГТС и механического оборудования ГТС Группы РусГидро. В частности, в рамках решения задач данного блока требуется:

- создание баз данных по типизации дефектов и повреждений ГТС и МО ГТС;

- создание баз данных по выявленным в ходе эксплуатации дефектам и повреждениям ГТС и МО ГТС Группы РусГидро, динамики их развития;

- создание баз данных по физико-механическим, прочностным, деформационным, фильтрационным и пр. характеристикам системы *сооружение–основание* ГТС и механического оборудования ГТС Группы РусГидро, полученным в период всего жизненного цикла сооружения;

- создание баз данных по установленным на ГТС средствам контроля состояния КИА, системам опроса КИА, их работоспособности и достоверности показаний КИА.

Разработанные базы данных позволят существенно улучшить качество, достаточность и достоверность исходной информации о характеристиках и текущем техническом состоянии ГТС при создании расчетных прогнозных моделей сооружений (цифровых двойников), что также весьма актуально при цифровой трансформации Производственного блока Группы РусГидро для обеспечения безопасности и надёжности ГТС в условиях их длительной эксплуатации.

Первые шаги на пути к цифровизации процесса мониторинга состояния ГТС и механического оборудования ГТС Группы РусГидро уже сделаны при создании Центра мониторинга ПАО «РусГидро». Центр мониторинга является инструментом цифровизации деятельности Аналитического центра, обеспечивающим информативный обмен между Филиалами и подконтрольными организациями, Аналитическим центром НИИ и ПАО «РусГидро» о текущем техническом состоянии ГТС посредством унифицированной информационно-диагностической системы (ИДС) объектового уровня и цифровизацию процесса управления надёжностью и безопасностью ГТС в Аналитическом центре с использованием информационно-аналитической системы (ИАС) верхнего уровня.

Внедрение на производственные объекты Группы РусГидро унифицированной ИДС, помимо оперативной диагностики состояния ГТС, позволит создавать и вести базы данных по имеющимся дефектам и повре-

ждениям ГТС и механического оборудования ГТС, динамике их развития, истории воздействий на ГТС, по применяемым при этом технологиям и материалам и пр.

ИАС будет представлять информационную платформу, аккумулирующую сведения о техническом состоянии ГТС и механическом оборудовании ГТС производственных объектов Группы РусГидро, о показателях функционирования систем мониторинга ГТС, о ходе процесса декларирования безопасности комплексов ГТС Группы. В ИАС будет дана интегральная оценка уровню безопасности комплексов ГТС Группы, даны отранжированные по приоритету рекомендации по компенсирующим воздействиям на ГТС и механическое оборудование ГТС с последующей передачей в «модуль сводного планирования» информационной системы управления фондами и активами (ИС УФАП) ПАО «РусГидро» для их включения в производственные программы. Для прогнозирования изменения технического состояния комплексов ГТС Группы предусмотрено внедрение моделей по управлению уровнем безопасности ГТС.

С использованием ИАС также планируется организовать информационный обмен о техническом состоянии ГТС Группы РусГидро с Ситуационно-аналитическим центром ПАО «РусГидро» и Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзором).

В рамках создания Центра Компетенции по КИА во ВНИИГ, в задачи которого входит обеспечение полного импортозамещения элементов систем мониторинга ГТС Группы РусГидро, ведется разработка цифровой базы данных отечественной КИА для выбора технических решений по замене, дооснащению, реконструкции систем мониторинга объектов Группы. Также планируется создание базы данных по современным, унифицированным техническим решениям по организации систем мониторинга состояния комплексов ГТС Группы РусГидро, в том числе автоматизированных и полуавтоматизированных систем опроса КИА.

Второй блок задач по цифровизации деятельности Производственного блока и Аналитического центра связан с созданием баз данных и программных продуктов по выбору технических воздействий на ГТС, обеспечивающих техническую и экономическую обоснованность принимаемых технических решений по ремонту/реконструкции ГТС, в том числе с оценкой оптимального срока проведения работ.

Информационной поддержкой процедуры подбора вариантов организационных и технических воздействий на ГТС, направленных на повышение безопасности и надежности сооружений, принятию оптимальных управленческих решений с обоснованием приоритетов планируемых воздействий на ГТС и МО является обмен систематизированными информационными потоками о текущем и прогнозируемом техническом состоянии и уровне безопасности ГТС и МО на объектах ПАО «РусГидро» с использованием информационных систем.

В дополнение стоит отметить перспективность направления использования искусственного интеллекта при обработке баз данных о состоянии ГТС, в том числе с разработкой прогнозных моделей состояния сооружения.

Обобщая вышесказанное, можно сделать заключение, что цифровая трансформация деятельности Производственного блока и Аналитического

центра ПАО «РусГидро» в области обеспечения безопасности и надежности ГТС позволит:

существенно оптимизировать работу подразделений Группы РусГидро, участвующих в бизнес-процессах по обеспечению безопасности и надежности ГТС;

упростить процедуры принятия решений по планированию и управлению жизненным циклом ГТС путем использования информационно-аналитических систем и программных продуктов;

повысит эффективность диагностики и прогнозирования технического состояния ГТС и возможных отклонений в работе сооружений посредством создания современных цифровых инструментов мониторинга, удаленной диагностики и прогноза состояния ГТС.

Помимо обеспечения безопасности и надежности ГТС, цифровая трансформация деятельности Производственного блока и Аналитического центра ПАО «РусГидро» позволит снизить эксплуатационные затраты на содержание комплексов ГТС Группы РусГидро, что, в конечном счете, положительно скажется на капитализации Компании.

Заключение

1. Цифровая трансформация является одним из приоритетных направлений для устойчивого развития и функционирования топливно-энергетической отрасли Российской Федерации. Группа РусГидро стремится быть отраслевым лидером в вопросах цифровизации своих бизнес-процессов.

2. Цифровая трансформация деятельности Производственного блока ПАО «РусГидро» в области безопасности и надёжности ГТС, включая разработку баз данных и программных продуктов для ЭВМ по вопросам мониторинга технического состояния ГТС и механического оборудования ГТС, по выбору обоснованных технических решений по ремонтно-восстановительным работам и строительных материалов, в том числе инновационных, является особо актуальным вопросом и требует разработки с последующей реализацией программы дальнейшего цифрового перехода Группы РусГидро в области безопасности и надёжности ГТС.

3. Ключевую роль в инициации и успешном осуществлении цифровой трансформации деятельности Производственного блока ПАО «РусГидро» в области обеспечения безопасности и надёжности ГТС играет Аналитический центр ПАО «РусГидро», обладающий уникальным сочетанием компетенций по вопросам эксплуатации ГТС и одновременно являющийся местом консолидации информационных потоков о состоянии ГТС Группы РусГидро.

4. Аналитический центр ПАО «РусГидро» может также успешно выполнять функции по созданию и поддержанию информационного «банка», изучая и адаптируя лучшие российские и мировые практики в области безопасности и надёжности ГТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2021 г. № 3924-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса».
URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300029>.

2. **Указ** Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102416645>.
3. **Указ** Президента Российской Федерации от 10 октября 2021 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201910110003>.
4. **Указ** Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007210012>.
5. **Указ** Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=-1&lastDoc=1&nd=102468157>.
6. **Перечень** поручений Президента Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № Пр-2242 по итогам конференции по искусственному интеллекту. URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/64859>.
7. **Поручение** Правительства Российской Федерации от 4 февраля 2021 г. № ДЧ-П10-1369 по вопросу разработки стратегии цифровой трансформации отрасли в целях достижения «цифровой зрелости», предусматривающей внедрение конкурентоспособного отечественного программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов, созданных в том числе на основе технологий искусственного интеллекта. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=-102416645&backlink=1&nd=602722353&rdk=>.
8. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003>.
9. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201404240009>.
10. **Национальная** программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная протоколом заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 4 июня 2019 г. № 7. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858>.
11. **Техническая** политика Группы РусГидро. 2024. URL: https://rushydro.ru/activity/safety/tech_policy/
12. **Охапкин Г.В.** Подходы к цифровой трансформации выбора технических решений по восстановлению объемной структуры бетона гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2023. № 4. С. 13-18.
13. **Филиппова Е.А., Курнева Е.В.** Цифровизация основных направлений деятельности Аналитического центра – основные результаты и планы развития. Доклад на тринадцатой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». 2020. URL: <https://clck.ru/398gLd>.
14. **Филиппова Е.А.** Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений как одно из основных направлений деятельности ВНИИГ // Гидротехническое строительство. 2021. № 8. С. 47-51.

REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2021 No. 3924-r “On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the fuel and energy complex”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300029>. (In Russ.).

2. Decree of the President of the Russian Federation of December 1, 2016 No. 642 “On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation”. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102416645>. (In Russ.).
3. Decree of the President of the Russian Federation of October 10, 2021 No. 490 “On the development of artificial intelligence in the Russian Federation”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201910110003>. (In Russ.).
4. Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474 “On national development goals of the Russian Federation for the period until 2030”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007210012>. (In Russ.).
5. Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018 No. 204 “On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period until 2024”. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102468157>. (In Russ.).
6. List of instructions of the President of the Russian Federation dated December 31, 2020 No. Pr-2242 following the results of the conference on artificial intelligence. URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/64859>. (In Russ.).
7. Instruction of the Government of the Russian Federation dated February 4, 2021 No. DCh-P10-1369 on the development of a strategy for digital transformation of the industry in order to achieve “digital maturity”, providing for the introduction of competitive domestic software and hardware and software systems created in that including based on artificial intelligence technologies. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102416645&backlink=1&nd=602722353&rdk=>. (In Russ.).
8. Order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 No. 1523-r “On the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003>. (In Russ.).
9. Decree of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 No. 321 “On approval of the state program of the Russian Federation “Energy Development”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201404240009>. (In Russ.).
10. National program “Digital Economy of the Russian Federation”, approved by the minutes of the meeting of the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects dated June 4, 2019 No. 7. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858>. (In Russ.).
11. Technical policy of the RusHydro Group. 2024. (In Russ.). URL: https://rushydro.ru/activity/safety/tech_policy/
12. Okhapkin G.V. Approaches to the digital transformation of the choice of technical solutions for restoring the volumetric structure of concrete of hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2023;(4):13-18. (In Russ.).
13. Filippova E.A., Kurneva E.V. Digitalization of the main activities of the Analytical Center – main results and development plans. Report at the thirteenth scientific and technical conference «Hydropower. Hydraulic engineering. New developments and technologies», 2020. URL: <https://clck.ru/398gLd> (In Russ.).
14. Filippova E.A. Ensuring the safety of hydraulic structures as one of the main activities of VNIIG. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2021;(8):47-51. (In Russ.).

Информация об авторах

- С.Б. Кондратьев** – заместитель генерального директора – главный инженер;
Е.А. Филиппова – канд. техн. наук, директор Аналитического Центра по безопасности ГТС;
А.Б. Веселов – начальник отдела;
Г.В. Охапкин – канд. техн. наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

S.B. Kondratiev – Deputy General Director – Chief Engineer;

E.A. Filippova – Cand. Sci. (Techn.), Director of the Analytical Center for Hydraulic Structures Safety;

A.B. Veselov – Department head;

G.V. Okhapkin – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 25.11.2023; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 25.11.2023; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 621.175.3

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НИОКР, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЛОКОВ АЭС С БИГ

Ирина Николаевна Анпилогова¹, Григорий Иванович Казаров²

^{1,2} Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов

¹ anpilogova-in@rosenergoatom.ru

² kazarov-gi@rosenergoatom.ru

Аннотация. Изложены основные результаты, полученные при выполнении научно-исследовательских работ, связанных с обеспечением безопасности по эксплуатации башенных испарительных градирен. Приведено краткое описание целей, задач и путей их реализации.

Ключевые слова: башенная испарительная градирня, накипеобразование, проведение испытаний, экспериментальная установка, способы очистки, ингибиторы

Для цитирования: Анпилогова И.Н., Казаров Г.И., Промежуточные итоги выполнения НИОКР, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации блоков АЭС с БИГ // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 14–25.

Original article

INTERMEDIATE RESULTS PERFORMING SCIENTIFIC RESEARCH AIMED AT ENSURING THE SAFE OPERATION OF NPP UNITS WITH EVAPORATIVE COOLING TOWERS

Irina Nikolaevna Anpilogova¹, Grigory Ivanovich Kazarov²

^{1,2} Capital Projects Implementation Branch Office of JSC Rosenergoatom

¹ anpilogova-in@rosenergoatom.ru

² kazarov-gi@rosenergoatom.ru

Abstract. The main results obtained during the performance of scientific research related to the safety of operation of tower evaporative cooling towers are presented. A brief description of the goals, objectives and ways to implement them is provided.

Keywords: *Evaporative cooling towers, scale formation, testing experimental assembly, testing, experimental installation, cleaning methods, inhibitors*

For citation: Anpilogova I.N., Kazarov G.I., Intermediate results performing scientific research aimed at ensuring the safe operation of NPP units with evaporative cooling towers. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:14-25. (In Russ.).

Башенная испарительная градирня (БИГ) – испарительное теплообменное сооружение, в котором теплообмен между водой и воздухом осуществляется прямым контактом, а восходящее движение воздуха в башне происходит за счет разности плотностей холодного воздуха вне

градирни и теплого воздуха внутри [1]. Главной задачей БИГ является охлаждение воды.

Поток наружного воздуха за счет создания естественной тяги через входные отверстия в нижней части башни поднимается вверх, проходит через оросительные устройства, каплеуловитель и далее выходит в атмосферу. Противотоком между оросителем и каплеуловителем через распылительное устройство подается циркуляционная вода. Тепло снимается путём испарения воды на поверхности оросителя. Для компенсации потерь от испарения происходит подпитка от внешних водных источников – водохранилища, реки, озера.

Основной проблемой, присущей системам с БИГ, является накипеобразование, вызванное осаждением неорганических соединений, например, карбоната кальция CaCO_3 , на теплообменных поверхностях. Накипь оказывает негативное влияние на теплопередачу и уменьшает скорость потока охлаждающей воды, осажаясь на оросителях. Увеличение расхода воды приводит к дополнительным затратам.

Обеспечение безнакипного режима работы БИГ принесёт значимый экономический эффект и обеспечит требуемый уровень выработки электроэнергии и устойчивой работы энергоблоков в режиме договоров поставки мощности.

Восстановление эффективности охлаждения возможно либо за счет поддержания корректного водно-химического режима (ВХР) БИГ АЭС, с дозированием различных реагентов, либо за счет своевременной очистки блоков оросителей.

В настоящий момент в рамках инвестиционной программы НИОКР АО «Концерн Росэнергоатом» по безопасной эксплуатации АЭС с БИГ выполняются две работы по темам:

Проведение испытаний эффективности ВХР башенных испарительных градирен АЭС с дозированием различных ингибиторов солеотложения и коррозии. Выдача рекомендаций по выбору оптимальных ВХР БИГ для действующих и проектируемых АЭС, выполняемая АО «ВНИИАЭС», срок окончания – 2024 г;

Разработка методических рекомендаций по выбору технологии химической/механической очистки внутрикорпусных устройств и оросителей БИГ, выполняемая АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», срок окончания 2023 г.

Проведение испытаний эффективности водно-химического режима БИГ АЭС с дозированием различных ингибиторов солеотложения и коррозии

Испытания эффективности реагентов проводятся для условий эксплуатации систем циркуляционного водоснабжения с БИГ энергоблоков № 1, № 2 Курской АЭС-2 и № 3, № 4 Ростовской АЭС на реальной воде из источников водоснабжения, используемых в качестве добавочной воды БИГ на экспериментальной установке моделирования тепловых, физических и химических процессов в системе внешнего контура охлаждения атомных станций для условий эксплуатации БИГ.

Установка моделирования процессов (УМП) состоит из двух контуров охлаждения, модели градирни, котла первого контура, теплообменников, блока дозирования и контроля. В первом (закрытом) контуре с помощью котла поддерживается постоянная температура воздуха (может задаваться от 60 до 95 °С) (рис. 1). Максимальная мощность котла – 70 кВт. Вода второго (открытого) контура нагревается в блоке теплообменников и охлаждается на градирне.

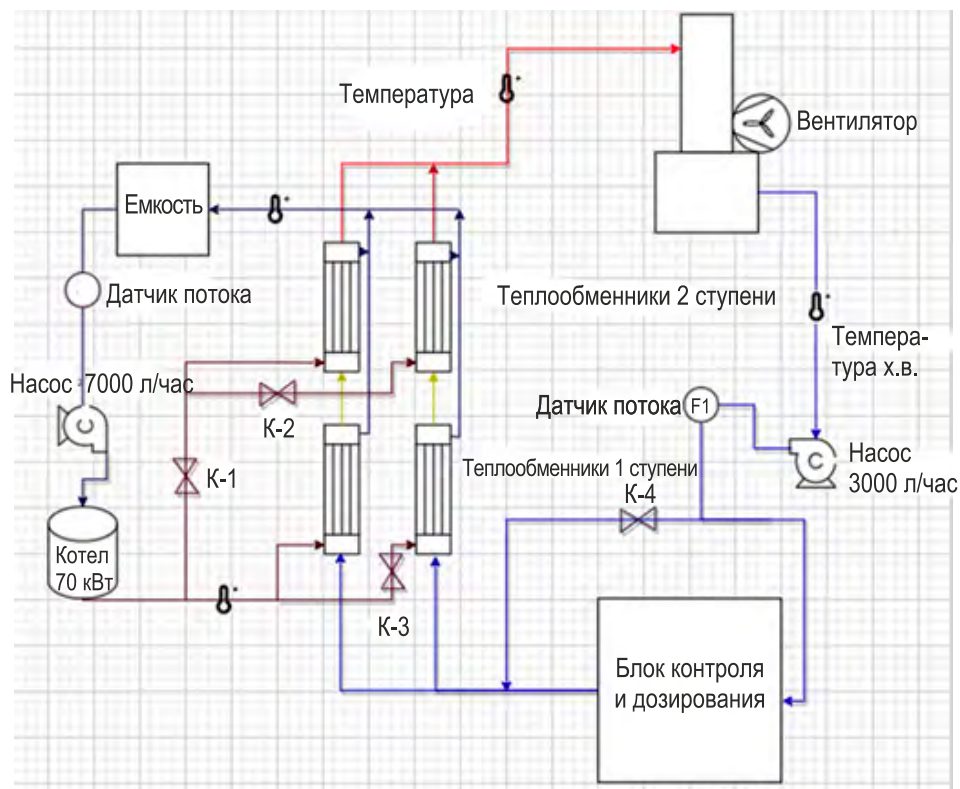


Рис.1. Схема установки моделирования тепловых физических и химических процессов

Тепло отводится от воды первого контура через блок теплообменников водой открытого контура.

Вода второго (открытого) контура нагревается в блоке теплообменников и охлаждается на градирне. При охлаждении происходит испарение (и концентрирование) воды, что позволяет моделировать упаривание воды в башенных испарительных градирнях.

Блок дозирования и контроля (БДК) управляет расходом продувки для поддержания заданного коэффициента упаривания.

Коэффициент упаривания рассчитывается по отношению хлоридов оборотной воды к хлоридам добавочной.

БДК переключает поток воды первого контура между теплообменниками для поддержания заданной температуры нагретой воды открытого контура, а также считывает показания датчиков расхода температуры, давления, рН, ОВП, электропроводности, концентрации метки. Все показания датчиков фиксируются в памяти контроллера, могут быть выведены

на экран УМП в виде графиков, сохранены в отчёте по окончании испытаний.

Таким образом, установка позволяет задать определенный коэффициент упаривания, температуру нагретой воды и дозировку реагента.

УМП обеспечивает поддержание технических условий в соответствии с условиями в охлаждающей системе:

температура нагретой воды от – 30 до 55 °С;

коэффициент упаривания – от 1,1 до 3,0;

соотношение расходов воды и воздуха на охлаждение в модельной градирне – 0,5:2,0;

возможность подачи трех типов реагентов.

Периметр оросителя в модели градирни составляет 450x450 мм. Высота слоя оросителя составляет 1350 мм.

В настоящий момент АО «ВНИИАЭС» разработаны и утверждены программа [2] и методика [3] испытаний ВХР БИГ.

Методика испытаний ВХР БИГ содержит:

требования к испытываемым ингибиторам коррозии и солеотложений;

объём и периодичность химического контроля при проведении испытаний на УМП;

объём технологического контроля;

описание испытываемых режимов работы (качество охлаждающей воды, рабочие концентрации ингибиторов в оборотной воде экспериментальной установки и др.);

критерии оценки эффективности ВХР БИГ по результатам испытаний;

условия применения ингибиторов солеотложения и коррозии для выполнения требуемых критериев эффективности.

Программа испытаний содержит:

перечень действующих веществ каждого реагента, их концентрацию, методику измерений активного компонента (от производителей);

последовательность операций по подготовке, проведению и завершению испытаний.

Требования к подобранным для испытаний реагентам [4]:

реагенты должны иметь референтность применения на АЭС и/или тепловых электростанциях с БИГ;

должен быть раскрыт состав реагентов (наименования и химические формулы входящих в состав веществ);

на смесовое вещество устанавливаются нормативы ПДК_{р.х}, ПДК_{атм.в} (или ОБУВ_{атм.в}), ПДК_{р.з} (или ОБУВ_{р.з}), при которых не превышаются нормативы ПДК ни на один из его компонентов;

наличие паспорта безопасности;

наличие аттестованных методик контроля реагентов;

активные компоненты реагентов должны иметь утверждённые ПДК или ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ);

по степени воздействия на организм человека должны относиться к классу 3 или 4 по ГОСТ 12.1.007 [5] (вещества умеренно опасные или малоопасные);

наличие ГОСТ, ТУ или иной нормативной документации на каждый реагент;

наличие на каждый реагент паспорта безопасности, оформленного в соответствии с ГОСТ 30333 [6] и зарегистрированного в установленном порядке;

наличие на каждый реагент свидетельства о государственной регистрации в Таможенном союзе Евразийского экономического союза;

наличие аттестованных методик контроля реагентов (или их активных веществ) в производственных и сточных водах АЭС;

наличие аттестованных методик входного контроля реагентов (или их активных веществ) по содержанию активных веществ (при отсутствии аттестованных методик входного контроля допускается приёмка реагентов по сертификатам качества).

От восьми организаций-производителей реагентов были получены программы испытаний. Выполнен анализ представленных программ на соответствие требованиям, предъявляемым к реагентам. Перечень выбранных реагентов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Список программ испытаний ингибиторов отложений первого этапа испытаний с использованием охлаждающей воды Курской АЭС-2

Организация-производитель реагента	Наименования реагентов
ООО "Экоэнерго"	Опцион 713-1 Опцион 731-1
ООО "НПО "Экотехнологии"	Экотеч ING 1020 Экотеч ING 1030
ООО "ХГ "Основа"	Scimol WS-2917 Descum-2 D-3910-A
ООО "Компания Налко"	Налко 1393Т Налко 3DT120
ООО "ВТЛ"	Акварезалт 1010-1
ООО "Инэко"	ИНЭДИТ 101
ООО "Полимер Системс"	Гидрайзер 1213 Гидрайзер 2207
ООО "ТД Полифлок"	Дифостат ДФ-3.2
	Дифостат ДФ-4.1

Для каждой испытываемой программы коррекционной обработки перед проведением испытаний её эффективности на УМП проводятся лабораторные испытания эффективности на предотвращение солеотложения.

Длительность проведения испытаний и коррекционной обработки каждой программы – 240 часов.

Первое испытание – холостое (без добавления реагентов). Второе (референтное) следует выполнять по текущей программе обработки на Ростовской АЭС (ОПТИОН 713-1, ОПТИОН 770-47) и для Курской АЭС-2 (ОПТИОН 713-1, ОПТИОН 731-1) (проектная).

Результаты холостого испытания используются для прогнозирования накипеобразующей и коррозионной способностей охлаждающей воды АЭС в отсутствие коррекционной обработки.

Проведение испытаний на установке моделирования процессов проходят в следующей последовательности:

1. Первый контур заполняется химически обессоленной водой (ХОВ).

2. Осуществляется доведение величины рН воды первого контура до диапазона от 8 до 10 дозированием раствора гидроксида натрия.

3. Осуществляется подготовка рабочих растворов ингибиторов солеотложения и/или коррозии.

4. Заполнение второго контура УМП производится реальной водой из источников водоснабжения, используемых в качестве добавочной воды БИГ.

5. После выхода УМП на режим производят установку коррозионных купонов.

6. Осуществление химического контроля (рН, жесткость кальциевая, удельная электропроводность, жесткость общая, жесткость карбонатная и др.) и расчет транспорта кальция и коэффициента упаривания.

7. По завершении испытаний выполняют извлечение коррозионных купонов из УМП.

По результатам каждого цикла испытаний определяется диапазон (коридор) величины коэффициента упаривания, результаты измерения транспорта кальция и скорости коррозии.

Водно-химический режим с дозированием конкретных ингибиторов солеотложения и коррозии с конкретными дозировками и конкретными величинами концентраций в оборотной воде рассматривается в качестве возможного для проведения опытно-промышленного опробования в оборотной системе охлаждения АЭС с БИГ:

если по результатам предварительных лабораторных испытаний эффективность ВХР в части предотвращения солеотложения составляет не менее 95 %;

если средняя величина транспорта кальция по результатам химического контроля воды второго контура и добавочной воды УМП составляет не менее 95 % и за время проведения испытаний не снижалась ниже 90 %;

если степень защиты от коррозии для материалов оборудования составляет не менее 80 %.

Итогом данной работы станет перечень допустимых к применению ингибиторов солеотложений и коррозии в системах охлаждения энергоблоков АЭС с БИГ и порядок их применения. По итогам испытаний будут выбраны наиболее эффективные ингибиторы для Курской АЭС-2 и Ростовской АЭС, дозирование которых позволит снизить образование карбонатных отложений.

Разработка методических рекомендаций по выбору технологии химической/механической очистки внутрикорпусных устройств и оросителей БИГ

Был проведен анализ способов механической и химической очистки разными средствами и для последующего исследования выбраны:

для механической очистки – пневмоимпульсная пушка ООО «НПП «ИСТА» с использованием воды;

для химического способа – очистка с помощью неорганического кислотного средства компании ООО «Новохим».

На втором этапе для проведения стендовых и лабораторных испытаний и разработки технологии очистки были доставлены 24 блока оросительных устройств с градирен Нововоронежской АЭС-2 (решетчатого типа VC 25) и Ростовской АЭС пленочного типа (23,5) на площадку ООО «Новохим», г. Томск.

Степень загрязнения карбонатными отложениями блоков оросительных устройств с БИГ Нововоронежской АЭС-2 составила от 5 до 90 %. Блоки оросителей находились в эксплуатации три года.

Степень загрязнения карбонатными отложениями поверхности оросительных устройств с БИГ Ростовской АЭС составляла от 40 до 90 %. Блоки оросителей находились в эксплуатации четыре года.

В процессе эксплуатации БИГ загрязнения карбонатными отложениями по всей площади орошения градирен накапливаются неравномерно. Большая часть отложений находится в нижних слоях оросителя, а в центральной зоне их гораздо меньше.

Специалисты ООО «Новохим» провели сравнительные оценки количественного анализа отложений. Количество отложений на блоках оросителя Нововоронежской АЭС размерами 900×600×450 мм составило 15,6 кг, средняя загрязненность блоков 64,2 кг/м³. Примерное количество отложений на оросителях БИГ АЭС – 790 т.

Количество отложений на блоке оросителя Ростовской АЭС размером 2450×400×500 мм составляет 36,75 кг, средняя загрязненность 150 кг/м³. Примерное количество отложений на оросителях БИГ – 2780 т.

Были проведены исследования физико-химического состава отложений. Загрязнения оросителей Нововоронежской АЭС-2 на 97,4 % состоят из карбонатных отложений, Ростовской АЭС – на 70,7 % из карбонатных отложений, но также имеются кремний и оксиды железа, присутствие которых определяется качественными характеристиками циркуляционной и подпиточной воды.

Главной задачей при выборе реагента является не только физическое удаление, но и минимальное воздействие реагента на опорные конструкции и бетонное основание БИГ, скорость растворения отложений, проникающая способность, класс опасности, безопасность для персонала, количество и класс опасности образующихся отходов, возможность работы при пониженных температурах, доступность на рынке РФ, наличие необходимой разрешительной документации и т.д.

Для подбора наиболее подходящего средства для растворения отложений было проанализировано более 20 реагентов.

Для проведения химической очистки был выбран кислотный моющий реагент производства ООО «Новохим». В лабораторных условиях он растворяет отложения на 90,7 %. Оставшиеся отложения представляют собой мелкодисперсный порошок, который легко удаляется из системы при динамическом режиме очистки.

Были проведены исследования по определению возможного негативного влияния средства кислотного моющего средства компании ООО «Новохим» на целостность и механическую прочность материалов внутрикорпусных устройств БИГ. По результатам экспериментов, поли-

мерные материалы, из которых изготовлены оросители и каплеуловители БИГ, не вступают в реакцию с кислотным средством и не оказывают негативного воздействия на целостность и механическую прочность материала.

На втором этапе были разработаны технологии химической и механической очистки.

Принцип действия пневмоимпульсной установки основан на воздействии импульсной газовой струи на оросительные устройства, сила воздействия которой пропорциональна начальному давлению в ресивере в момент полного открытия быстродействующего клапана.

Технология гидрохимической очистки предусматривает циркуляцию моющего раствора по замкнутой схеме.

Моющий раствор подается на оросительное устройство и взаимодействует с карбонатными отложениями, растворяя их. Растворенные отложения циркулируют по замкнутому кругу, а нерастворимые накапливаются на дне водосборной емкости. По мере протекания реакции отложения переходят в водорастворимые соли.

Экспериментальный стенд по отработке технологии химической очистки

Для проведения опытных испытаний был разработан экспериментальный стенд размером 3100×3000×4000 мм (рис. 2).

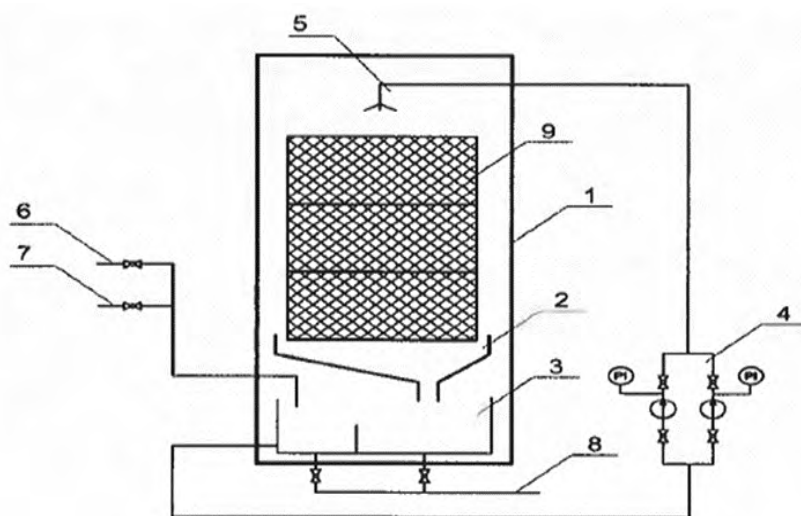


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения химической очистки

Стенд состоит из следующих частей: вертикальной камеры 1; приемника стекающей с оросителя жидкости 2; поддона 3, обеспечивающего обратное водоснабжение; узла насосного оборудования 4; системы трубопроводов и разбрызгивающих устройств для подачи рабочего средства на загрязненные блоки оросителя 5; трубопровода подачи чистой воды 6; трубопровода подачи концентрата кислотного моющего средства 7; дренажного трубопровода 8; блоков оросительных устройств 9.

В стенде была предусмотрена возможность подогрева рабочего раствора до температуры 50–60 °С.

Гидрохимическая очистка

Технология гидрохимической очистки предусматривает циркуляцию моющего раствора по замкнутой схеме.

Моющий раствор подается на оросительное устройство и взаимодействует с карбонатными отложениями, растворяя их. По мере срабатывания моющего раствора в емкость добавляется необходимое количество кислотного средства для поддержания моющей способности раствора.

Растворенные отложения циркулируют по замкнутому кругу, а нерастворимые накапливаются на дне водосборной емкости.

По мере протекания реакции отложения переходят в водорастворимые соли.

Преимущества данной технологии очистки оросителей:

возможность эффективной очистки оросителей БИГ в сжатые сроки проведения планово-профилактического ремонта (ППР);

отсутствие работ, связанных с монтажом-демонтажом блоков оросителей;

технология промывки исключает повреждение оросителей;

высокая эффективность промывки. Обеспечение практически полного удаления отложений со всех слоев оросителя. При необходимости возможно произвести химическую очистку совместно с каплеуловителями;

экономическая выгода за счет исключения полной замены оросителей БИГ.

Механическая очистка

Принцип действия пневмоимпульсной установки основан на воздействии импульсной водовоздушной струи на оросительные устройства, сила воздействия которой пропорциональна начальному давлению в ресивере в момент полного открытия быстродействующего клапана.

Для экспериментальных работ была выбрана пневмопушка «ИСТА-3» с 95-литровым ресивером и быстродействующим клапаном КБ-80-10-Ф-СБ, имеющим проходное сечение диаметром 80 мм.

Пневматическая схема пневмопушки «ИСТА-3» приведена на рис. 3.

При открытии входного вентиля 1 сжатый воздух через тройник 8 и обратные клапаны 2, 6 поступает к ресиверу 5 и запускающему электромагнитному клапану 3. Примерно через 5 мин ресивер наполняется сжатым воздухом, и устройство готово к работе. После подачи электрического сигнала на электромагнит клапана 3 происходит сброс воздуха из управляющей полости клапана 4, через глушитель 6, установленный на клапане 3. Это вызывает срабатывание быстродействующего пневмоклапана 4 и возникновение пневматического удара в стволе пневмоимпульсного устройства.

В экспериментальных исследованиях подбиралось разное давление в ресивере, удаленность от среза ствола до оросителей, блоки оросителей смачивали водой, для размягчения отложений, были произведены выстрелы водой, однако значительных результатов по очистке достичь не

удалось. Либо происходит разрушение блока, либо отложения остаются на поверхности.

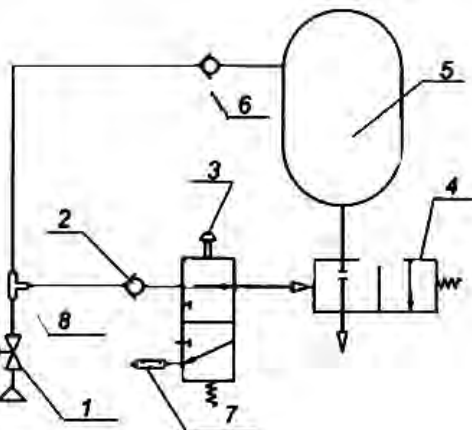


Рис. 3. Пневматическая схема пневмопушки «ИСТА-3»:
 1 – запорный вентиль; 2 – обратный клапан пневмораспределителя; 3 – пневмораспределитель;
 4 – быстродействующий пневмоклапан КБ-80; 5 – ресивер; 6 – обратный клапан ресивера;
 7 – глушитель пневмораспределителя; 8 – тройник

По результатам проведения химической и механической очистки в основном образуются производственные отходы 4 и 5 класса опасности, которые можно утилизировать на специализированных полигонах промышленных отходов.

Полученные объёмы отходов приведены в табл 2.

Таблица 2

Объём отходов, полученный при проведении химической и механической очистки

АЭС	Площадь орошения, м ²	Объём образующихся отходов, т	
		при механической очистке	при химической очистке
Ростовская АЭС	10300	378	757
Нововоронежская АЭС	10100	146	292

На третьем этапе работ был разработан комплексный способ очистки (химическая+механическая).

Первоначально была произведена гидрохимическая очистка блоков оросителей кислотным средством, а далее пневмоимпульсная очистка.

Выполнялась комбинированная очистка мокрого оросителя – последовательная механическая и гидрохимическая очистки, и наоборот.

Эффективность очистки по итогам экспериментальных работ представлена в табл. 3.

В период проведения ППР-2023 на выделенных участках в зоне В 1.2 на границе внутренней периферийной и центральной зоны БИГ-1 блока 6 Нововоронежской АЭС (состоящие из 3 слоев оросителей площадью 25 м² каждый) было проведено опытное опробование технологии гидрохимической очистки кислотным средством компании ООО «Новохим».

Таблица 3

Эффективность очистки

Степень очистки, %	Нововоронежская АЭС	Ростовская АЭС
Механическая→химическая	37,8	7,5
Химическая → механическая	54	59

Результаты взвешивания демонтированных оросителей со слоев № 1 и 2 достигли значений для замены (загрязненность 200 кг/м³), ороситель слоя № 3 достиг критерия очистки (загрязненность 30 кг/м³). После проведения гидрохимической очистки загрязненный ороситель, достигший критерия очистки (30 кг/м³), в среднем отмыт на 93,5 %; загрязненный ороситель, достигший критерия замены (200 кг/м³), отмыт на 75 %, что вывело его в состояние, не требующее замены. Воздействия кислотного средства на опорные бетонные конструкции не выявлено. Средняя эффективность очистки 3-х слоев оросителя составила 84 %.

Заключение

Общим итогом выполнения данной работы стали разработанные методические рекомендации по выбору технологии очистки оросителей с возможностью их применения на действующих и проектируемых АЭС с БИГ, а также разработка технологии по наиболее эффективной химической и механической очистке оросителей БИГ.

Применение разработанных рекомендаций при эксплуатации АЭС с БИГ позволит предотвратить критические образования карбонатных отложений на оросителях БИГ, влияющих на охлаждающую способность БИГ и, соответственно, на выработку электроэнергии в пиковые жаркие летние часы.

Обеспечение безнакипного режима работы БИГ принесёт существенный экономический эффект за счёт:

- снижения недовыработки электроэнергии;
- снижения штрафных санкций за недопоставку мощности в рамках исполнения договоров поставки мощности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ Р ЕН 14705.** Теплообменники. Методы измерения и оценки тепловых характеристик испарительных градирен. М.: Стандартинформ, 2013. 49 с.
2. **Испытания** водно-химических режимов башенных испарительных градирен с дозированием различных ингибиторов солеотложения и коррозии на установке моделирования тепловых, физических и химических процессов в системе внешнего контура охлаждения атомных станций и обработка результатов измерений. Программа. М.: 2023. 39 с.
3. **Испытания** водно-химических режимов башенных испарительных градирен с дозированием различных солеотложений и коррозии на установке моделирования тепловых, физических и химических процессов в системе внешнего контура охлаждения атомных станций и обработка результатов измерений. Методика. М.: 2023. 25 с.

4. **СТО 1.1.1.02.006.1550-2018.** Коррекционная обработка охлаждающей воды башенных испарительных градирен атомных станций. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2019. 11 с.
5. **ГОСТ 12.1.007.** Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007. 7 с.
6. **ГОСТ 30333.** Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования. М.: 2009. 11 с.
7. **НИОКР** по разработке методических рекомендаций по выбору технологии химической/механической очистки внутрикорпусных устройств и оросителей БИГ: Технический отчет (промежуточный) дог. № 9/196716-Д, этап 2 / АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». СПб. 2022. 89 с.

REFERENCES

1. GOST R EN 14705. Heat exchangers. Methods for measuring and evaluating the thermal characteristics of evaporative cooling towers, Moscow; 2013. 49 p. (In Russ.).
2. Testing of water-chemical modes of tower evaporative cooling towers with dosing of various salt deposition and corrosion inhibitors at the installation of modeling thermal, physical and chemical processes in the system of the external cooling circuit of nuclear power plants and processing of measurement results. Program. Moscow; 2023, 39 p. (In Russ.).
3. Tests of water-chemical modes of tower evaporative cooling towers with dosing of various salt deposition and corrosion at the installation of modeling thermal, physical and chemical processes in the system of the external cooling circuit of nuclear power plants and processing of measurement results. Methodology. Moscow, 2023, 25 p. (In Russ.).
4. STO 1.1.1.02.006.1550-2018. Corrective cooling water treatment of tower evaporative cooling towers of nuclear power plants. Moscow. Rosenergoatom Concern JSC, 2019, 11 p. (In Russ.).
5. GOST 12.1.007. Harmful substances. Classification and General Safety Requirements, Moscow: Standartinform; 1977, 7 p. (In Russ.).
6. GOST 30333 Safety data sheet for chemical products. General requirements. Moscow: Standartinform; 2009, 11 p. (In Russ.).
7. R&D on the development of methodological recommendations on the choice of technology for chemical/mechanical cleaning of in-house devices and irrigation systems of BIH: Technical report (interim) dog. No. 9/196716-D, stage 2. Vedeneev VNIIG. St. Petersburg, 2022, 89 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И.Н. Анпилогова – главный эксперт;

Г.Н. Казаров – канд. техн. наук, руководитель проекта турбинного острова.

Information about the authors

I.N. Anpilogova – Chief Expert;

G.I. Kazarov – Ph.D. Tech. Sci., Turbine Island Project Manager.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023; одобрена после рецензирования 11.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 07.11.2023; approved after reviewing 11.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.833:532.5

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДУЛЬНОСТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ ЗАТВОРОВ В СОСТАВЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ГИДРОТЕХНИКИ

Драган Наупарац¹, Драган Пршич²

¹ АО «ППТ Инжиниринг», г. Белград, Сербия
² Машиностроительный факультет, г. Кралево, Сербия
¹ dragan.nauparac@ppt-inzenjering.rs

Аннотация. Рассматривается новая технология проектирования электрогидравлических систем на примере проектирования электрогидравлических систем привода движения затворов в составе гидромеханического оборудования, существующего на гидротехнических объектах. Анализируется, могут ли общие принципы технологии проектирования с использованием функциональных узлов (модулей) улучшить качество работ отдельных элементов электрогидравлических систем привода затворов в составе гидромеханического оборудования. Аргументы *за* и *против* анализируются на основе реального опыта проектирования данного класса электрогидравлических систем и результатов имитирующего моделирования.

Ключевые слова: гидромеханическое оборудование, функциональный модуль, гидравлическая система

Для цитирования: Наупарац Д., Пршич Д. Функциональная модульность при проектировании электрогидравлических систем привода движения затворов в составе гидромеханического оборудования на объектах гидротехники // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 26–36.

Original article

FUNCTIONAL MODULARITY IN THE DESIGN OF ELECTRO-HYDRAULIC GATE MOVEMENT DRIVE SYSTEMS AS PART OF HYDROMECHANICAL EQUIPMENT AT HYDRAULIC ENGINEERING FACILITIES

Dragan Nauparac¹, Dragan Prsic²

¹JSC «PPT Engineering», Belgrade, Serbia
² Faculty of Mechanical Engineering, Kraljevo, Serbia
¹ dragan.nauparac@ppt-inzenjering.rs

Abstract. The report examines a new technology for designing electro-hydraulic systems using the example of designing electro-hydraulic systems for driving gate movement as part of hydromechanical equipment existing at hydraulic facilities. It is analyzed whether the general principles of design technology using functional units (modules) can improve individual elements of the quality of operation of electrohydraulic valve drive systems as part of hydromechanical equipment. Arguments for and against are analyzed based on real experience in the design of this class of electrohydraulic systems and the results of simulation modeling.

© Наупарац Д., Пршич Д., 2024

Key words: *hydromechanical equipment, functional module, hydraulic system*

For citation: Nauparac D., Prsic D. Functional modularity in the design of electro-hydraulic gate movement drive systems as part of hydromechanical equipment at hydraulic engineering facilities. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:26-36. (In Russ.).

Введение

Основной задачей проектировщика электрогидравлических систем является выбор концепции и конфигурации электрогидравлической системы при систематизации требований к техническим характеристикам электрогидравлической системы согласно спецификации технического задания на проектирование.

Следующим этапом проектирования является выбор гидравлических комплектующих. При этом надо стремиться, чтобы были выбраны если не все, то почти все стандартные комплектующие и чтобы потребность в специальной конструкции была сведена к минимуму. На данный момент есть желание усовершенствовать этот этап проектирования, и вместо стандартных гидравлических комплектующих выбрать функциональные модули как узлы более высокого уровня по отношению к отдельным гидравлическим комплектующим, где также можно интегрировать несколько функциональных вариантов в один модуль. Можно провести определенную аналогию с вышеизложенным, как при написании программы на языке программирования, где есть отдельные команды-инструкции с программированием в среде разработки компьютера ПЛК, где используются определенные функциональные блоки.

Почему функциональная модульность?

Функциональная модульность при проектировании электрогидравлических систем является одной из перспективных ориентаций развития технологии проектирования. Основная цель – определить конкретное количество функциональных узлов с гибкой структурой, что позволит обеспечить высокостандартизованную конфигурацию электрогидравлической системы для всех концепций проектного решения (рис. 1). На практике это увеличивает возможность унификации и стандартизации системы, снижает затраты на техническое обслуживание и производство и обеспечивает большую степень адаптируемости к требованиям проекта. Это сокращает сроки изготовления и поставки электрогидравлической системы. Функциональные модули выбирают по конфигурации и по номинальным размерам для расхода, причем давление стандартизованное – на одном уровне.

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ОСНОВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Датчики и фильтры гидравлического агрегата

Рекомендуется вариант со стандартной плитой, на которую можно поместить необходимые датчики и фильтры, упрощая тем самым конструкцию верхней плиты бака, оставляя отверстие определенных размеров, куда устанавливается стандартная плита с датчиками и фильтрами (рис. 2).

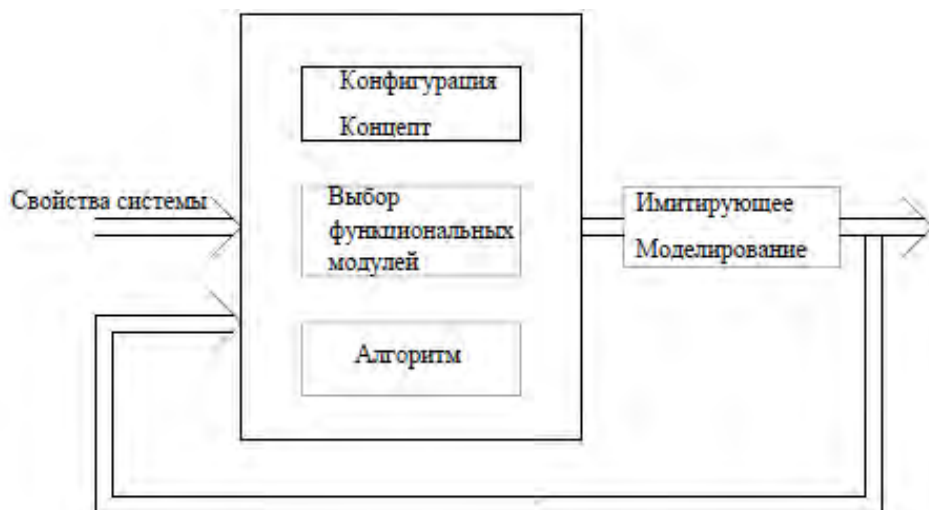


Рис. 1. Структура процесса проектирования

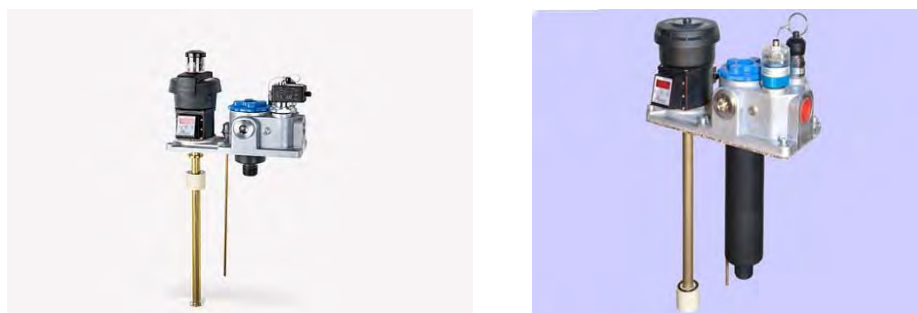


Рис. 2. Плита с датчиками и фильтрами для гидравлического бака

Насосные агрегаты

Насосные агрегаты традиционно дублируются: один рабочий, другой резервный. Иногда время эксплуатации разделено, а иногда один из них находится в 100 % пассивном резерве. На данный момент мы можем свести выбор насосных агрегатов к двум функциональным модулям. Один с аксиально-поршневым насосом с двухпозиционным регулятором расхода, с ручной регулировкой обоих дискретных рабочих объемов или с регулятором давления (рис. 3). Второй функциональный модуль – с насосом постоянного расхода (шестеренный насос с внутренним или внешним зацеплением) и электродвигателем с частотным регулятором. Оба узла достигают следующих рабочих параметров.

Минимальный рабочий расход необходим в начале движения для обеспечения виброустойчивости при ускорении инерционной массы затвора и при коррекции просадки затвора, чтобы насос проработал как можно дольше и чтобы избежать негативных последствий “холодного запуска”. Для этой характеристики преимущество имеет аксиально-поршневой насос, поскольку можно установить минимальный расход в пределах 3–50 % от максимального расхода, а в случае с частотным регулятором для

стабильной работы шестеренного насоса количество оборотов должно быть не менее 500 об/мин (1500 об/мин), что означает, что меньший, то есть минимальный рабочий расход составляет 30% от максимального. Минимальный расход может быть реализован и с помощью клапанной техники в конфигурации электрогидравлической системы, но такой вариант не рассматривается, поскольку он еще больше усложняет конфигурацию системы.

Максимальное рабочее давление – и здесь аксиально-поршневой насос имеет определенное преимущество, поскольку он может иметь вторичное управление (регулирование) максимальным давлением, а в случае насосного агрегата с постоянным насосом мы имеем ситуацию, при которой используется клапан ограничения давления или управляемая разгрузка осуществляется по сигналу реле давления или датчика давления.

Интегрирование насосного блока

Насосный блок должен включать в базовую комплектацию клапан ограничения давления и, как вариант, обратный клапан. На рис. 3 показана общая конфигурация блока. Все возможные варианты показаны в цифрах. Понятно, что функцию разгрузки можно получить с включением магнита или без него, есть возможность добавить датчик давления, манометр или реле давления. Клапан ограничения давления может быть выбран с механической регулировкой, его можно выбрать как пропорциональный клапан со встроенным электронным усилителем или без него.

Блок управления

Здесь функция блока управления будет подробно проанализирована в рамках технологии функциональной модульности, которая относится к перекачке масла из нижней полости цилиндра в верхнюю полость при опускании затвора с одним или двумя цилиндрами, если опускание происходит под влиянием собственного веса. Это один из самых стандартных вариантов управления для затворов с одним или двумя цилиндрами. Практически, это функция предтурбинного затвора на водосбросе плотины или водосбросах, выполненных в виде донного водовыпуска. Эта прямая циркуляция из нижней полости цилиндра в верхнюю используется в тех случаях, когда у нас большие расходы, цилиндры с диаметром поршня от 200 до 1000 мм и когда нам нужно избежать дополнительных сопротивлений за счет циркуляции «через» бак, чтобы обеспечить безопасность опускания затвора под действием собственного веса.

В качестве базового модуля принимаем ручной кран, соединяющий нижнюю и верхнюю полости гидроцилиндра. На рис. 4 также показываем 4 опционных модуля, чтобы получить желаемую конфигурацию блока управления. Могут быть сконфигурированы блоки для затвора с двумя или одним цилиндром (рис. 5, 6). На рис. 6 показаны четыре комбинации функциональных модулей: вверху справа показан случай, когда необходимо управлять затвором, движение которого осуществляется через один цилиндр; вверху слева показана группа функциональных модулей, обеспечивающих синхронное движение, работу двух цилиндров в паре или перемещение-опускание одного затвора с двумя скоростями.

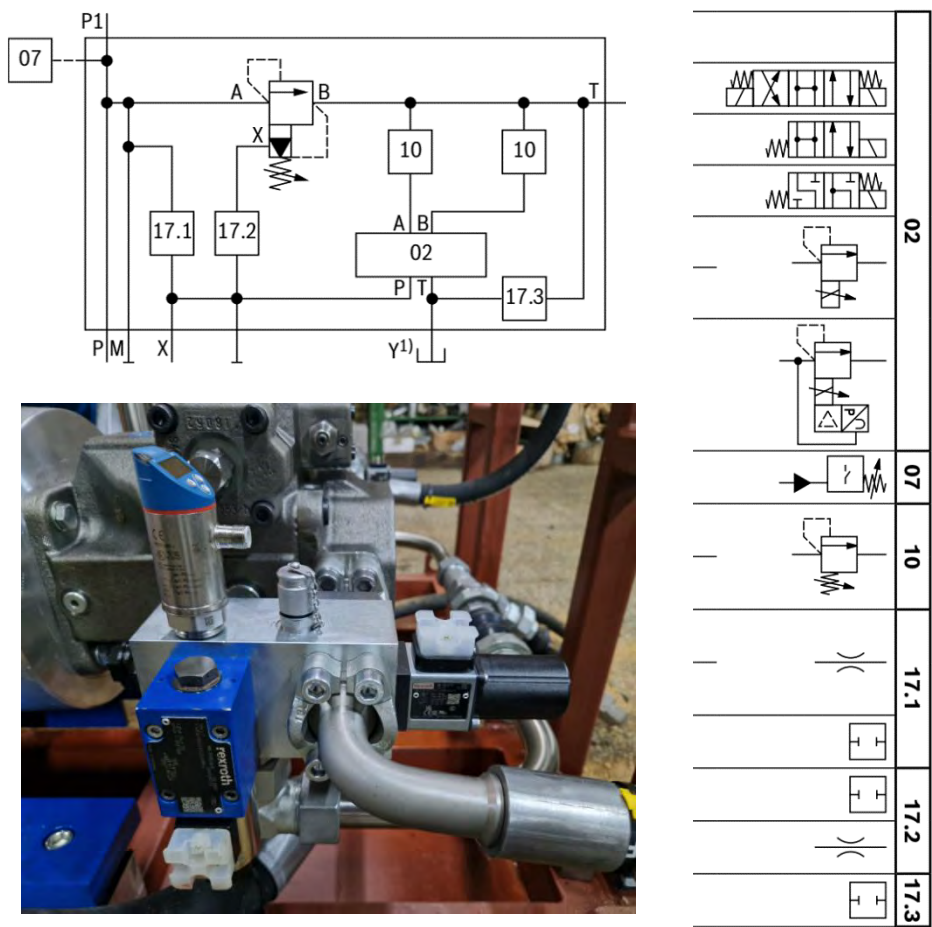


Рис. 3. Варианты насосных агрегатов с насосным блоком [2]

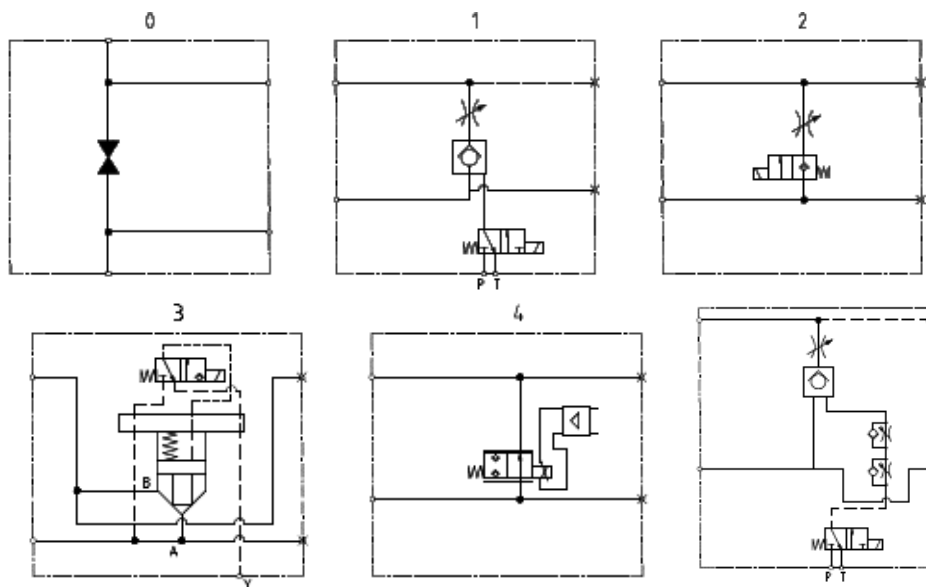


Рис. 4. Базовые модули для опускания затвора под действием собственного веса, прямой «перекачкой» из нижней в верхнюю полость цилиндра [3]

На рис. 6 внизу справа показаны варианты использования пропорционального дросселя: один большего номинального размера для номинальной скорости опускания, а другой для корректировки номинальной скорости в соответствии с требованиями управления синхронным движением; внизу справа показан вариант, аналогичный предыдущему, но мы не можем дистанционно изменить номинальную скорость опускания, а коррекция синхронности движения обеспечивается пропорциональным дросселем.

На рис. 6 показаны 6 вариантов блока управления для функции опускания под действием собственного веса, что характерно для большинства стандартных затворов.

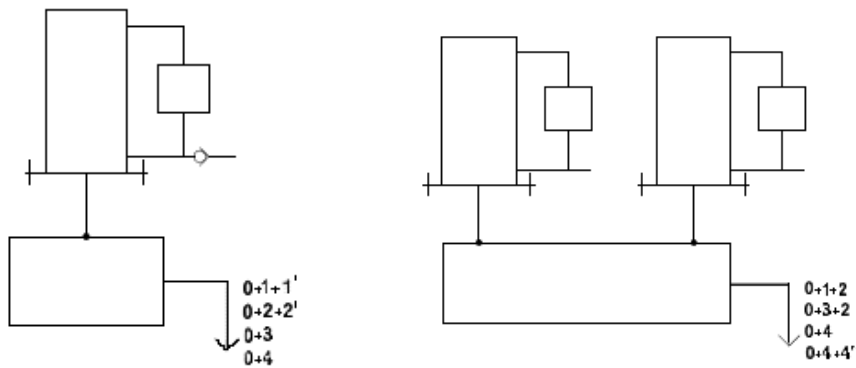


Рис. 5. Базовые сочетания функциональных модулей для затвора с одним и двумя цилиндрами

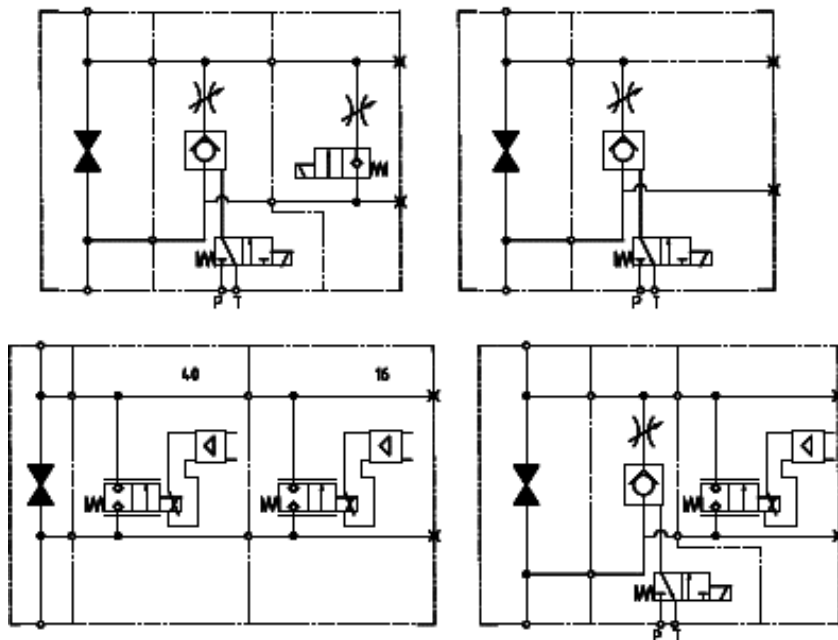


Рис. 6. Базовые конфигурации функциональных модулей для опускания затвора под действием собственного веса

Помимо высокой степени интеграции функциональных модулей в конечный функциональный узел блока управления опусканием (группа функциональных модулей) под воздействием собственного веса необходимо знать их отдельные динамические свойства и в функциональном узле, чтобы предположить динамическое поведение конечного функционального узла перед окончательным имитирующим моделированием для его полной динамической проверки.

Концепция конструктивного решения показана на рис. 7, три модуля, функциональная схема, рис. 6, снизу справа (0+1+4, рис. 4).

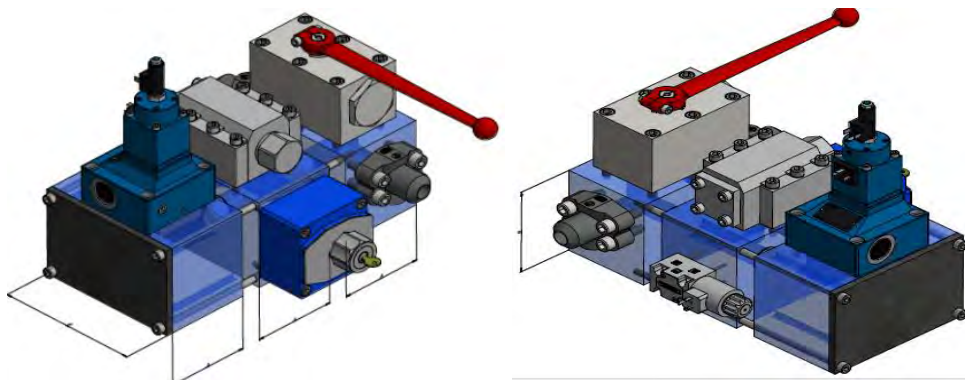


Рис. 7. Вариант конструктивного решения

Плюсы конструктивного решения:

более простое, быстрое и дешевое изготовление гидроблока по сегментам;

возможно более простое тестирование корректности функциональных узлов;

простая интеграция дополнительных функциональных модулей.

Интеграция нескольких функциональных модулей в один гидравлический функциональный блок требует стиля и логики.

На рис. 7 хорошо виден первый модуль с краном; второй – с регулятором расхода, клапаном-замком; третий модуль с пропорциональным регулятором расхода.

Конфигурации имитирующего моделирования позволяют многое увидеть во взаимодействии функциональных узлов, а также, варьируя определенные параметры, можно увидеть влияние и определить посредством нескольких итераций условно-оптимальные характеристики функционального узла управления опусканием затвора под воздействием собственного веса.

Все проверки моделирования важны для определения на каталожном уровне, как для стандартных комплектующих – динамических свойств функциональных модулей в отдельности и в окончательном узле. В ходе моделирования можно варьировать вязкость масла, что в данном случае важно, поскольку цилиндр и блок управления обычно находятся в открытом неотапливаемом пространстве. Таким образом, можно видеть, насколько меняется скорость опускания под действием собственного веса

(особенно это важно для плоских предтурбинных затворов). Кроме того, при различных внешних трениях можно проверить качество стабильности движения при опускании, переходные процессы ускорения и замедления, что особенно важно для группы функциональных модулей, которые также могут обеспечить управление синхронным движением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 8 представлена имитационная модель опускания затвора (один цилиндр) под действием собственного веса. Модель была создана в MatLab, Simscape для вариантов функциональной группы, показанных на рис. 6. [4, 5]. С помощью этой общей модели динамическое поведение, ожидаемое для выбранных конфигураций, можно проверить на этапе проектирования с помощью функциональных модулей. Важно обеспечить, чтобы изменения давления и скорости были такими, чтобы не было механической нагрузки, которая могла бы передаваться на затвор и фундамент, на который опираются цилиндры, и чтобы движение было стабильным.

Общие данные, используемые в имитационной модели, типичные для большинства затворов:

размеры цилиндра $\varnothing 400/180 \times 9000$ мм;

вязкость ISO VG22;

масса затвора 120 000 кг;

гидравлические комплектующие имеют номинальные размеры отверстия расхода 32 мм;

трение 5 и 10 % от массы затвора.



Рис. 8. Общая математическая модель (базовый сегмент) движения затвора – опускание под воздействием собственного веса

Конфигурация, показанная на рис. 7, также является предметом проверки моделирования: регулятор расхода, клапан-замок, управляемый электромагнитным распределителем (двухпозиционный распределитель с седлом), и пропорциональный распределитель.

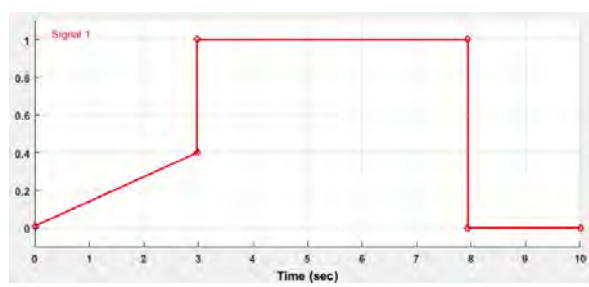
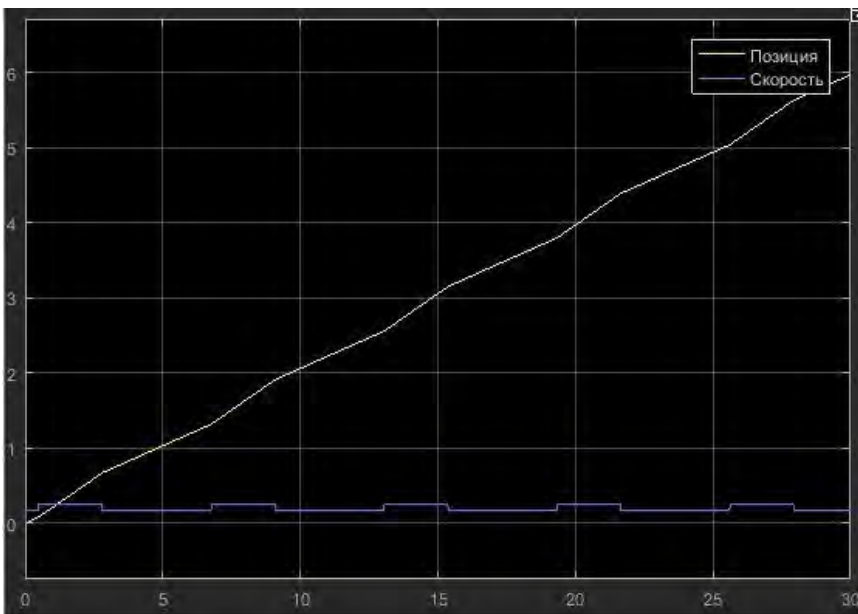
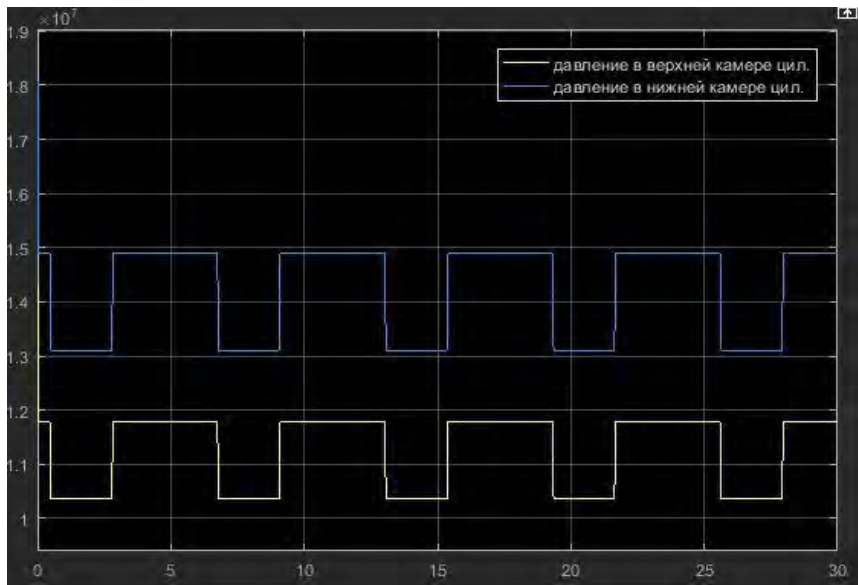


Рис. 9. Основные результаты симуляции – вариант он-офф клапан и регулятор расхода (последовательное соединение) и пропорциональный клапан, и два пропорциональных клапана в паре (2+4 и 4+4, см. рис. 4) (давления, позиция, скорость опускания)

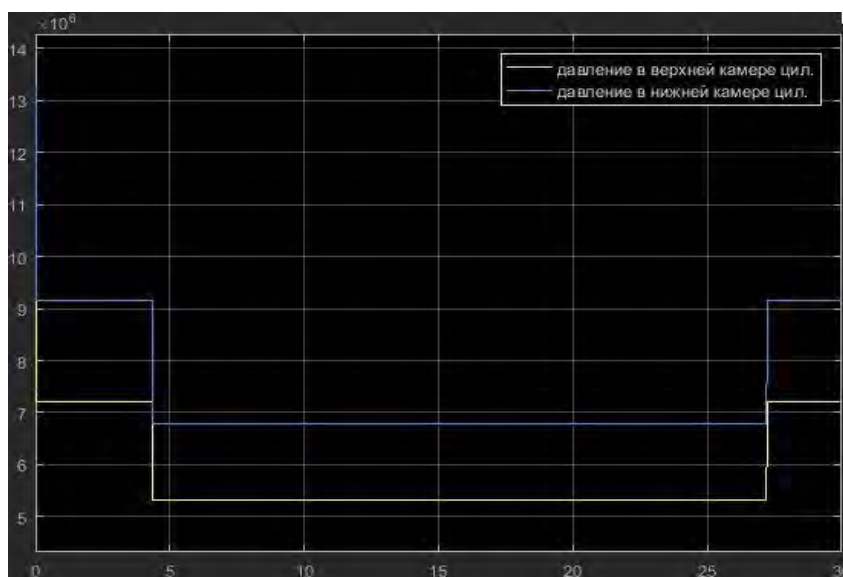
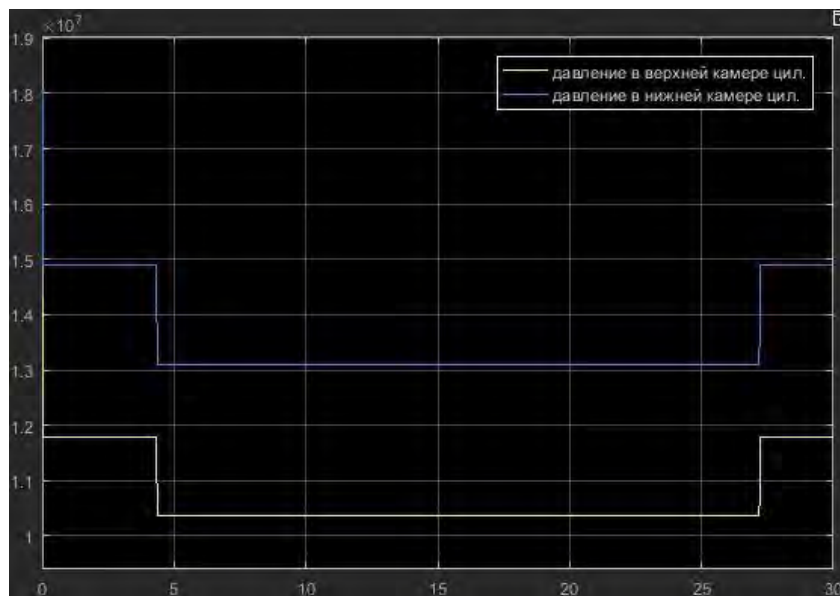


Рис. 10. Отдельный результат моделирования, влияние изменения вязкости масла (ISO VG 22 и ISO VG 46) и рабочих температур для двух вязкостей масла, изменение давления

Заключение

Проектирование на уровне интеграции функциональных модулей – новая перспективная технология проектирования электрогидравлических систем привода затворов и ворот в составе гидромеханического оборудования. Это пока не стало стандартом в практике проектирования рассматриваемых систем, но все предположения и текущие общие тенденции показывают, что это произойдет очень и очень скоро. В данной статье представлено введение в эту технологию проектирования, основанное на

первом практическом опыте и моделировании реального динамического поведения. Моделирование должно облегчить проектирование, поскольку мы имеем более полную информацию о динамическом поведении группы функциональных модулей как более высокого функционального узла, чем уровень отдельной гидравлической комплектующей, где в качестве примера возьмем данные в каталоге для одной вязкости масла, то есть одной температуры масла, причем моделирование позволяет нам задавать эти параметры, которые мы варьируем, что упрощает динамическую проверку поведения всей электрогидравлической системы привода затвора на более поздних стадиях проектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Каталожная** и техническая документация фирмы Buehler.
2. **Каталожная** и техническая документация фирмы Rexroth.
3. **Dragan Nauparac**. Advanced electro-hydraulic systems for driving the movement of radial gates, XI International Conference «Heavy Machinery-НМ 2023», Vrnjačka Banja, Serbia 21– 24 June 2023.
4. **Даршт Я.А.** Гидропривод и средства автоматики. Учебное пособие по курсу ГП и СА. г. Ковров, 2012.
5. **Быстров Н.Д., Гимадиев А.Г.** Моделирование динамических процессов в гидро- и пневмоприводах в ПП Simulink. г. Самара, 2010.

REFERENCES

1. Catalog and technical documentation from Buehler.
2. Rexroth catalog and technical documentation.
3. Dragan Nauparac. Advanced electro-hydraulic systems for driving the movement of radial gates, XI International Conference «Heavy Machinery-НМ 2023», Vrnjačka Banja, Serbia 21– 24 June 2023.
4. Darst Ya.A. Hydraulic drive and automation means. Textbook for the course of GP and SA. Kovrov, 2012.
5. Bystrov N.D., Gimadiev A.G. Modeling of dynamic processes in hydraulic and pneumatic drives in Simulink software. Samara, 2010.

Информация об авторах

- Д. Наупарац** – доктор техн. наук, инженер-механик, главный инженер;
Д. Пршич – доктор техн. наук, инженер-механик, профессор.

Information about the authors

- D. Nauparac** – Dr. Sci. (Techn.), Mechanical Engineer, Chief Engineer;
D. Prsic – Dr. Sci. (Techn.), Mechanical Engineer, Mechanical faculty, professor.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 06.02.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 06.02.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.834

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ ПОДРУСЛОВОГО ВОДОЗАБОРА НА РЕКЕ СУСУЕ

**Алексей Сергеевич Фролов¹, Юрий Дмитриевич Матвеев²,
Татьяна Николаевна Максимова³, Александр Анатольевич
Мартынов⁴**

^{1,2,3,4} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ frolovas@vniig.ru

² matveevyud@vniig.ru

³ maksimovtn@vniig.ru

⁴ martynovaa@vniig.ru

Аннотация. Дается обоснование целесообразности реконструкции водозаборного сооружения на р. Сусуе, оценка современного состояния данного объекта, его влияние на обеспечение технической надёжности и экологической безопасности систем технического водоснабжения электростанции.

Ключевые слова: подрусловой водозабор, береговая насосная станция, водоприемный колодец, инженерно-геологические изыскания

Для цитирования: Фролов А.С., Матвеев Ю.Д., Максимова Т.Н., Мартынов А.А. Выбор оптимального варианта реконструкции подруслового водозабора на реке Сусуе // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 37–42.

Original article

THE OPTIMAL OPTION SELECTION FOR UNDER-RIVER WATER INTAKE RECONSTRUCTION ON THE SUSUYA RIVER

**Alexei S. Frolov, Yuri D. Matveev, Tatiana N. Maksimova,
Alexander A. Martynov**

^{1,2,3,4} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ frolovas@vniig.ru

² matveevyud@vniig.ru

³ maksimovtn@vniig.ru

⁴ martynovaa@vniig.ru

Abstract. The article provides a rationale for the feasibility of reconstructing the water intake structure on the Susuya River. Current state assessment of this facility, its impact on ensuring the technical reliability and environmental safety of the technical water supply power plant systems.

Keywords: under-river water intake, shore pumping station, intake well, engineering-geological surveys

For citation: Frolov A.S., Matveev Y.D., Maksimova T.N., Martynov A.A. The optimal option selection for under-river water intake reconstruction on the Susuya river. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:37-42. (In Russ.).

К системам технического водоснабжения предъявляются особые требования по экономичности и надёжности. Хорошо организованный подвод воды – это надёжная работа гидротехнических сооружений, входящих в систему технического водоснабжения. На протяжении ряда лет ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева занимается разработкой мероприятий по обеспечению технической надёжности и экологической безопасности систем технического водоснабжения электростанций.

В последнее время возросло количество работ, связанных с реконструкцией и строительством подрусовых водозаборов, подающих воду на основное и вспомогательное оборудование на станции [1].

Из-за неудовлетворительного состояния данных сооружений происходит сезонное изменение мутности циркуляционной воды, которая оказывает негативное влияние на работу обессоливающих установок и приводит:

- к увеличению расхода воды на собственные нужды сооружения (вода на взрыхление и отмывку материала);

- к увеличению расхода реагентов (кислоты, щелочи) на регенерацию ионообменного материала;

- к снижению срока эксплуатации ионообменного материала;

- к ухудшению качества обессоленной воды.

Кроме того, в период паводковых явлений воду из рек приходится заменять водой артезианских скважин (Южно-Сахалинская ТЭЦ).

В статье на примере Южно-Сахалинской ТЭЦ приводятся сведения о работе подрусового водозабора на р. Сусуе, выявленных нарушениях проектного режима и рекомендациях по обеспечению нормального работоспособного состояния сооружения.

Рассматриваемый водозабор береговой насосной станции расположен в Сахалинской области, в г. Южно-Сахалинске, посёлке Ново-Александровка, в 6 км севернее ТЭЦ-1. Водозабор эксплуатируется с сентября 1976 г., его проектная мощность составляет 670 м³/ч.

Из водоприёмного колодца вода при помощи трёх насосов подаётся на ТЭЦ-1. Общая протяженность трубопровода составляет 11 км. Речная вода с береговой насосной станции направляется на подпитку градирен, охлаждение механизмов и на обессоленную установку ХЦ.

Водозабор инфильтрационного типа выполнен из стальных перфорированных труб. Дрены располагаются на одной горизонтальной плоскости на расстоянии 5,5 м друг от друга. Водоприёмник включает в себя пять секций, присоединённых к коллектору, который подводит воду в колодец насосной станции. Инфильтрация осуществляется через двухслойную обсыпку: первый слой – песчано-гравелистый грунт, второй слой – щебень.

В настоящее время р. Сусуя в створе водозабора [3] имеет ширину русла по урезу воды 8–15 м при максимальной глубине 0,5–0,8 м. В летние и зимние меженные уровни воды в реке ширина русла составляет не более 5 м при глубине воды 20–30 см.

По правому берегу водозабора в результате речных наносов образовалась коса шириной до 20 м [2], в результате чего до 2/3 рабочей площади

водозабора оказались под этой косой. На остальной площади водозабора образовалась прослойка иловатых суглинков мощностью до 0,4 м над верхним слоем щебня обратного фильтра, с коэффициентом фильтрации от 0,012 до 0,033 м/сут, что является главной причиной низкой производительности водозабора.

Дополнительной проблемой является недостаточная очищающая фильтрационная способность дрен, в результате чего в период паводковых явлений и осадков качество речной воды резко ухудшается.

В 2020 г. случилось очередное мощное извержение Южно-Сахалинского грязевого (точнее, газовой доломитокластитового) вулкана, и огромный язык глины сполз в долину р. Алат – правого притока р. Сусуи [3]. В настоящее время муть постоянно поступает из р. Алат в р. Сусую и загрязняет 63 км русла вниз по течению. В пробах воды увеличилось количество взвешенных веществ, глины и мелкодисперсных частиц.

В 2023 г., начиная с 18 июля по 15 сентября, выпали обильные осадки в виде сильных ливней. Уровень воды в реке поднимался до 4–5 метров, что вызвало резкое увеличение мутности, взвешенных веществ, коллоидных примесей. Все эти факторы привели к засорению маслоохладителей и конденсаторов турбоагрегатов и стали причиной снижения нагрузки по выработке электроэнергии вплоть до остановки оборудования.

Таким образом, за последние 5–6 лет отмечено значительное ухудшение качества воды в р. Сусуе по следующим показателям: цветность; мутность; взвешенные вещества; коллоидные примеси.

На станции пытались самостоятельно справиться с возникшими проблемами. Рассматривались различные варианты их решения, но они оказались экономически и экологически невыгодными.

Например, рассматривался вопрос по установке здания на территории насосной с установкой в нём двух самоотмывающихся фильтров. При более детальной проработке вопроса от этого плана отказались по причине необходимости решать вопрос с хранением и дальнейшей утилизацией образовавшихся в результате работы фильтров отходов, а также сложности строительства системы очистки в зоне нерестовой реки и ограниченности территории насосной.

Также рассматривался вопрос о реконструкции подрусового водозабора и строительстве новой водоподготовительной установки, которая была смонтирована, но не введена в эксплуатацию по ряду причин.

В 2022 г. был заключен договор между «Южно-Сахалинской ТЭЦ-1» ПАО «Сахалинэнерго» и АО «ВНИИГ им Б.Е. Веденеева» на выполнение предпроектного обследования и разработки вариантов реконструкции подрусового водозабора на р. Сусуе.

В июле – сентябре 2023 г. совместно с ООО «СахГеология» были проведены инженерно-геологические изыскания по данному объекту. Их целью являлось комплексное изучение инженерно-геологических условий участка и получение исходных данных для разработки проектной и рабочей документации.

В ходе проведенных работ была получена актуальная информация о рельефе и ситуации на участке производства работ, определено геологическое строение, геоморфологические и гидрогеологические условия объекта, определен состав, состояние и свойства грунтов, выявлено наличие

опасных геологических и инженерно-геологических процессов в пределах исследуемого участка изысканий.

По результатам проведенных исследований было предложено несколько вариантов для улучшения работы данного объекта. Наиболее целесообразным и более благоприятным в экологическом отношении выбран вариант восстановления производительности водозабора путем замены старых стальных дрен на новые полиэтиленовые высокой плотности (ПЭВП) и проведение строительства обратного фильтра.

При реконструкции производится разборка и демонтаж конструкций, пришедших в негодность, а после проведения предварительных мероприятий и расчистки русла реки до проектных размеров – выполнение работ по строительству нового подруслового водозабора. Для сведения к минимуму экологического ущерба все земляные работы в русле реки должны производиться в зимнюю межень (декабрь – март) при условии бесперебойной подачи воды. Режим течения реки при этом остается неизменным, что исключает травмированные молоди рыб.

На рис. 1, 2 представлены схема и проект существующего водозабора, а на рис. 3 – предлагаемый вариант его реконструкции.

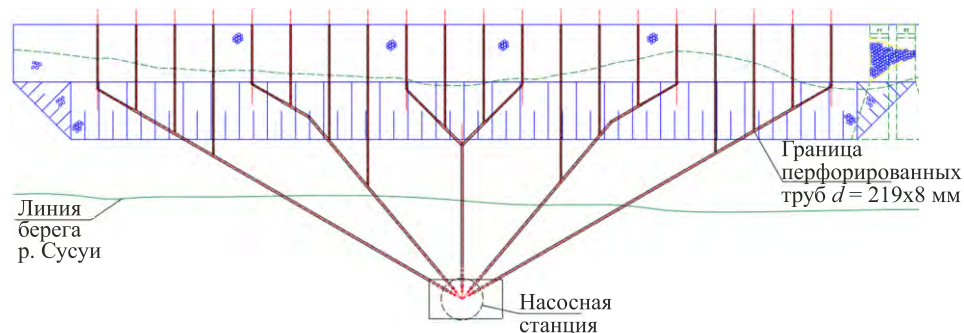


Рис. 1. Схема существующего водозабора

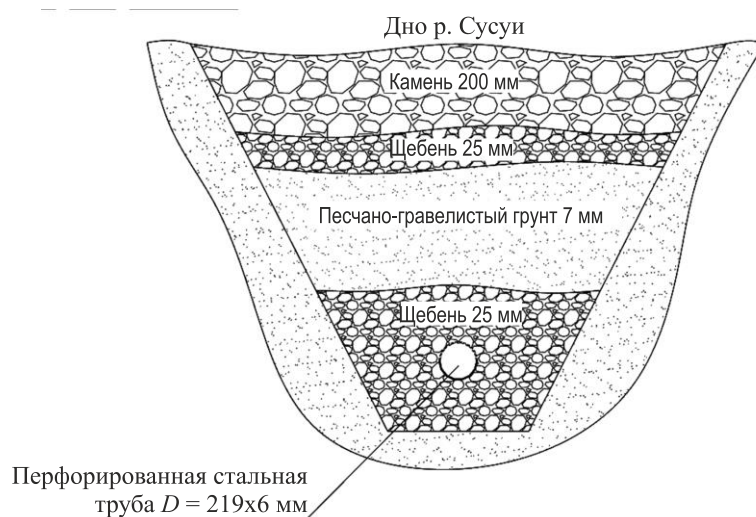


Рис. 2. Существующий проект водозабора

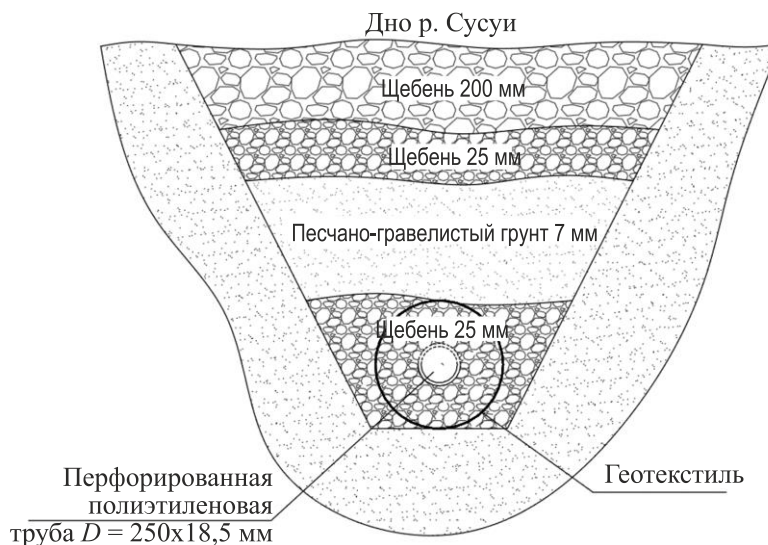


Рис. 3. Предлагаемый вариант реконструкции

Предложенная конструкция подруслового водозабора (см. рис. 3) соответствует всем природоохранным нормам [4, 5], экономически выгодна и обеспечивает надежную работу всей схемы технического водоснабжения.

Предложенный вариант наиболее эффективен с точки зрения технологических решений и минимизации негативного воздействия на окружающую природную среду.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Силин-Бекчурин И.И.** Динамика подземных вод. М.: Издательство Московского университета, 1965. С. 296-298.
2. **Чайко А.А.** Гидрология и загрязненность рек юга Сахалина // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 2. С. 30-34.
3. **Макеев С.С.** Экологический паспорт реки Сусуя: по итогам проекта «Сусуя живая и мёртвая» на средства гранта Правительства Сахалинской области / Правительства Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Кано, 2020. 19 с.
4. **П 58.13330.2019.** Гидротехнические сооружения. М.: Стандартинформ, 2019.
5. **Федеральный закон № 7-ФЗ** от 10.01.2002. «Об охране окружающей среды». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

REFERENCES

1. Silin-Bekchurin I.I. Dynamics of groundwater. Moscow University Publishing House, 1965. pp. 296-298.
2. Chaiko A.A. Hydrology and pollution of rivers in the south of Sakhalin. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2007;(2):30-34.
3. Makeev S.S. Ecological passport of the Susuya River: based on the results of the project «Susuya Alive and Dead» funded by a grant from the Government of the Sakhalin Region. Government of the Sakhalin region. Yuzhno-Sakhalinsk: Kano, 2020. 19 p.

4. SP 58.13330.2019. Hydraulic structures. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ.).

5. Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2002. «On environmental protection». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/. (In Russ.).

Информация об авторах

А.С. Фролов – инженер 2 кат.;

Ю.Д. Матвеев – инженер;

Т.Н. Максимова – научный сотрудник;

А.А. Мартынов – инженер 2 кат.

Information about the authors

A.S. Frolov – Engineer 2 cat.;

Y.D. Matveev – Engineer;

T.N. Maksimova – Researcher;

A.A. Martynov – Engineer 2 cat.

Статья поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена после рецензирования 11.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 29.11.2023; approved after reviewing 11.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 621.311.24

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ УСЛОВИЙ АРКТИКИ

Виктор Васильевич Елистратов¹, Иван Владимирович Ригель²

^{1,2} ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

¹ elistratov@spbstu.ru

² rigel_iv@spbstu.ru

Аннотация. Анализируются конструктивные решения фундаментов для ветроэнергетических установок (ВЭУ) в условиях арктической зоны. В исследовании рассмотрены требования к фундаментам ВЭУ, размещенным на вечномёрзлых основаниях. Проанализирован как отечественный, так и мировой опыт проектирования фундаментов ВЭУ, что позволило систематизировать проверенные и перспективные конструктивные решения фундаментов для суровых условий. Предложена классификация фундаментов арктических ВЭУ на основе конфигурации, конструктивного исполнения и типа вечномёрзлого основания. В результате исследования выделены статические и динамические воздействия на фундаменты и основания арктических ВЭУ, методы их определения. Предложена последовательность расчетного обоснования фундамента арктической ВЭУ.

Ключевые слова: фундамент, вечномёрзлое основание, арктическая ВЭУ, моделирование, статические и динамические воздействия, проектирование

Для цитирования: Елистратов В.В., Ригель И.В. Конструктивные решения и методы проектирования фундаментов ветроэнергетических установок для условий Арктики // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 43–55.

Original article

STRUCTURAL SOLUTIONS AND DESIGN METHODS FOR WIND TURBINE FOUNDATIONS IN ARCTIC CONDITIONS

Viktor V. Elistratov¹, Ivan V. Rigel²

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹ elistratov@spbstu.ru

² rigel_iv@spbstu.ru

Abstract. The article is focused on analyzing the design solutions of wind turbine foundations in the conditions of the Arctic zone. The study considers the requirements for the foundations for wind turbines placed on permafrost bases. Both domestic and world experience in designing foundations for wind turbines has been analyzed, which allowed to systematize proven and perspective design solutions of foundations for harsh conditions. The classification of foundations for arctic wind turbines based on the configuration, structural design and type of permafrost ground is proposed. As a result of the research static and dynamic impacts on the foundations and grounds of arctic wind turbines, methods of their determination are emphasized. The sequence of calculation justification of the foundation of the arctic wind turbine is proposed.

Keywords: *foundation, permafrost ground, arctic wind turbine, modeling, static and dynamic impacts, design.*

For citation: Elistratov V. V., Rigel I. V. Structural solutions and design methods for wind turbine foundations in Arctic conditions. *Proceedings of the VNIIG*. 2024, 311:43-55. (In Russ.)

Введение

Значительная часть арктических территорий РФ находится вне зоны централизованного энергоснабжения, потребители получают электроэнергию с помощью дизельных электростанций (ДЭС). Логистические трудности доставки топлива определяют высокие затраты на производство вырабатываемой электроэнергии.

Для повышения надежности энергоснабжения Арктической зоны РФ предлагается использовать ветроэнергетические установки (ВЭУ), работающие в составе ветродизельных энергокомплексов с высокой долей замещения дизельного топлива [1]. При этом ВЭУ арктического исполнения должна быть устойчива к низким температурам, экстремальным ветрам с высокой турбулентностью на этапах строительства и эксплуатации.

Целью статьи является анализ компоновочных решений фундаментов ВЭУ, разработка предложений и принципов проектирования надежного фундамента, адаптированного к условиям российской Арктики, рассчитанного на спектр статических и динамических воздействий, создаваемых ВЭУ с учетом особенностей вечномерзлых грунтов (ВМГ) основания и возможных климатических изменений в процессе эксплуатации.

Анализ конструкций фундаментов арктических ВЭУ

Преобладающими нагрузками, действующими на фундаментные конструкции арктической ВЭУ, являются сдвигающие силы и опрокидывающие моменты от ветрового потока, которые могут быть восприняты следующими способами:

1. За счет увеличения вертикальной нагрузки на основание (пригруза) и площади подошвы фундамента.
2. За счет анкеров в грунте основания или создания свайного основания, воспринимающих выдергивающие нагрузки.

Первый способ реализуется при использовании монолитных плитных железобетонных фундаментов. Примером монолитной конструкции являются фундаменты ВЭУ в пос. Тикси, фундаменты ВЭУ ветропарка Alaska Environmental Power (США) (рис. 1).

В связи с логистическими и технологическими трудностями, возникающими при строительстве в арктической зоне, зачастую необходима минимизация «мокрых» строительных процессов, особо чувствительных к низким температурам. С этой целью могут быть использованы сборно-монолитные конструкции фундаментов. На рис. 2 представлен сборный ребристый железобетонный фундамент ВЭУ на ВЭС Сийска (Швеция) [3].



Рис. 1. Процесс возведения монолитных фундаментов ВЭУ в пос. Тикси, Якутия (а) и ветропарка Alaska Environmental Power (США) (б) [2]



Рис. 2. Сборный железобетонный фундамент ВЭУ на ВЭС Сийска (Швеция)

Подход, связанный с разработкой сборных модульных фундаментов для арктических ВЭУ высокой заводской готовности, запатентован СПбПУ Петра Великого [4, 5]. Конструкция состоит из коробчатых стальных или железобетонных модулей (рис. 3), которые для обеспечения соответствующего пригруза заполняются местными материалами на строительной площадке, что позволяет снизить логистические затраты за счет снижения общего веса транспортируемой конструкции.

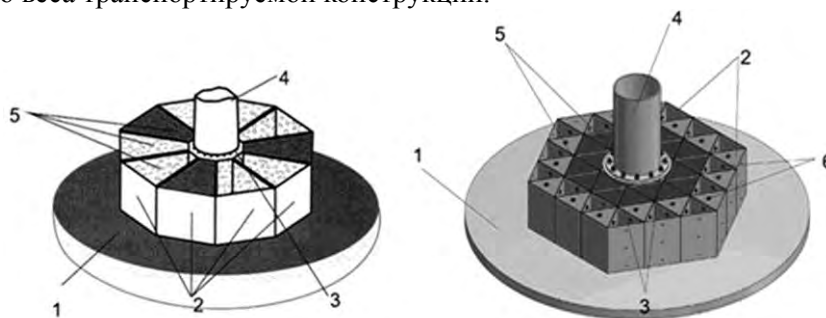


Рис. 3. Модульные фундаменты арктической ВЭУ разработки СПбПУ:
 1 – грунтовое основание; 2 – коробчатые модули; 3 – центральный модуль; 4 – башня ВЭУ;
 5 – пригруз из местного материала; 6 – болтовое соединение

Несущим массивом грунта при использовании гравитационных типов фундаментов являются вышележащие слои, что приводит к ограничениям по их использованию в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. Сезонное промерзание-оттаивание деятельного слоя, деградация многолетней мерзлоты вследствие нарушения грунтовой среды, а также глобальных климатических изменений могут привести к резкому снижению прочностных и деформационных характеристик основания, измене-

нию динамического отклика ВЭУ [6, 7], поэтому применение гравитационных фундаментов возможно только при возведении ВЭУ на жестком морозном грунте, нечувствительном к повышению температуры или при использовании I принципа строительства на ВМГ (I ПСВМГ) – сохранении мерзлого состояния грунта основания на протяжении всего срока эксплуатации сооружения. Последнее требует специального обоснования температурным расчетом и достигается увеличением глубины заложения, применением охлаждающих систем, что приводит к дополнительным затратам при строительстве и эксплуатации. На рис. 4 представлена конструкция гравитационного фундамента, опирающегося на отдельные блоки на о. Росса в Антарктике, где температура поверхности грунта крайне редко превышает $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8] и мощность сезонно-талого слоя невелика.

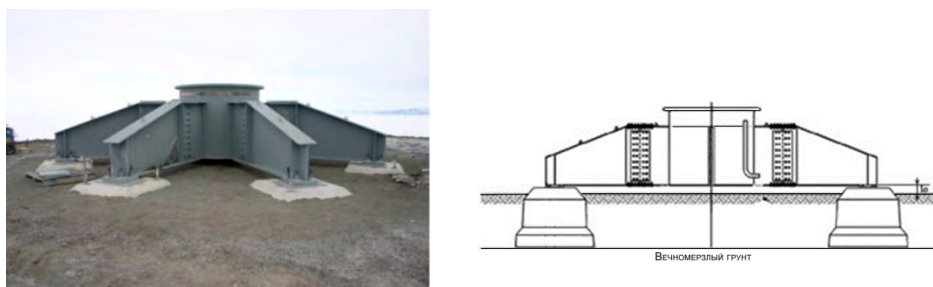


Рис. 4. Конструкция фундамента ВЭУ на острове Росса, Антарктика

Для исключения отрыва подошвы фундамента основания при расчете размеров и массы конструкции гравитационные фундаменты могут быть дополнены гибкими преднапряженными буроинъекционными грунтовыми анкерами. В таком случае вертикальное давление по подошве фундамента воспринимается поверхностью грунта, а грунтовые анкеры, работающие на растяжение, обеспечивают закрепление фундамента при отрыве.

В настоящее время наиболее распространенной практикой при строительстве фундаментов зданий и сооружений в зонах распространения вечномерзлых грунтов являются свайные конструкции. Такие конструкции, как правило, представляют собой группу буроопускных свай, объединенных высоким ростверком. Сваи прорезают всю толщу сезонно-талого слоя и передают нагрузку на нижележащие многолетнемерзлые грунты, а зазор между ростверком и поверхностью земли минимизирует влияние теплопроводных конструкций фундамента на температурный режим основания и негативные воздействия при пучении грунтов.

Примером свайных фундаментов ВЭУ являются разработанные и запатентованные в 90-е годы прошлого века специалистами «ПечорНИИпроекта» и СОНИИОПС сборные железобетонные конструкции свайных фундаментов ВЭУ с трехточечным опиранием, примененные при строительстве Воркутинской и Анадырской ВЭС [9].

При проектировании, расчете параметров и научно-техническом сопровождении создания ветродизельной электростанции в пос. Амдерма (Ненецкий автономный округ), принцип трехточечного опирания фундамента специалистами НОЦ «ВИЭ» СПбПУ был адаптирован при создании стального фундамента ВЭУ 50 кВт арктического исполнения (рис. 5).



Рис. 5. Фундамент и установленная ВЭУ в пос. Амдерма

Конструкции свайных фундаментов применяются и в других странах. На рис. 6, *а, б* приведены примеры стального и сталежелезобетонного свайных фундаментов ВЭУ, возведенных на Аляске. Существует также конструкция пилонного (односвайного) фундамента, которая является достаточно распространенной для оффшорных ВЭУ (рис. 6, *в*). Проблемы, возникающие при разжижении верхнего слоя грунта основания оффшорных ВЭУ на пилонном фундаменте [10], схожи с проблемами, возникающими вследствие оттаивания верхних влажных слоев мерзлого грунта. При соответствующем обосновании данный тип фундамента может устраиваться и в вечномерзлых грунтах с применением буроопускной технологии, однако трудность разработки мерзлого грунта накладывает ограничения на размеры опорного пилона, поэтому пилонный фундамент может быть целесообразен при возведении небольших ВЭУ.

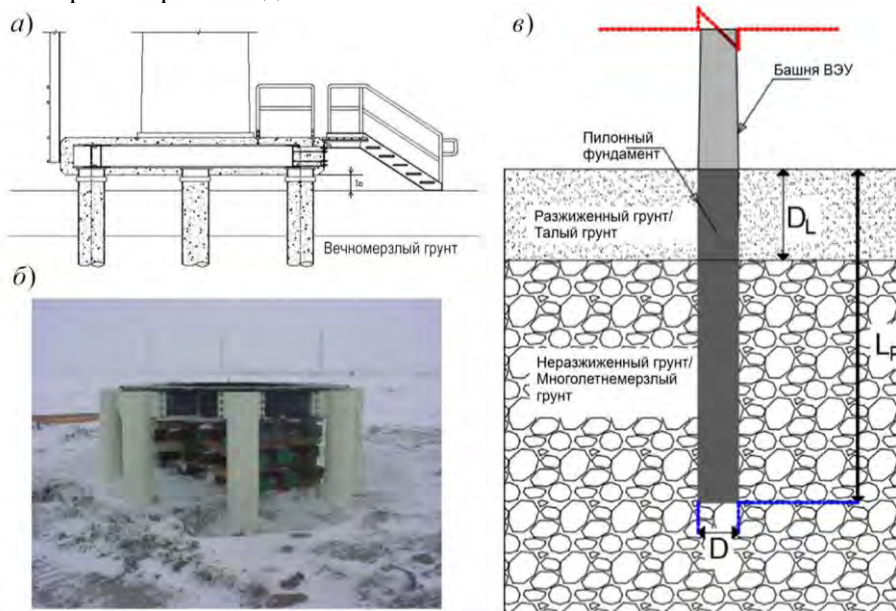


Рис. 6. Свайные фундаменты:

а, б – кустовые свайные фундаменты ВЭУ на Аляске [11]; *в* – пилонный фундамент для оффшорных и арктических ВЭУ (D_L – мощность разжижаемого или талого слоя грунта, D – диаметр пилона, L_P – глубина заложения пилона)

По результатам проведенного анализа варианты фундаментов систематизированы с учетом типа, конфигурации, конструктивного исполнения, используемых технологий, материалов и сведены в общую классификацию, представленную на рис. 7.

Для предварительного выбора конструктивного решения фундамента ВЭУ при различных типах вечномерзлого основания предложена классификация, приведенная на рис.8.

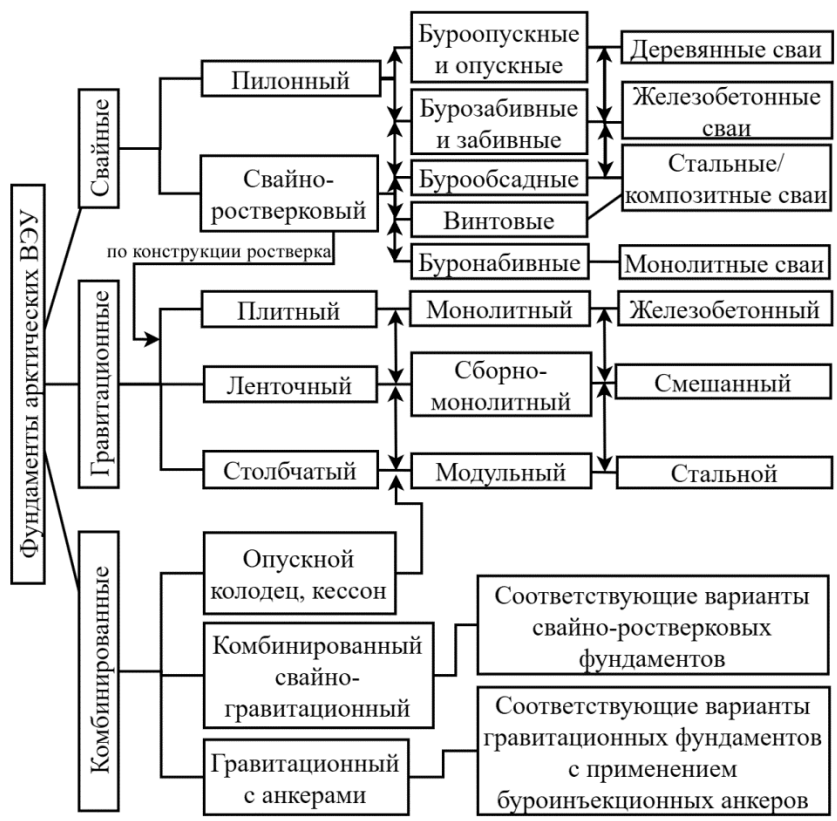


Рис. 7. Классификация конструкций фундаментов арктических ВЭУ



Рис. 8. Классификация фундаментов в зависимости от типов основания

В зависимости от выбранного варианта, для обеспечения надежной эксплуатации ВЭУ к процессу проектирования предъявляются дополнительные требования: учет динамического разуплотнения грунта, устройство дренажа, противопучинные мероприятия, заглубление до ВМГ, теплоизоляция и термостабилизация основания (I ПСВМГ), предварительное оттаивание и адаптация сооружения к неравномерным осадкам (II ПСВМГ).

Таким образом, в условиях пространственно-временной изменчивости геокриологических характеристик оснований и наличия динамических воздействий, обоснование параметров фундамента арктической ВЭУ является комплексной многопараметрической задачей. Использование современных цифровых подходов позволяет произвести всестороннюю оценку вариантов и определить оптимальную конструкцию.

Требования к фундаменту арктической ВЭУ

Согласно [12,13], при проектировании фундаментов на вечномерзлых грунтах должны быть удовлетворены требования: по прочности основания и конструкции фундамента; по пригодности к нормальной эксплуатации (по деформациям); по допустимым уровням колебаний, а также по недопущению растепления несущего массива при использовании I ПСВМГ. При этом необходимо учитывать такие глобальные климатические факторы, как повышение среднегодовой и среднезимней температур воздуха, которое по оценкам [14] может локально достигать более 9 °С к середине XXI века.

Конструкция фундамента арктической ВЭУ должна обеспечивать [15]:

1. Устойчивость ВЭУ при действии статических и динамических нагрузок, опрокидывающих сил и моментов от ветрового потока.
2. Устойчивость ВЭУ при оттаивании мерзлых грунтов основания и их динамическом разупрочнении [16].
3. Жесткость конструкции ВЭУ и уход от резонанса при пульсациях ветрового потока и частотах вращения ветроколеса [6].
4. Усталостную прочность элементов ВЭУ при действии разночастотных динамических нагрузок (ветровых, эксплуатационных, сейсмических) на протяжении жизненного цикла объекта.

Статические и динамические нагрузки на фундамент ВЭУ

Для обоснования типа и характерных параметров фундаментной конструкции, таких как длина $l_{св}$, размеры $b_{св}$ и количество свай $n_{св}$ или размеры подошвы $b_{ф}$, минимальная масса $m_{ф}$ и глубина заложения $d_{ф}$ гравитационного фундамента, производится комплексный расчет, включающий определение статических и динамических воздействий на фундамент с учетом нестационарности ветрового потока и различных режимов работы ВЭУ. На рис. 9 приведена схема нагрузок на привалочную плоскость фундамента и возможные спектры динамических воздействий на основании эксплуатируемой ВЭУ.

В зависимости от типа фундамента, нагрузка может передаваться на грунт различными способами (рис. 10). Для окончательного выбора пара-

метров конструкции фундамента производятся проверки несущей способности основания при действии давлений по подошве, вдавливающих и выдергивающих нагрузок.

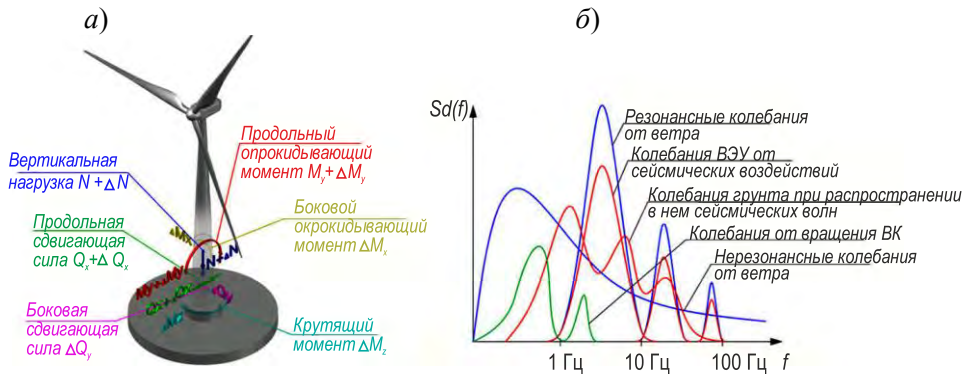


Рис. 9. Схема статических и динамических нагрузок на фундамент ВЭУ (а) и возможные энергетические спектры динамических воздействий на основание (б)

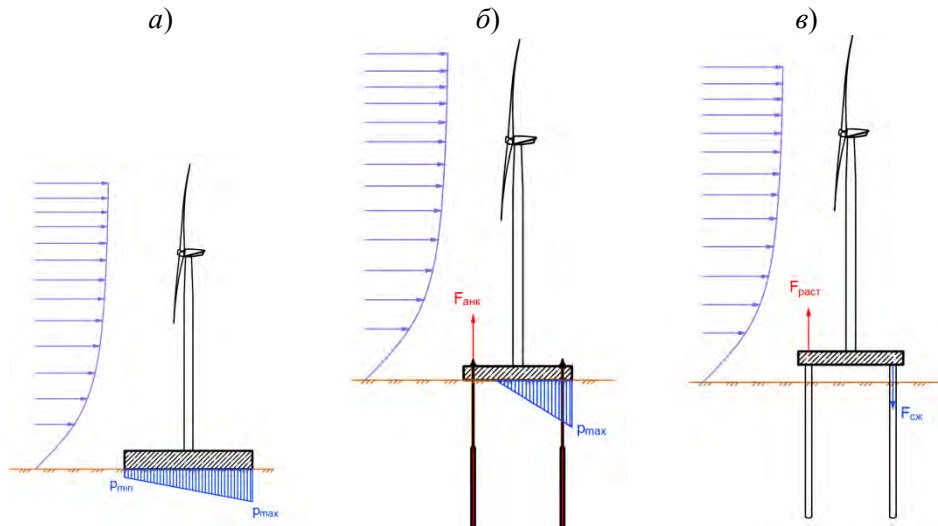


Рис. 10. Схемы перераспределения нагрузок фундаментами различного типа: а – гравитационный фундамент; б – анкерный фундамент; в – свайный фундамент

Блок-схема определения параметров фундаментов при вариантном проектировании арктической ВЭУ на основе итерационного цифрового моделирования представлена на рис. 11.

В блоке 1 на основании анализа местоположения площадки строительства и результатов инженерно-геологических изысканий предварительно выбираются варианты конструктивных решений фундаментов ВЭУ.

В блоке 2 для моделирования статических и динамических нагрузок от эксплуатируемой ВЭУ и передачи их на фундамент и основание разрабатывается аэроупругая модель ВЭУ, которая включает:

аэродинамическое моделирование поведения лопасти при обтекании ветровым потоком;

построение прочностной модели лопасти для определения аэроупругих свойств лопасти;

создание конечно-элементных моделей ветроколеса, гондолы, башни ВЭУ для определения статических и динамических нагрузок на привалочную плоскость фундамента;

настройку параметров управляющего контроллера для pitch-контроля лопастей и других устройств.

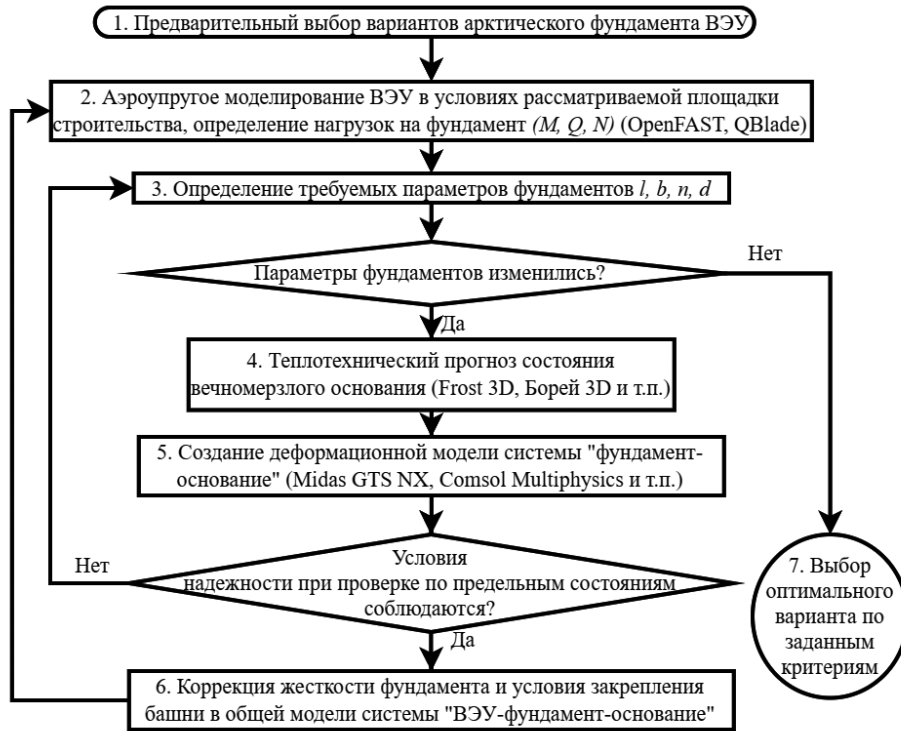


Рис. 11. Блок-схема расчетного обоснования фундамента арктической ВЭУ

На первой итерации расчета, когда параметры конструкции фундамента неизвестны, граничное условие закрепления нижней части башни к фундаменту принимается абсолютно жестким.

Разработанная модель используется для проведения численных симуляций под действием изменяющегося во времени и пространстве турбулентного ветрового потока. В качестве исходных параметров для моделирования ветра используются средняя скорость V_0 , закон изменения скорости по высоте (1), функция спектральной плотности мощности Каймала (2) и экспоненциальная функция когерентности пульсаций (3):

$$V(z) = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где z – высота над поверхностью земли; z_0 – базовая высота; α – показатель степени функции распределения;

$$\frac{f S_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4f L_k / V_{hub}}{(1 + 6f L_k / V_{hub})^{5/3}}, \quad (2)$$

где V_{hub} – скорость ветра на высоте ступицы; f – частота; S_k – одномерный спектр k -й составляющей вектора скорости; σ_k – среднее квадратическое отклонение составляющей вектора скорости; L_k – интегральный масштаб k -й составляющей вектора скорости;

$$Coh(r, f) = e^{-8,8 \sqrt{\left(\frac{f \cdot r}{V_{hub}}\right)^2 + \left(\frac{0,12r}{L_c}\right)^2}}, \quad (3)$$

где r – величина проекции вектора разделения между двумя точками на плоскость, перпендикулярную к направлению вектора средней скорости ветра; L_c – масштаб когерентности.

На основе уравнений (1)–(3) можно в заданной временной области численно сгенерировать нестационарный ветровой поток с соответствующими параметрами.

По результатам нестационарного аэроупругого моделирования определяются нагрузки на фундамент ВЭУ. На рис. 12 приведена визуализация ветрового потока на ВЭУ и графики изменения во времени опрокидывающего момента M_y , горизонтальной Q_x и вертикальной силы N , действующих на привалочной плоскости фундамента ВЭУ.

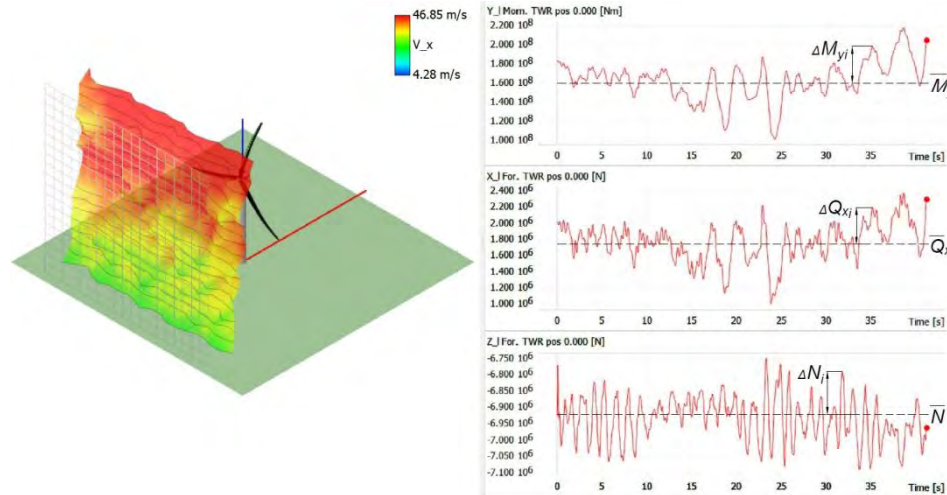


Рис. 12. Результаты нестационарного аэроупругого моделирования ВЭУ в ПК QBlade

Для определения параметров конструкции фундамента в первой итерации полученные нагрузки в блоке 3 сравниваются с предельно допустимыми для имеющихся грунтовых условий. Несущая способность основания зависит от характеристик подстилающих геологических слоев и ожидаемого температурно-влажностного режима грунтового массива.

Влияние температуры на прочность и деформативность грунтов обуславливает необходимость учета тепловых воздействий и возможность повышения несущей способности за счет применения систем теплоизоляции и термостабилизации основания. В блоке 4 для уточнения состояния грунта производится температурный прогноз на срок эксплуатации ВЭУ и определение расчетных характеристик основания с использованием нестационарного теплотехнического моделирования в программном комплексе Frost 3D. На рис. 13 представлен пример результатов теплотехнического численного моделирования основания ВЭУ на ВМГ в программном комплексе Frost 3D.

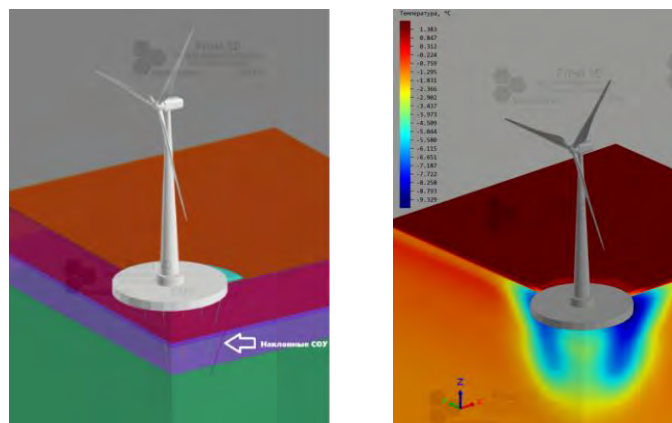


Рис. 13. Моделирование температурного режима грунтового основания с применением теплоизолированной насыпи и сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ)

По результатам температурного прогноза, в блоке 5 производится уточненная проверка прочности и устойчивости сооружения в разработанной деформационной модели системы *фундамент–основание*. На основании проверки прочности и устойчивости в деформационной модели в блоке 6 корректируются условия закрепления башни ВЭУ в общей модели системы *ВЭУ–фундамент–основание* для учета влияния полученных значений жесткости на статические и динамические расчетные нагрузки.

Если уточнение жесткости фундамента не приводит к значимому изменению нагрузок в общей модели и принятые параметры фундамента удовлетворительны, то в блоке 7 определяются параметры полученной конструкции фундамента для дальнейшего технико-экономического сравнения вариантов.

Таким образом, сформирована методическая основа для обоснования параметров фундаментов арктических ВЭУ на вечномерзлых грунтах, позволяющая проводить оптимизационные расчеты в условиях пространственно-временной изменчивости геокриологических характеристик оснований, статических и динамических воздействий от ветрового потока и работающего оборудования.

Заключение

1. Разработаны требования к фундаментам арктических ВЭУ и сформулирован перечень статических и динамических воздействий на их основания.

2. На основе отечественного и мирового опыта проектирования и создания ВЭС в суровых климатических условиях предложена классификация фундаментов ВЭУ по типу, конфигурации, конструктивному исполнению, а также в зависимости от типа вечномерзлого основания.

3. Предложена последовательность проектного обоснования фундамента арктической ВЭУ на основе цифрового моделирования. Определены основные этапы создания аэроупругой модели ВЭУ и методы моделирования динамической ветровой нагрузки.

4. Предложенные конструкции фундаментов могут быть рекомендованы при технико-экономическом обосновании опорных конструкций ВЭУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ресурсы** и технологии использования возобновляемых источников энергии // СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 528 с.
2. **Community** wind toolkit: A Guide to Developing Wind Energy Projects in Alaska. Renewable Energy Alaska Project (REAP), March, 2011.
3. **The Sjisjka** wind farm // Сайт Skanska [Электронный ресурс]. URL: <https://group.skanska.com/projects/57331/The-Sjisjka-wind-farm> (дата обращения: 10.09.2023).
4. **Патент** № RU167022U1, 20.12.2016. Модульный фундамент для ветроэлектрической установки // Сайт Google Patents / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов, М.А. Конышев, Р.С. Денисов [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU167022U1/ru> (дата обращения: 10.09.2023).
5. **Елистратов В.В., Ригель И.В.** Исследование собственной частоты колебаний системы «Арктическая ВЭУ – фундамент – основание» при промерзании и оттаивании грунтов // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023.
6. **Zheng M., Yang Z., Yang Sh., Still B.** Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost. *Engineering Structures*. V. 148, 2017. Pp. 36-46, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.037>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617301876>).
7. **Oswell J.M., Mitchell M., Chalmers G., Mackinvin H.** Design, construction and initial performance of wind turbine foundations in Antarctica // 6-th Canadian Permafrost Conference. Calgary, Alberta. September 2010.
8. **Бутузов В.А.** Российская ветроэнергетика: научно-конструкторские школы, этапы развития, перспективы // Журнал СОК №5 (стр. 62-76) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/rossiyskaya-vetroenergetika-nauchnokonstruktorskie-shkoly-etapy-razvitiya-perspektivy> (дата обращения: 10.09.2023).
9. **Demirci H.E., Jalbi S., Bhattacharya S.** Liquefaction effects on the fundamental frequency of monopile supported offshore wind turbines (OWTs) // *Bull Earthquake Eng* 20, 3359–3384 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01360-9>
10. **IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates.** 2017.
11. **СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Минстрой России, 2020. 143 с.
12. **СП 26.13330.2012.** Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. М.: Минрегион России, 2012. 70 с.
13. **Третий** оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // Росгидромет. Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022. 124 с.
14. **IEC 61400-1.** Wind Turbines. Part 1: Design requirements / Third edition, 2005. 92 p.
15. **Ригель И.В., Елистратов В.В.** Оценка влияния динамических нагрузок на основание арктической ВЭУ // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции. Т. I. Часть I. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 200-203.

REFERENCES

1. Resources and technologies for the use of renewable energy sources. SPb.: POLYTECH-PRESS, 2022. 528 p. (In Russ.).
2. Community wind toolkit: A Guide to Developing Wind Energy Projects in Alaska. Renewable Energy Alaska Project (REAP), March, 2011.
3. The Sjisjka wind farm // Skanska [Electronic resource]. URL: <https://group.skanska.com/projects/57331/The-Sjisjka-wind-farm> (date of the application 10.09.2023).

4. Patent No. RU 167022U1, 12.20.2016. Modular foundation for a wind-electric installation // Google Patents website / V.V. Elistratov, A.A. Panfilov, M.A. Konishchev, R.S. Denisov [Electronic resource] URL: [https://patents.google.com/patent/ RU167022U1/ru](https://patents.google.com/patent/RU167022U1/ru) (date of the application: 10.09.2023).
5. Elistratov V.V., Rigel I.V. Study of the natural frequency of oscillations of the system “Arctic wind turbine – foundation – foundation” during freezing and thawing of soils. ISI Science Week: collection of materials from the All-Russian Conference. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2023. (In Russ.).
6. Zheng M., Yang Z., Yang Sh., Still B. Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost. Engineering Structures. V. 148, 2017. Pp. 36-46, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.037>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617301876>).
7. Oswell J.M., Mitchell M., Chalmers G., Mackinvin H. Design, construction and initial performance of wind turbine foundations in Antarctica // 6-th Canadian Permafrost Conference. Calgary, Alberta. September 2010.
8. Butuzov V.A. Russian wind energy: scientific and design schools, stages of development, prospects // SOK Journal No. 5 (pp. 62-76) [Electronic resource]. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/rossiyskaya-vetroenergetika-nauchnokonstruktorskieshkoly-etapy-razvitiya-perspektivy> (date of the application: 10.09.2023). (In Russ.).
9. Demirci H.E., Jalbi S., Bhattacharya S. Liquefaction effects on the fundamental frequency of monopile supported offshore wind turbines (OWTs) // Bull Earthquake Eng 20, 3359–3384 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01360-9>
10. IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates. 2017.
11. SP 25.13330.2020. Foundations and foundations on permafrost soils. M.: Ministry of Construction of Russia, 2020. 143 p. (In Russ.).
12. SP 26.13330.2012. Foundations of machines with dynamic loads. Updated version of SNiP 2.02.05-87. M.: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 70 p. (In Russ.).
13. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary // Roshydromet. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 124 p. (In Russ.).
14. IEC 61400-1. Wind Turbines. Part 1: Design requirements / Third edition, 2005. 92 p.
15. Rigel I.V., Elistratov V.V. Assessment of the influence of dynamic loads on the base of an Arctic wind turbine // ISI Science Week: collection of materials from the All-Russian Conference. T. I. Part I. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. P. 200-203. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Елистратов – доктор техн. наук, профессор;
И.В. Ригель – аспирант, инженер.

Information about the authors

V.V. Elistratov – Dr. Sci. (Techn.), Professor;
I.V. Rigel – graduate student, engineer.

Статья поступила в редакцию 25.11.2023; одобрена после рецензирования 18.02.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 25.11.2023; approved after reviewing 18.02.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.823.461

ОПЫТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ХОЛОСТЫХ ВОДОСБРОСОВ НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ГЭС

**Кирилл Николаевич Барило¹, Марина Сергеевна Терехова²,
Ольга Александровна Борус³, Георгий Владимирович Охалкин⁴**

^{1,2,3} ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация», Иркутская область, г. Иркутск

⁴ АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия

¹ barilo_kn@eurosib-hydro.ru

² TerekhovaMS@eurosib-hydro.ru

³ BorusOA@eurosib-hydro.ru

⁴ georgii@okhapkin.net

Аннотация. Рассмотрены подходы к восстановлению водонепроницаемости бетона конструкций гидротехнических сооружений. Проанализированы технические решения и инъекционные материалы, используемые при ремонте трещин. Представлены результаты выполненных ремонтно-восстановительных работ.

Ключевые слова: *ремонт трещин, гидротехнические сооружения, инъекционные материалы, технические решения, опыт ремонта*

Для цитирования: Барило К.Н., Терехова М.С., Борус О.А., Охалкин Г.В. Опыт восстановления водонепроницаемости холостых водосбросов на примере Иркутской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 56–64.

Original article

THE EXPERIENCE OF WATERPROOF'S RESTORATION OF IDLE SPILLWAY USING THE EXAMPLE OF THE IRKUTSK HYDROELECTRIC STATION

**Kirill N. Barilo¹, Marina S. Terekhova², Olga A. Borus³,
Georgiy V. Okhapkin⁴**

^{1,2,3} LLC «EuroSibEnergo – Hydrogeneration», Irkutskaya oblast', g. Irkutsk

⁴ JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ barilo_kn@eurosib-hydro.ru

² TerekhovaMS@eurosib-hydro.ru

³ BorusOA@eurosib-hydro.ru

⁴ georgii@okhapkin.net

Abstract. The article considers approaches to waterproof's restoration of the hydro-technical facilities' concrete. The main types of cracks were identified. The technical solutions and the injection materials used in the cracks' restoration are analyzed. The results of the completed repair and restoration work are presented.

Keywords: *cracks' restoration, hydro-technical facilities, injection materials, technical solutions, repair experience*

© Барило К.Н., Терехова М.С., Борус О.А., Охалкин Г.В., 2024

For citation: Barilo K.N., Terekhova M.S., Borus O.A., Okhapkin G.V. The experience of waterproof's restoration of idle spillway using the example of the Irkutsk hydroelectric station. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:56-64. (In Russ.).

Объекты гидротехники являются одними из важнейших в топливно-энергетических и транспортных комплексах стран. Поэтому обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации ГЭС является одной из важнейших стратегических задач для функционирования топливно-энергетического комплекса Российской Федерации [1, 2].

Как известно, надёжность и безопасность ГЭС неразрывно связана с несущей способностью и водонепроницаемостью конструкций, то есть способностью выдерживать эксплуатационные нагрузки и воздействия. Для обеспечения несущей способности бетонные и железобетонные конструкции должны удовлетворять расчётным требованиям по предельным состояниям первой (по прочности с проверкой устойчивости положения и формы конструкций) и второй групп (по образованию трещин). Допустимое раскрытие трещин, в зависимости от класса сооружения и типов конструкций, составляет 0–0,5 мм [3, 4].

Для ГЭС, особенно с длительным жизненным циклом, характерен физический и моральный износ бетона конструкций в зонах наиболее интенсивных воздействий [2]. К одной из наиболее распространённых причин разрушения железобетона относится недопустимое раскрытие трещин в бетоне, которое увеличивает риск проникновения в конструкцию влаги и газов, способствующих развитию деструктивных процессов [5]. Волосные и очень тонкие трещины с раскрытием до 0,1 мм, как правило, не оказывают влияния на коррозию арматуры. Тонкие трещины с раскрытием 0,1–0,3 мм не оказывают серьёзного влияния на коррозию арматуры, но могут способствовать её возникновению. Средние трещины с раскрытием 0,3–1 мм способствуют коррозии арматуры. Очень широкие трещины с раскрытием более 1 мм оказывают серьёзное влияние на коррозию арматуры [6]. Стоит отметить, что для конструкций ГЭС, как правило, характерны признаки фильтрации и коррозии бетона (выщелачивание, высолы) в области трещин [7]. Далее приведена информация по опыту восстановления водонепроницаемости холостых водосбросов на примере Иркутской ГЭС.

Строительство Иркутской ГЭС проводилось с весны 1950 г. по декабрь 1958 г. Холостые водосбросы выполнены из монолитного железобетона. Длина составляет 56 м, сечение прямоугольное (6,0×8,0 м – на входе, 1,8×7,4 м – на выходе). Проекция пола и потолка на горизонтальную поверхность имеют значительное сужение в месте оси агрегатов, расширяясь в сторону верхнего и нижнего бьефов. Поверхности пола и потолка криволинейны и имеют уклоны от верхнего бьефа к нижнему, за исключением горизонтального участка в области оси агрегата. Перепад высот (отметок по полу) – 10,5 м. Суммарная площадь поверхностей пола, потолка и стен одного водосброса составляет около 1150 м². Общее количество водосбросов 16 шт., по 2 шт. на каждый гидроагрегат. Общие виды холостых водосбросов Иркутской ГЭС приведены на рис. 1.



Рис. 1. Общие виды холостых водосбросов Иркутской ГЭС

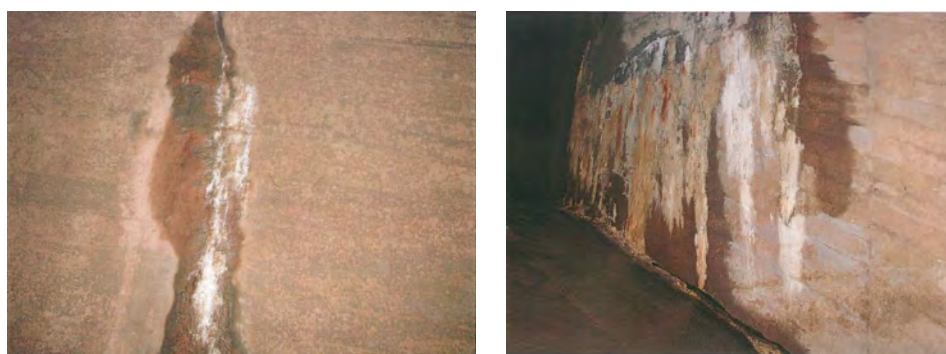


Рис. 2. Примеры трещин с локальными проявлениями фильтраций и коррозии бетона

В связи с длительным сроком эксплуатации, температурными особенностями режима работы железобетона происходит образование трещин в бетоне ограждающих конструкций водосбросов. При заполнении холостых водосбросов водой выявлены трещины с проявлением локальных

фильтраций как в самих холостых водосбросах, так и в смежных помещениях. Примеры трещин с локальными проявлениями фильтрации и коррозии бетона приведены на рис. 2.

В общих случаях при восстановлении бетона конструкций используются нормативные документы, посвящённые материалам и системам для защиты и ремонта бетонных конструкций [8], например: для Российской Федерации [9–11]; для Европейского Союза [12–14]; для Республики Беларусь [15–17]. При ремонте трещин в бетоне пользуются ГОСТ [11], в котором приведена информация по принципам и методам ремонта трещин, обязательным и дополнительным требованиям к физико-механическим и эксплуатационным характеристикам ремонтных материалов. Для ремонта трещин в бетоне предложены следующие принципы и методы:

принцип 1 – защита от проникания: метод 1.5 – заполнение трещин; метод 1.6 – преобразование трещин в швы;

принцип 4 – усиление (упрочнение) конструкций: метод 4.5 – инъецирование в трещины, пустоты или полости; метод 4.6 – заполнение трещин, пустот или полостей.

Для ремонта трещин предлагается использовать следующие группы материалов:

группа АС – для конструкционного заполнения с адгезионно-силовым замыканием. Материал на полимерной или цементной основе с жесткой структурой, адгезионно связанный с бетоном конструкции, способный воспринимать нагрузку (в том числе от действия воды) и передавать напряжения;

группа АГ – для неконструкционного заполнения с адгезионно-герметизирующим замыканием. Материал на полимерной основе с упругоэластичной водонепроницаемой структурой, адгезионно связанный с бетоном конструкции, способный воспринимать воздействия от перемещений при подвижке трещины и давления воды;

группа КГ – для неконструкционного заполнения с компрессионно-герметизирующим замыканием. Материал на полимерной гидрофильной основе с гелеобразной ограниченно набухающей структурой, компрессионно (под действием набухания при поглощении влаги) связанный с бетоном конструкции, способный воспринимать воздействия от перемещений при подвижке трещины и давления воды.

С целью восстановления водонепроницаемости холостых водосбросов в период с 2016 по 2019 гг. выполнен ремонт значительных по длине и раскрытию трещин с проявлениями фильтраций с использованием материалов на цементном вяжущем. После открытия холостых водосбросов в 2020 г. установлено, что выполненные ремонтно-восстановительные работы уменьшили объём фильтрующей через бетон воды, но не устранили проблему полностью.

В 2021 г. в рамках договора по техническому содействию в обеспечении безопасности ГТС «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация» АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» предложены варианты выполнения ремонтных работ, по которым в 2022 г. был выполнен ремонт холостого водосброса № 6. Схема ремонта трещин в холостом водосбросе № 6 приведена на рис. 3. В отличие от ранее выполненных работ, в состав ремонтно-восстанови-

тельных мероприятий включены трещины вне зависимости от влажности и ширины раскрытия.

Восстановление водонепроницаемости холостых водоводов Иркутской ГЭС выполнялось в соответствии с принципом 1 (защита от проникания) – методом 1.5 (заполнение трещин), в два этапа с использованием материалов на основе полимеров группы КГ и АГ. Основные этапы производства ремонтно-восстановительных работ приведены на рис. 4–6.

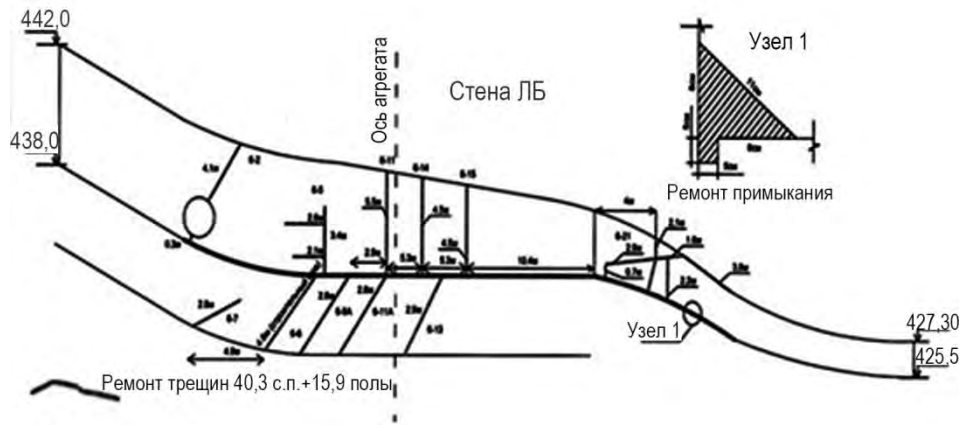


Рис. 3. Схема расположения трещин на примере холостого водосброса № 6



Рис. 4. Фрагмент восстанавливаемого участка холостого водосброса на этапе устройства штрабы



Рис. 5. Фрагмент восстанавливаемого участка холостого водосброса на этапе зачеканки штрабы и установки инъекционных пакеров

Рис. 6. Фрагмент восстанавливаемого участка холостого водосброса после выполнения ремонтно-восстановительных работ

Однако в процессе последующей эксплуатации выявлено проявление filtrаций на других участках, в том числе в помещениях, примыкающих к холостым водосбросам. В связи с чем определена необходимость в разработке альтернативных технических решений.

Заключение

1. Обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации ГТС неразрывно связано с обеспечением водонепроницаемости конструкций. На Иркутской ГЭС к одним из наиболее подверженных проявлению filtrаций относятся конструкции холостых водоводов.

2. Для обеспечения водонепроницаемости конструкции холостых водоводов Иркутской ГЭС выполнены ремонтно-восстановительные мероприятия методом двухэтапного инъектирования (принцип 1, метод 1.5 ГОСТ 32016–2012).

3. Мониторинг состояния конструкций после проведения ремонтно-восстановительных работ показал, что выполнение работ по инъектированию не в полной мере устранило проявления filtrаций, в связи с чем определена целесообразность разработки альтернативных технических решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Охапкин Г.В.** Обеспечение сохранности и восстановление объемной структуры бетона с учетом оптимизации затрат на эксплуатацию в течение жизненного цикла гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2022. № 6. С. 34-39. EDN: SMEWVR.
2. **Охапкин Г.В.** Подходы к цифровой трансформации выбора технических решений по восстановлению объёмной структуры бетона гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2023. № 4. С. 13-18.
3. **СП 41.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 (с Изменением N 1). М., 2012.
4. **СП 28.13330.2012.** Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями №1, 2). М., 2012.
5. **Джирма С.А.** Трещины в конструкциях из бетона и железобетона. Технология выполнения работ по устранению трещин // Наукові записки. 2010. Вып. 10, часть III. С. 195-200.
6. **Шилин А.А.** Ремонт железобетонных конструкций: М.: Издательство «Горная книга», 2010.
7. **Бибина О.Е., Охапкин Г.В.** О некоторых подходах к ремонту трещин в бетоне гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2023. № 6. С. 18-24.
8. **Бибина О.Е., Охапкин Г.В.** Анализ нормативной документации по вопросам ремонта трещин в бетонных конструкциях ГТС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 306. С. 32-40.
9. **ГОСТ 32016–2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013.
10. **ГОСТ 32017–2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. М.: Стандартинформ, 2013.
11. **ГОСТ 33762–2016.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к инъекционно–уплотняющим составам и уплотнениям трещин, полостей и расщелин. М.: Стандартинформ, 2017.
12. **DIN EN 1504–9:2008.** General principles for the use of products and systems. German version EN 1504–9:2008. 2008.
13. **DIN EN 1504–2:2005.** Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Surface protection systems for concrete. German version EN 1504–2:2005. 2005.
14. **BS EN 1504-5:2013.** Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Concrete injection. 30 Apr 2013.
15. **СТБ EN–1504–9–2019.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 9. Общие правила по применению материалов и систем. Минск: Госстандарт, 2020.
16. **СТБ EN–1504–2–2009.** Изделия и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций, определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 2. Системы защитных покрытий для бетона. Минск: Госстандарт, 2009.
17. **СТБ EN–1504-5-2019.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 5. Инъекционирование бетона. РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», 2019.

REFERENCES

1. Okhapkin G.V. Ensuring the safety and restoration of the volumetric structure of concrete taking into account the optimization of operating costs during the life cycle of hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2022; (6):34-39. EDN: CMEWVR. (In Russ.).
2. Okhapkin G.V. Approaches to digital transformation of the choice of technical solutions for restoring the volumetric structure of concrete of hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2023; (4):13-18. (In Russ.).
3. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures. Updated edition of SNiP 2.06.08-87 (with Amendment No. 1). M., 2012.
4. SP 28.13330.2012. Protection of building structures from corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11-85 (with Amendments No. 1, 2). M., 2012. (In Russ.).
5. Jirma S.A. Cracks in structures made of concrete and reinforced concrete. Technology for performing work to eliminate cracks. Science notes. 2010. Vol. 10, part III. P. 195-200. (In Russ.).
6. Shilin A.A. Repair of reinforced concrete structures: M.: Publishing House "Gornaya Kniga", 2010. (In Russ.).
7. Bibina O.E., Okhapkin G.V. On some approaches to repairing cracks in concrete of hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2023; (6):18-24. (In Russ.).
8. Bibina O.E., Okhapkin G.V. Analysis of regulatory documentation on the issues of repairing cracks in concrete structures of hydraulic structures. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;306:32-40. (In Russ.).
9. GOST 32016–2012. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. General requirements. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
10. GOST 32017–2012. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements and systems for the protection and repair of concrete structures. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
11. GOST 33762–2016. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements for injection-sealing compositions and sealing of cracks, cavities and crevices. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.).
12. DIN EN 1504–9:2008. General principles for the use of products and systems. German version EN 1504–9:2008. 2008.
13. DIN EN 1504–2:2005. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Surface protection systems for concrete. German version EN 1504–2:2005. 2005.
14. BS EN 1504-5:2013. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Concrete injection. 30 Apr 2013.
15. STB EN–1504–9–2019. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and conformity assessment. Part 9. General rules for the use of materials and systems. Minsk: Gosstandart, 2020. (In Russ.).
16. STB EN–1504–2–2009. Products and systems for the protection and repair of concrete structures, definitions, requirements, quality control and conformity assessment. Part 2. Protective coating systems for concrete. Minsk: Gosstandart, 2009. (In Russ.).
17. STB EN–1504-5-2019. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and conformity assessment. Part 5. Concrete injection. RUE «STROYTEKHNORM», 2019. (In Russ.).

Информация об авторах

К.Н. Барило – начальник службы зданий и сооружений;
М.С. Терехова – ведущий инженер – руководитель группы наблюдения за ГТС ИГЭС;
О.А. Борус – ведущий инженер службы зданий и сооружений;
Г.В. Охупкин – канд. техн. наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

K.N. Barilo – Head of Buildings and Facilities Service;
M.S. Terekhova – Leading Engineer – Head of the IHPP GTS Monitoring Group;
O.A. Borus – Leading Engineer of Buildings and Structures Service;
G.V. Okhapkin – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 10.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 626/627.03.001.42

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

Юлия Олеговна Белослудцева¹, Олег Николаевич Котлов²

^{1,2} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия

¹ belosludtsevayuo@vniig.ru

² kotlovon@vniig.ru

Аннотация. Освещены основные причины, приводящие к аварийным ситуациям на ГТС, рассмотрены различные расчетные методики, позволяющие прогнозировать тепловое состояние грунтов, показана актуальность проведения таких расчетов. На примерах дамбы хвостохранилища и плотины, образующей водохранилище питьевого назначения, рассмотрены инженерно-геокриологические условия участков размещения, проведено обобщение исходных данных и схематизация инженерно-геокриологических условий, на базе которых построены расчетные теплофизические модели с учетом и без учета конвективного теплообмена в двухмерной постановке. По результатам моделирования дана оценка влияния конвективного теплообмена на температурный режим грунтов дамбы и основания.

Ключевые слова: *грунтовые сооружения, численное моделирование, хвостохранилище, водохранилище, фильтрация, температурный режим, криолитозона, прогноз*

Для цитирования: Белослудцева Ю.О., Котлов О.Н. Прогноз температурного режима гидротехнических сооружений с учетом фильтрационного потока // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 65–74.

Original article

TEMPERATURE REGIME FORECAST OF HYDRAULIC STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT FILTRATION FLOW

Yuliya O. Belosludtseva¹, Oleg N. Kotlov²

^{1,2} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ belosludtsevayuo@vniig.ru

² kotlovon@vniig.ru

Abstract. The article reports on the main reasons leading to emergency situations in hydraulic structures, examines various calculation methods that allow predicting the thermal state of soils, and reveals the relevance of such calculations. Using the examples of a tailings dam and a drinking reservoir dam, the engineering and geocryological conditions of the placement sites were considered, the initial data was generalized and the engineering and geocryological conditions were schematized, on the basis of which calculated thermophysical models were built with and without taking into account convective heat transfer in a two-dimensional setting. Based on the modeling results, the influence of convective heat exchange on the temperature regime of the dam soil and foundation was assessed.

Key words: *ground constructions, numerical modeling, tailing, storage reservoir, seepage, temperature regime, cryolithozone, forecast*

For citation: Belosludtseva Yu.O., Kotlov O.N. Temperature regime forecast of hydraulic structures taking into account filtration flow. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:65-74. (In Russ.).

Геокриологический прогноз и, в частности прогноз температурного режима криолитозоны, является важным направлением в мерзлотоведении. Он позволяет на качественном и количественном уровнях оценить изменение геокриологической среды при тепловых воздействиях сооружений, смене климата и других изменениях природных факторов (например, изменение рельефа, растительного покрова и др.).

Согласно нормативной документации [3–5] прогноз изменения геокриологических условий необходимо проводить при проектировании зданий и сооружений, что позволит принять наиболее верные проектные решения для обеспечения безопасности сооружения при эксплуатации. Не исключением являются гидротехнические сооружения, которые довольно широко используются для образования водохранилищ питьевого назначения, а также на промышленных предприятиях в зоне распространения мерзлых пород. Водоохранилища и хвостоохранилища являются теплоаккумулирующими объектами, а их строительство и эксплуатация предполагают изменение естественного температурного и фильтрационного режимов, в связи с чем при проектировании таких сооружений необходимо проведение температурных прогнозов. Следует отметить, что при составлении прогнозов температурного режима гидротехнических сооружений немаловажным фактором является учет фильтрационного потока, образующегося в основании и/или в теле гидротехнических сооружений (ГТС). Фильтрационный поток способствует наиболее быстрому оттаиванию мерзлых грунтов и изменению их свойств.

По аналитическим сводкам с 1960 по 2020 гг. отмечается, что 90 % аварий на объектах, имеющих в составе гидротехнические сооружения, связаны с разрушением дамб и плотин [10]. К аварийности плотин и дамб, расположенных в криолитозоне, ведут следующие факторы:

неучет специфических природных условий (морозобойное трещинообразование, повторно-жильные и пластовые льды, пучиноопасные грунты и др.);

нарушения, вносимые хвостохранилищем в сложившиеся температурно-влажностные условия основания, что приводит к нарушению фильтрационной прочности и устойчивости системы *сооружение – основание*;

выход из строя системы сезонно-охлаждающих устройств (СОУ);

деградация противofильтрационного элемента (ПФЭ);

развитие фильтрационных процессов как следствие вышеприведенных факторов.

Вопросами учета фильтрации для расчетов температурного режима занимались специалисты из ВНИИГ, ННГАСУ, НИИ ВОДГЕО. Для расчетов использовались как численные, так и аналитические формулы, составлены методики расчетов под конкретные задачи. Некоторые из расчетных задач приведены ниже:

1. Расчет температурного режима фильтрующей земляной плотины [8].
2. Расчет температурного режима талика в основании мерзлой грунтовой плотины [8].
3. Расчет температурного режима талика в борту водохранилища [8].
4. Численно-графический метод расчета температурного режима примыкания фильтрующей земляной плотины к мерзлому борту речной долины [6].

5. Расчет установившегося температурного режима противофильтрационного устройства каменно-земляных и каменнонабросных плотин [6].

6. Расчет замораживания грунта в фильтрующем основании плотины воздушными колонками [6].

Авторами отмечено, что конвективная составляющая играет свою роль в формировании температурного режима плотин, их оснований и примыканий. Например, согласно данным [8], при расчетах для Тельмамской ГЭС, величина оттаивания за 5-летний период без учета фильтрации составила 6 м под верховым откосом, в случае же учета фильтрации в основании плотины под верховой и частично под низовой призмой образуется талая область глубиной около 45 м; в расчетах по Амгуэмской ГЭС показано, что протаивание мерзлоты в условиях кондуктивной теплопередачи происходит за 135 лет, в случае учета фильтрации время оттаивания мерзлоты сокращается до 95 лет.

В классической постановке задачи о теплопроводности, как правило, учитывается лишь передача тепла кондуктивным способом, это описывается законом Фурье (1), в свою очередь конвективная теплопередача (иначе массоперенос) позволяет учесть также тепло, переносимое за счет образования фильтрационного потока в грунтовом массиве. Учет конвективной составляющей производится согласно уравнению Фурье-Кирхгофа (2).

$$\gamma c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \gamma_{\text{л}} n L \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (1)$$

где γ – плотность грунта; c – теплоемкость грунта; n – пористость грунта; $\gamma_{\text{л}}$ – плотность льда; L – удельное тепло таяния (замерзания) льда (воды); W – относительная льдистость грунта.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} - \frac{c_{\text{т}} \gamma_{\text{т}}}{c_{\text{в}} \gamma_{\text{в}}} \left(V_x \frac{\partial t}{\partial x} + V_y \frac{\partial t}{\partial y} + V_z \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где $t(x, y, z, t)$ – температура грунта; t – время; a_x, a_y, a_z – коэффициенты температуропроводности грунта, насыщенного водой по осям x, y, z ; V_x, V_y, V_z – компоненты скорости фильтрации по осям x, y, z ; $c_{\text{в}}, c_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость воды и грунта; $\gamma_{\text{в}}, \gamma_{\text{т}}$ – плотность воды и грунта.

На данный момент учет фильтрации при расчетах температурного режима, как правило, оценивается численными методами и решается в различных программных комплексах, таких как Frost 3D, Plaxis, Abaqus и др. В рамках данного исследования конвективная составляющая учитывалась на основании закона Дарси, из которого рассчитываются скорости фильтрационного потока, которые затем подставляются в уравнение теплопроводности, учитывающем конвективный теплообмен,

$$u = -K \nabla H, \quad (3)$$

где H – гидравлический напор, м; K – коэффициент фильтрации, м/с; u – вектор скорости фильтрации воды.

$$Q = C_w u \Delta T, \quad (4)$$

где T – температура, °С; C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³°С); u – вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с.

Одним из объектов исследований выбрана дамба хвостохранилища, расположенная в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Климат района резко континентальный, крайне суровый. Характеризуется частой и резкой сменой погоды. Среднегодовая температура воздуха минус 9,3 °С. Однако, несмотря на суровый климат, район вносит свое техногенное влияние на криолитозону и меняет ее естественный режим, так как является крупным промышленным центром.

Исследуемая дамба является насыпной, сложена крупнообломочным материалом, в качестве противофильтрационных элементов имеет суглинистое ядро и геомембрану, мерзлая, отнесена ко II классу. В основании дамбы выделены аллювиально-делювиальные песчано-глинистые и крупнообломочные разности, а также элювий коренных пород и коренные полускарпальные породы.

Для построения теплофизической расчетной модели были использованы следующие данные:

- климатические характеристики (табл. 1);
- инженерно-геологическое строение (рис.1);
- физико-механические, фильтрационные, теплофизические свойства грунтов (табл. 2);
- данные температурного и фильтрационного мониторинга;
- конструктивные особенности сооружения.

В рамках температурного моделирования проводилась оценка изменения температурного режима с учетом и без учета фильтрационного потока. Моделирование проведено в двумерной постановке, на прямоугольной расчетной сетке с размером ячеек 0,2–2 м. Калибровка моделей проведена по данным натуральных температурных наблюдений на объекте. Пример калибровки приведен на рис. 2.

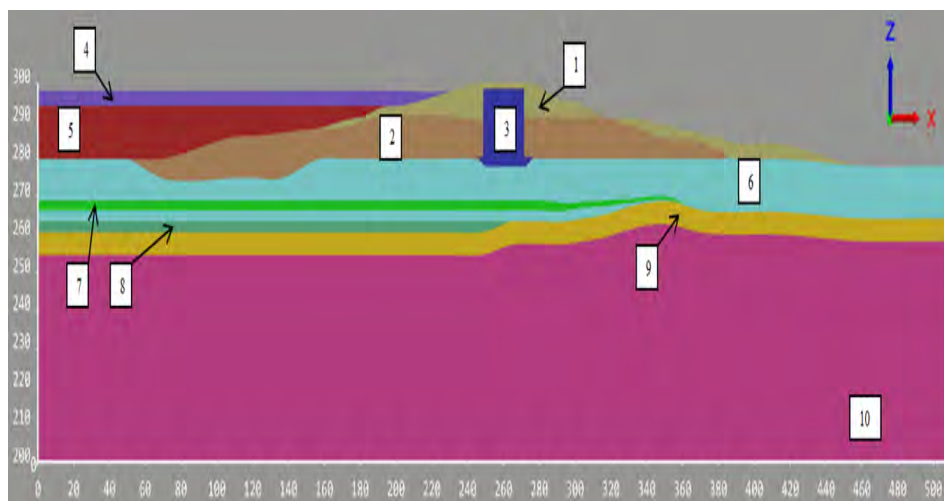


Рис. 1. Схематизация геологических условий дамбы и ее основания в расчетной модели

Таблица 1

**Климатические данные, используемые в расчетах
(дамба хвостохранилища)**

Характеристика	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °С	-26,5	-25,5	-20,4	-14,5	-4,1	+7,1	+14,1	+11,7	+3,7	-8,8	-20,5	-25,0
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м ² ·К)	28,98	27,35	27,76	28,17	26,69	25,02	23,76	22,50	23,34	26,69	26,94	28,98
Скорость ветра, м/с	5,6	5,2	5,3	5,4	4,9	4,5	4,2	3,9	4,1	4,9	5,1	5,6
Высота снежного покрова, м	0,50	0,60	0,65	0,30	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,29	0,40
Плотность снега, кг/м ³	300	300	360	250	170	0	0	0	0	170	200	250

Таблица 2

**Физические и теплофизические свойства грунтов, используемые в расчетах
(дамба хвостохранилища)**

Наименование ИГЭ	Теплопроводность грунта, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость грунта, МДж/(м ³ ·К)		Суммарная влажность, доли ед.	Плотность, кг/м ³	Температура начала заморозания, °С	Коэффициент фильтрации, м/сут
	талого	мёрзлого	талого	мёрзлого				
Дамба (яруса наращивания)	1,82	2,09	2,33	1,94	0,09	2100	-0,10	1,0
Дамба (существующая)	0,77	0,81	2,15	1,41	0,08	1230	-0,10	1,0
ПФЭ	1,40	1,45	2,94	2,41	0,22	1550	-0,20	0,0001
Хвосты	1,39	1,44	3,02	2,47	0,16	2020	-0,20	0,01
Аллювий суглинистый	1,56	1,40	2,92	2,33	0,21	1610	-0,43	0,01
Аллювий песчаный	1,92	2,27	2,22	1,81	0,17	1630	-0,20	1,0
Аллювий галечниковый	1,28	1,35	2,55	2,80	0,09	2270	-0,20	5,0
Элювий	1,40	1,34	2,44	2,07	0,10	1890	-0,20	2,0
Базальты	2,50	2,50	2,27	2,27	0,01	2700	0,00	0,1

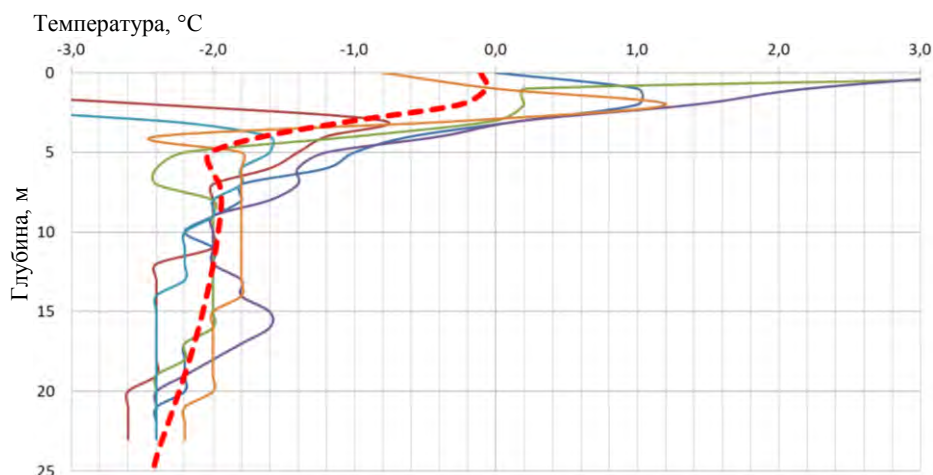


Рис. 2. Пример калибровки расчетной модели:
 — сентябрь 2015 г.; — декабрь 2015 г.; — июнь 2016 г.;
 — сентябрь 2016 г.; — декабрь 2016 г.; — сентябрь 2017 г.; - - - расчет

В качестве граничных использованы следующие условия:
 нижняя граница – принята как граница I рода, с температурой мерзлых пород равной минус 4 °С;

верхняя граница № 1 – принята как граница III рода, теплообмен с атмосферой *сооружение – воздух* распространяется на область гребня дамбы, низовой откос и область за низовым откосом;

верхняя граница № 2 – принята как граница I рода, с температурой сбрасываемой пульпы, равной 15 °С. Также на данной границе задается величина напора в прудке хвостохранилища, равная УВБ;

левая и правая (боковые) границы – приняты как границы II рода с нулевым теплотокотом ($Q = 0 \text{ Вт/м}^2$). На правой границе принята фильтрационная граница, величина которой получена на основании расчетов фильтрационного режима для данного створа.

Схематизация граничных условий приведена на рис. 3.

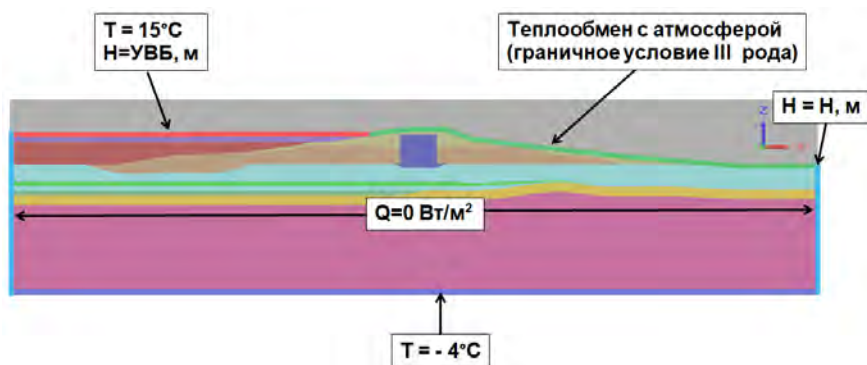


Рис. 3. Схематизация граничных условий расчетной модели

По результатам проведенных расчетов сделан вывод, что скорость растепления мерзлых грунтов возрастает на 10–40 % при наличии фильтрационного потока в теле плотины. Наибольшее изменение положения

границы мерзлых и талых грунтов отмечается в горизонтальном направлении. Растепление грунтов наблюдается в основном в теле плотины.

Другим примером может служить земляная плотина в Чукотском автономном округе, образующая водохранилище питьевого назначения. Плотина была запроектирована по I типу – с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии на протяжении всего периода эксплуатации. Мерзлое состояние планировалось обеспечить за счет воздушной мерзлотной завесы. За период эксплуатации плотина претерпела ряд аварий, ремонтов и реконструкций и впоследствии отказ от мерзлотной завесы и переход ко II принципу использования основания, который предполагает оттаивание грунтов основания. Данное решение повлекло за собой образование талика в теле плотины и частично в основании и формирование фильтрационного потока.

В рамках теплофизического моделирования для данной плотины была построена численная модель, имитирующая фильтрационно-температурный режим. Расчеты проводились по аналогичной методике, описанной выше. Для построения теплофизической модели были использованы данные о климате местности (табл. 3), физические, теплофизические, фильтрационные свойства грунтов (табл. 4). Схематизация расчетной области и граничные условия отображены на рис. 4.

При моделировании были рассмотрены расчетные случаи, предполагающие как наличие, так и отсутствие фильтрационного потока, величина которого регулировалась за счет подбора коэффициента фильтрации грунтов основания.

Таблица 3

Климатические данные, используемые в расчетах (земляная плотина)

Характеристика	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °С	-26,2	-28,0	-24,1	-16,3	-3,2	+5,4	+8,2	+6,8	+1,8	-8,0	-18,9	-25,0
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м ² ·К)	18,31	19,15	17,89	17,89	22,92	25,02	23,76	24,18	25,43	23,76	20,83	19,99
Скорость ветра, м/с	2,9	3,1	2,8	2,8	4,0	4,5	4,2	4,3	4,6	4,2	3,5	3,3
Высота снежного покрова, м	1,0	3,0	3,0	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,5
Плотность снега, кг/м ³	300	300	300	300	300	0,0	0,0	0,0	0,0	300	300	300

В результате моделирования выявлено существенное влияние фильтрационных процессов на температурный режим тела и основания плотины. По прогнозным расчетам отмечается рост скоростей деградации мерзлых грунтов, которые определяются коэффициентом фильтрации оттаявшего грунта.

Таблица 4

**Физические и теплофизические свойства грунтов, используемые в расчетах
(земляная плотина)**

Наименование ИГЭ	Теплопроводность грунта, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость грунта, МДж/(м³·К)		Суммарная влажность, д.е.	Плотность, кг/м³	Температура начала замерзания, °С	Коэффициент фильтрации, м/сут
	талого	мёрзлого	талого	мёрзлого				
Полимерная мембрана	1,69	2,00	2,50	2,08	0,13	1790	0,00	0,4
Плотина (1)	1,51	1,72	2,59	2,16	0,17	1713	-0,16	0,4
Плотина (2)	1,97	2,30	3,01	2,26	0,24	1620	-0,16	2,5
Делювий супесчаный	1,63	1,79	2,82	2,12	0,27	1525	-0,50	1,0
Аллювий	1,63	1,82	1,87	1,60	0,07	1810	-0,50	3,0
Делювий щебенистый	1,74	2,11	2,77	2,11	0,24	1490	-0,50	1,0
Сланец	1,30	1,30	2,10	2,10	0,02	2410	0,00	0,1-5,0

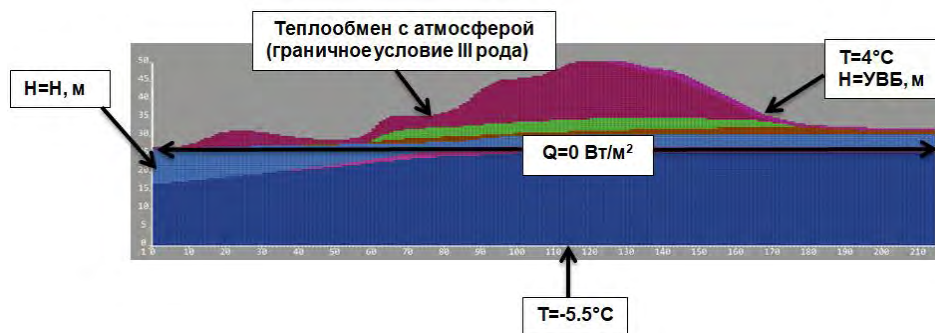


Рис. 4. Схематизация граничных условий расчетной модели

Заключение

1. Достоверность прогноза температурного режима гидротехнических сооружений зависит от учета ряда факторов: специфики геологического строения основания (наличие пластовых льдов, пучинистые грунты и др.), режима эксплуатации сооружения, климатических условий, гидрогео-

логических условий, свойств мерзлых и талых грунтов и др. Одним из важных факторов является тепловое влияние водоема и теплоперенос потоком подземных вод в теле и основании ГТС.

2. При наличии в теле/основании ГТС фильтрационного потока важно проводить оценку фильтрационно-температурного режима. Влияние фильтрационного потока оценивается за счет конвективной составляющей теплового потока с учетом коэффициентов фильтрации водовмещающих грунтов, скоростей фильтрации и температуры воды.

3. Теплоперенос за счет конвекции увеличивает скорости деградации мерзлых грунтов и сокращает время их оттаивания. Согласно оценкам данного исследования, рост скоростей растепления составляет 10–40 %. Согласно литературным данным срок оттаивания мерзлой толщи сокращается на 30 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ 25100-2020.** Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2020.
2. **СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2020.
3. **СП 47.13330.2016.** Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП СНиП 11-02-96. М.: Стандартиформ, 2017.
4. **СП 446.1325800.2019.** Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартиформ, 2019.
5. **СП 493.1325800.2020.** Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М., 2020.
6. **Рекомендации** по расчетам температурного режима плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительно-климатической зоне. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1985.
7. **Инженерное мерзлотоведение** в гидротехнике. Словарь-справочник / Под ред. А.А. Кагана, Н.Ф. Кривоноговой. Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2001. 254 с.
8. **Соболь С.В.** Водохранилища в области вечной мерзлоты: монография. ННГАСУ. 2007. 432 с.
9. **Чжан Р.В.** Грунтовые плотины в криолитозоне России / Р.В. Чжан, С.А. Великин, Г.И. Кузнецов, Н.В. Крук; отв. ред. Д.М. Шестернев; Новосибирск: СО РАН, Академическое изд-во «Гео», 2019.
10. **Управление** хвостохранилищами и отходами. Хвосты опасного хранения. Хронология крупных обрушений дамбы хвостохранилища. (с. 1960). <https://kursdela.biz>

REFERENCES

1. 1. GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russ.).
2. SP 25.13330.2020. Bases and foundations on permafrost soils. M., 2020. (In Russ.).
3. SP 47.13330.2016. Engineering surveys for construction. Main provisions. Updated version of SNiP SNiP 11-02-96. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.).
4. SP 446.1325800.2019. Geotechnical survey for construction. General Rules of Work Execution. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).

5. SP 493.1325800.2020. Engineering surveys for construction of permafrost soils in permafrost zones. Moscow, 2020. (In Russ.).
6. Recommendations for calculating the temperature regime of dams made of soil materials erected in the northern construction and climatic zone. Vedenev VNIIG, 1985. (In Russ.).
7. Engineering permafrost in hydraulic engineering. Dictionary-reference book. Ed. A.A. Kagan, N.F. Krivonogovoy. Publishing House of OJSC «Vedenev VNIIG». 2001. 254 p. (In Russ.).
8. Sobol S.V. Reservoirs in the field of permafrost: monograph. NNASU. 2007. 432 s. (In Russ.).
9. Zhang R.V. Soil dams in the permafrost zone of Russia. R.V. Zhang, S.A. Velikin, G.I. Kuznetsov, N.V. Crook; responsible editor D.M. Shesternev; Novosibirsk: SB RAS, Academic Publishing House «Geo», 2019. (In Russ.).
10. Management of tailings and waste. Tailings are dangerously stored. Chronology of major tailings dam failures. (с. 1960).

Информация об авторах

О.Н. Котлов – канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения»;

Ю.О. Белослудцева – младший научный сотрудник.

Information about the authors

O.N. Kotlov – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of Department «Foundations, earth and underground structure»;

Y.O. Belosludtseva – Associate Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023; одобрена после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 15.11.2023; approved after reviewing 22.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.824.2/3

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН С ПРОЯВЛЕНИЯМИ НЕПРОЕКТНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА

Никита Андреевич Абрамов

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия
Abramovna@vniig.ru

Аннотация. Представлены результаты оценки состояния грунтовых плотин Палашкино Рузского гидроузла и Васильевская Озернинского гидроузла АО «Мосводоканал», Нижегородской ГЭС, Павловского гидроузла, оценки степени потенциальной опасности непроектного фильтрационного режима для них, выполненной с использованием разработанной автором «Методики оценки фильтрационной прочности грунтовых плотин» с выдачей рекомендаций по их дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: *грунтовая плотина, методика, суффозия, анализ, непроектный фильтрационный режим*

Для цитирования: Абрамов Н.А. Оценка состояния грунтовых плотин с проявлениями непроектного фильтрационного режима // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 75–86.

Original article

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF GROUND DAMS WITH MANIFESTATIONS OF NON-DESIGN FILTRATION MODE

Nikita A. Abramov

JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia
Abramovna@vniig.ru

Abstract. The article presents the results of the assessment of the condition of the Palashkino ground dams of the Ruzskiy hydrounit and Vasilievskaya Ozerninskiy hydrounit of JSC «Mosvodokanal», Nizhny Novgorod HPP, Pavlovskiy hydrounit, assessment of the degree of potential danger of the non-design filtration regime for them, performed with the use of the «Methodology for assessment of the filtration strength of ground dams» developed by the author, with the issuance of recommendations for their further operation.

Keywords: *earth dam, methodology, suffosion, analysis, non-design filtration regime*

For citation: Abramov N.A. Assessment of the condition of ground dams with manifestations of non-design filtration mode. *Proceedings of the VNIIG. 2024;311:75-86.* (In Russ.).

Любое отступление от проекта в дальнейшем влияет на такие параметры фильтрационного потока, как положение депрессионной поверхности, фильтрационный расход, градиенты напора в теле и основании плотин. Игнорирование возможности возникновения непроектных проявлений

фильтрационного режима при строительстве и эксплуатации плотин может привести к аварии на сооружении. В исследованиях различных авторов [1] представлены случаи сегрегации разнородного грунта при отсыпке плотин, что в дальнейшем привело к появлению фильтрационных выходов на низовом откосе и развитию деструктивных процессов, связанных с суффозией грунта тела плотины.

В статье проанализированы публикации российских и зарубежных авторов, в которых затрагиваются темы непроектного фильтрационного режима в грунтах тела и/или основания грунтовых плотин, приводятся сведения об исследовании фильтрационного режима на конкретных сооружениях. Для проведения оценки состояния грунтовых плотин с проявлениями непроектного фильтрационного режима и оценке степени потенциальной опасности для сооружения автором была разработана методика [2], включающая:

1. Оценку состояния сооружений – соответствие проекту, наличие или отсутствие тенденции изменения данных натурных наблюдений за уровнями воды в пьезометрах, фильтрационными расходами, осадкой сооружения, наличие визуальных признаков изменения состояния.

2. Оценку наличия или отсутствия признаков развития суффозии в теле и основании грунтовых плотин согласно перечню [3].

3. При наличии выходов воды на низовом откосе плотины определение генезиса профильтровавшейся воды:

выявление наличия связи расхода профильтровавшейся воды с климатическими факторами – атмосферными осадками, температурой воздуха;

химический анализ профильтровавшейся воды, определение генезиса фильтрационной воды с применением классификации О.А. Алекина; термометрические исследования по температуре воды в пьезометрах, дренаже, водовыпусках, в верхнем и нижнем бьефах водохранилища.

4. Оценку влияния деструктивных процессов, происходящих в грунтах, на эксплуатацию плотины по степени опасности для сооружения по предлагаемой автором методике [2].

Для оценки состояния конкретного сооружения с помощью разработанной методики автором были отобраны грунтовые плотины [4–8]:

Палашкино Рузского гидроузла и Васильевская Озернинского гидроузла АО «Мосводоканал», где на протяжении длительного времени наблюдались выходы фильтрационной воды на низовом откосе, мокрые пятна, не исчезающие даже в засушливый период года;

грунтовая плотина № 1–2 Нижегородской ГЭС, на отдельных участках которой в основании имеются слои маловодопроницаемых грунтов, что создает повышенный градиент напора на входе в трубчатый дренаж;

русовая грунтовая плотина Павловского гидроузла, на низовом откосе которой с возведения до 2018 г. имелся фильтрационный выход, расход воды которого не уменьшался.

Грунтовые плотины Палашкино Рузского гидроузла и Васильевская Озернинского гидроузла АО «Мосводоканал» [4]

Грунтовая плотина Палашкино Рузского гидроузла длиной 519,7 м и максимальной высотой в русловой части 23,5 м возведена в 1965 г. Шири-

на плотины по гребню 13 м. На гребне расположена дорога с асфальтированным покрытием. Максимальная ширина плотины по основанию 143,5 м.

Основанием плотины служат аллювиальные, делювиальные и на отдельных участках внутриморенные отложения, представленные в основном суглинками, супесями, песками и реже гравийно-галечниковым материалом.

Грунтовая плотина Васильевская длиной 990 м и максимальной высотой 24 м в русловой части возведена в 1965 г. Ширина плотины по гребню 11,5 м, максимальная ширина по основанию 150 м.

На русловом и левобережном участках из укатанного суглинка возведены верховая призма и центральная часть плотины. В низовой части призмы выполнена мощная песчаная присыпка с отметкой гребня 169,0 м. Эта присыпка опирается на дренажную призму протяженностью 60 м, выполненную в виде каменного банкета с обратным фильтром. На пойменных участках плотина возведена из укатанного суглинка до отметки 184,9 м с устройством в теле низового клина внутренней дренажной призмы.

Оценка технического состояния плотин проводилась в соответствии с разработанной автором методикой. Выявлено следующее:

на низовом откосе плотин Палашкино и Васильевская в 2017 г. обнаружены выходы воды и мокрые пятна, происхождение которых, а также степень опасности от этих выходов для сооружения, требовалось установить;

почти все пьезометры, установленные на гребне плотин Васильевской и Палашкино, практически весь период наблюдения с 2012–2018 гг. показывали уровень воды, превышающий уровень верхнего бьефа водохранилища. При этом уровень воды в таких пьезометрах при проверке чувствительности наливом быстро восстанавливается.

Для выяснения причин были выполнены исследования, включающие:

анализ связи уровней воды в пьезометрах на гребне плотин с климатическими факторами;

гидрохимические исследования для определения генезиса фильтрационного выхода на откосе и воды в пьезометрах на гребне плотины Палашкино;

определение фильтрационных характеристик грунтов тела и основания плотин.

По результатам анализа прямая связь уровней воды в пьезометрах и климатических факторов выявлена не была (рис. 1, 2). При этом большая часть обследованных пьезометров (П-9в, П-176, П-20) на плотине Палашкино и на плотине Васильевской (П-13а, П-166) показала при испытаниях чувствительности приборов хорошие результаты, позволяющие предположить, что они работоспособны.

Анализ химического состава воды был выполнен для проб, взятых из пьезометров, фильтры которых установлены в теле и основании плотины, из дренажного колодца, из скважины на берме в створе ПК 3+92 и в приплотинной зоне, в поверхностном слое Рузского водохранилища.

Для определения генезиса воды использована классификация О.А. Алекина, сочетающая принцип деления химического состава воды по преобладающим ионам с делением по количественному соотношению между ними.

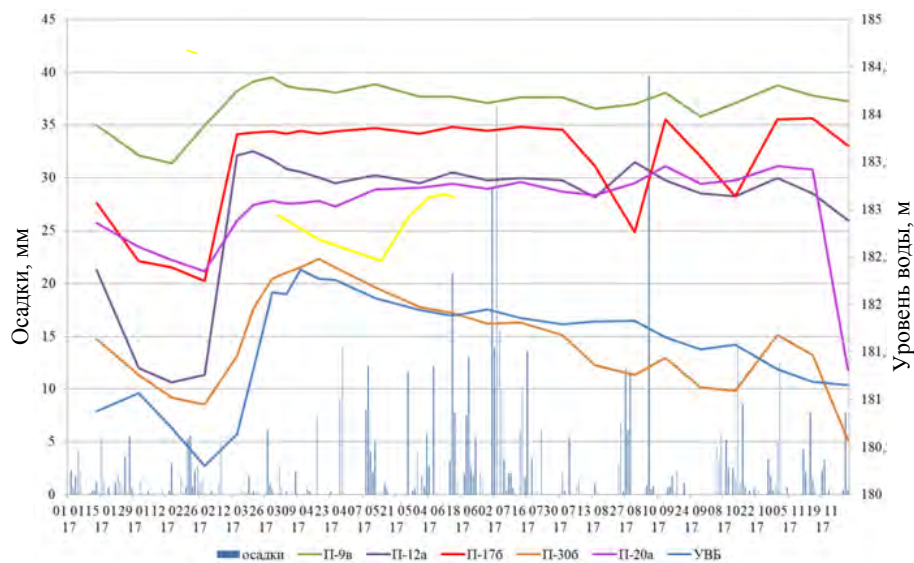


Рис. 1. Динамика уровней воды в пьезометрах на гребне плотины Палашкино, УВБ и разности между выпавшими атмосферными осадками и испарением за 2017 г.



Рис. 2. Динамика уровней воды в пьезометрах на гребне плотины Васильевской, УВБ и температуры воздуха за 2017 г.

Химический анализ состава воды показал, что вода из водохранилища относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе III типа.

Анализ состава химических показателей проб воды тела и основания плотины, а также дренажных вод показал, что все эти воды относятся к хлоридному классу, кальциевой группе III типа, что характерно для подземных вод закрытых структур.

В пьезометрах, установленных на гребне плотины, уровень воды фиксируется постоянно выше, чем в водохранилище, вода из них относится к хлоридному классу, натриевой группе, что говорит об ином её происхождении, не имеющем отношения к фильтрации воды из водохранилища через тело плотины. Такой состав воды получился благодаря смыву соли NaCl с дорожного полотна в зимний и весенний периоды и накоплению соли в дренажном слое. Уровни воды в этих пьезометрах не являются показателями положения депрессионной поверхности в теле плотины, а отражают положение достаточно мощного водоносного слоя дорожного дренажа, который имеет атмосферное происхождение, зимой частично промораживается, летом оттаивает.

Такие пьезометры были признаны неработоспособными. Было рекомендовано выполнить очистку пьезометров от застоявшейся воды, промывку пьезометров, изоляцию затрубья пьезометров от дренажной воды дорожного полотна (глиняный замок) до суглинка тела плотины.

Проведенные исследования фильтрационных свойств тела и основания плотин объясняют особенности работы сооружений. Профильтрованная через тело плотины Палашкино вода разгружается в дренаж плотины, затем по системе трубчатого дренажа отводится в нижний бьеф гидроузла. Трубчатый дренаж плотины Васильевской остается сухим, так как фильтрационный поток через тело плотины дренируется ее основанием, грунты которого имеют коэффициент фильтрации на порядок выше, чем у грунтов тела плотины.

По результатам обследований можно сделать вывод, что вероятность возникновения аварийной ситуации, связанной с проявлениями нештатного фильтрационного режима грунтов тела или основания плотин Палашкино и Васильевская, минимальна, так как намокание низового откоса не связано с положением депрессионной поверхности в теле плотины. Непроектная работа дренажа плотины Васильевская (отсутствие воды) объясняется разгрузкой профильтрованной воды через основание плотины, что обусловлено фильтрационными свойствами грунтов тела и основания плотины.

Проведенные работы показали, что плотины Палашкино и Васильевская находятся в нормальном эксплуатационном состоянии; даны рекомендации по улучшению контроля фильтрационного режима плотин и по проведению ремонтных мероприятий.

Грунтовая плотина № 1-2 Нижегородской ГЭС [5–7]

Пойменная земляная плотина № 1–2 является ГТС первого класса, однородная, намывная, возведена в 1961 г. способом гидромеханизации из мелкого песка на подготовленном основании.

Длина плотины 7575,0 м, ширина по гребню – 12,0 м, максимальная ширина по основанию – 115,0 м, максимальная высота – 15,5 м. Отметка гребня – 88,50 м. Заложение откосов: верховой откос – 1:3, низовой откос от подошвы до отметки 80,00 м – 1:4, а с отметки 80,0 м и выше – 1:2,5. Максимальный напор на плотину – 8,4 м. Превышение гребня плотины над НПУ – 4,5 м.

Грунты основания плотины № 1–2 – аллювиальные отложения первой надпойменной террасы мощностью от 12,00 до 26,00 м.

Анализ результатов натуральных наблюдений показал, что фактические условия фильтрации на плотине № 1–2 существенно отличаются от проектных предпосылок. После наполнения водохранилища на плотине № 1–2 сформировалось два обособленных, разных по направлению и параметрам потока. Потоки гидравлически связаны, и только на отдельных участках, где в основании оставлен суглинистый слой, они отделены друг от друга. Режим фильтрации на сооружении определяет, главным образом, поток в основании, оказывающий сильное дренирующее влияние на малодобитный поток в теле плотины [5].

По проекту Института Гидропроект [6] в 2015 г. была начата реконструкция дренажной системы, заключающаяся в подсыпке грунта на территории, прилегающей к плотине, и строительстве нового русла магистрального канала на 25 м ближе к плотине, в который должна была происходить разгрузка напорных вод основания, но работы были приостановлены. Для продолжения работ по реконструкции нужно было доказать эффективность предложенного решения. Для выполнения этой задачи в 2017 г. была выполнена оценка технического состояния плотины с использованием методики [2].

Визуальное обследование, проведенное в 2017 г., показало, что состояние верхового откоса и гребня плотины удовлетворительное: крепление железобетонных плит без заметных деформаций и раскрытия деформационных швов, на проезжей части гребня из двухслойного асфальтобетона деформации и трещины не зафиксированы. Выходы воды на нижней откос плотины и видимые деформации откоса отсутствуют, образование просадочных воронок над трубчатым дренажем с 2013 г. не отмечается.

В рамках работы по обследованию дренажа плотины № 1–2, выполненной в 2017 г., установлено, что на участке от ПК0 до ПК8 градиенты напора на входе в дренаж выше критического для грунтов основания плотины.

После строительства небольшого участка нового магистрального канала в 2015 г. зафиксировано снижение градиентов напора в 1,5–2 раза по пьезометрам, находящимся в зоне дренирования фильтрационного потока основания участка нового канала.

Данные наблюдений за количеством наносов, образовавшихся в колодцах трубчатого дренажа, и отложений в трубах (рис. 3–4) показали, что основное место локализации наносов – участок от ПК0 до ПК 8+00. С целью определения наличия суффозии из тела или основания плотины был проведен гранулометрический анализ отложений. Для установления происхождения отложений в колодцах трубчатого дренажа были отобраны пробы грунтов из смотровых колодцев, где количество отложений было зафиксировано наибольшее, и из тела и основания плотины в створах, находящихся в непосредственной близости к колодцам. Результаты лабораторных исследований представлены на рис. 5 и 6. Пробы из дренажа отбирались на ПК 2+00 (проба 6), ПК 8+00 (проба 7), ПК 7+00 (проба 8), ПК 3+50 (проба 9).

По данным гранулометрического анализа, отложения в колодцах ДК-5 и ДК-15 (ПК 2+00 и ПК 7+00) близки по составу к грунтам тела плотины и имеют происхождение из тела плотины, в большей степени это

проявляется на ПК 2+00. В журнале наблюдений отмечено, что просыпание части грунта в колодцы произошло при реконструкции.

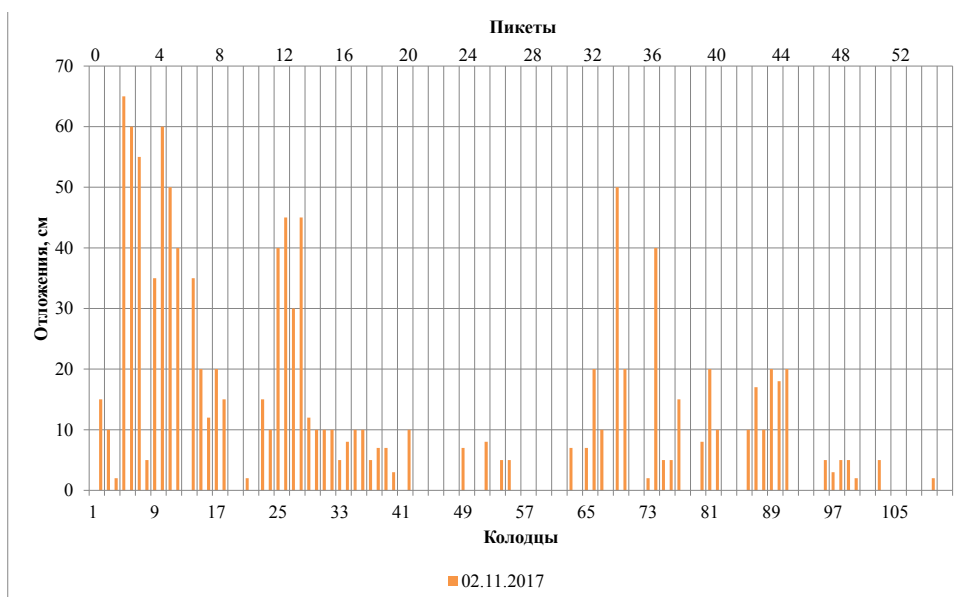


Рис. 3. Отложения наносов в колодцах дренажа плотины № 1–2 в ноябре 2017 г.

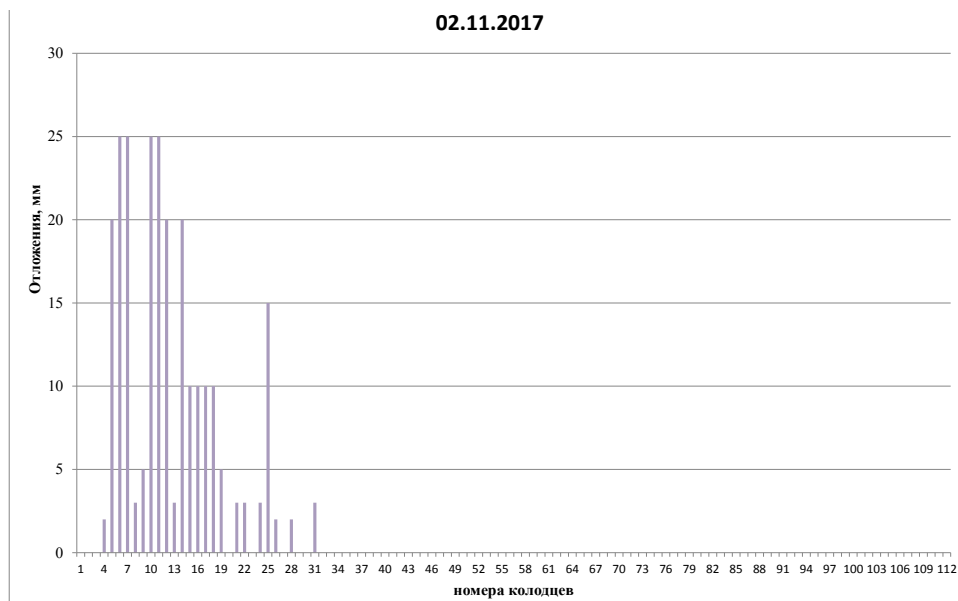


Рис. 4. Отложения наносов в трубах дренажа плотины № 1–2 в 2017 г.

Отложения из колодцев на ПК 3+50 и ПК 8+00 оказались близки по составу к грунтам основания плотины, что подтвердило преобладающую роль разгрузки в дренаж фильтрационных вод основания и вынос частиц грунта основания в дренаж.

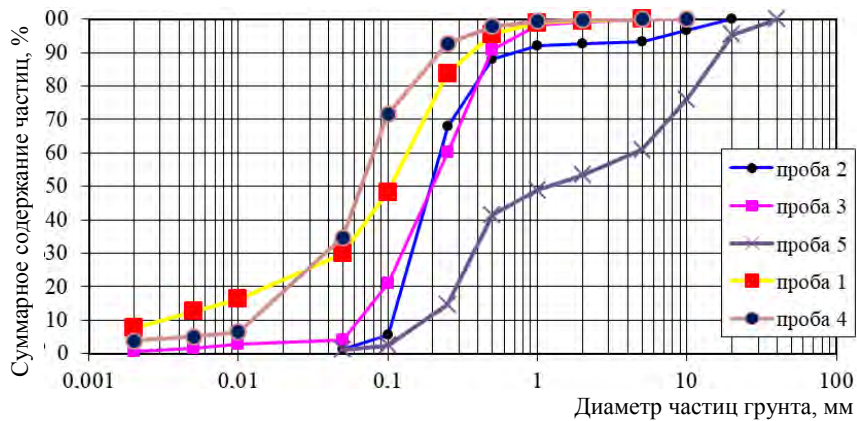


Рис. 5. Гранулометрический состав образцов грунта, отобранных из тела (пробы 2,4,5) и основания плотины (пробы 1,3)

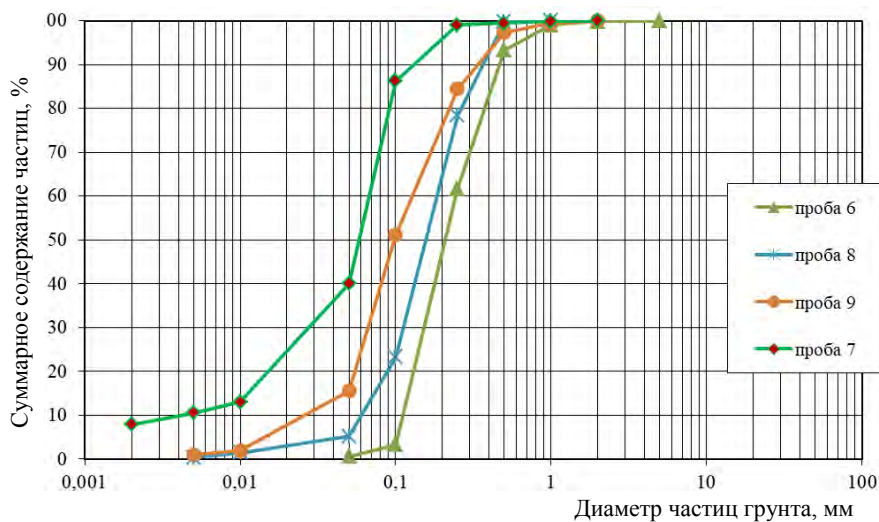


Рис. 6. Гранулометрический состав образцов грунта, отобранных из дренажа

По результатам химического анализа подтвердился ранее сделанный вывод, что в дренаж поступает в основном вода, фильтрующаяся из основания плотины.

Результаты проведенных исследований позволили обосновать необходимость реконструкции дренажной системы плотины № 1–2 Нижегородской ГЭС. Эффективность проведенной в полном объеме реконструкции установлена в 2020 г. в рамках многофакторного исследования с оценкой прочности, устойчивости напорных ГТС Нижегородской ГЭС [7].

Русловая плотина Павловской ГЭС [8]

Русловая земляная плотина расположена между правым берегом реки Уфы и судопропускным шлюзом, выполнена намывом ядра из мелких третичных песков (центральная часть плотины – ядро) и гравелисто-галечных аллювиальных грунтов (боковые призмы).

Тип плотины – земляная, намывная с ядром. Верхняя часть плотины, в том числе и ядра, выполнена насыпным способом. Класс сооружения – II.

Грунты основания – аллювиальные отложения небольшой мощности на известняках. Грунты, составляющие тело плотины, в соответствии с проектом: гравелисто-галечный грунт (боковые призмы, основание боковых призм, верхняя насыпная часть плотины), мелкий песок (ядро плотины), искусственная смесь – 25 % мелкого песка и 75 % гравелисто-галечных грунтов (основание ядра плотины), камень (основание верховой боковой призмы плотины – оставшийся банкет перекрытия русла реки).

С начала эксплуатации ГТС Павловской ГЭС фиксировался выход фильтрационных вод на низовой откос русловой плотины. Требовалось определить степень опасности для сооружения непроектной фильтрации и дать рекомендации по дальнейшей эксплуатации. Исследования, проведенные в соответствии с разработанной методикой [2], показали, что тело плотины очень разнородно как по составу уложенных в него грунтов (мелкие глинистые пески, гравелистые пески, щебенистые суглинки, гравий, камень), так и по распределению грунтов по зонам в пределах поперечного профиля. Важно отметить, что грунты различных зон располагаются в пределах поперечных профилей с соблюдением принципа повышения крупности грунтов от центра (ядерная зона) к периферии (низовая упорная призма), присущего подбору обратных фильтров. Конструктивным недостатком является то, что поверхность низового откоса плотины покрыта толстым слоем (около 5 м) щебенистого суглинка, который в силу малой водопроницаемости может служить препятствием для свободной разгрузки фильтрационного потока в наклонный дренаж.

Ретроспективный анализ результатов пьезометрических натуральных наблюдений показал, что фильтрационный режим плотины в течение всего периода эксплуатации остается стабильным. Уровни воды в пьезометрах колеблются в течение многих лет в одних и тех же диапазонах.

В створе ПК 1+35 фильтрационный поток, вероятно, частично запирается в зоне разгрузки слоем щебенистого суглинка, создавая в низовом клине подпор. Вследствие этого, а также из-за периодически случающихся высоких подъемов уровня воды в нижнем бьефе (до отм. 114,5 м), имеют место выходы фильтрующейся воды на поверхность низового откоса. Выноса грунта в этих источниках не наблюдается.

Вода из источника на низовом откосе русловой плотины оказалась близка по химическому составу к воде из верхнего бьефа водохранилища, что подтвердило ее происхождение – выход депрессионной поверхности на откос. В связи с вышесказанным было рекомендовано выполнить пригрузку низового откоса ПГС для устранения выхода грунтовых вод на откос.

Исследования фильтрационного режима русловой плотины Павловской ГЭС позволили выявить происхождение профильтровавшейся воды на низовом откосе плотины, оценить состояние гидротехнического сооружения и степень опасности, а также дать рекомендации по устранению нарушений. В 2018 г. ремонтные мероприятия, рекомендованные в результате выполненных исследований, проведены, по результатам декларирования 2018 г. состояние плотины исправное, работоспособное.

Заключение

На основании оценки состояния рассмотренных грунтовых плотин и оценки степени потенциальной опасности непроектного фильтрационного режима для них, выполненной с использованием методики, разработанной автором, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные работы по предложенной методикой схеме позволили доказать, что грунтовые плотины Палашкино Рузского гидроузла и Васильевская Озернинского гидроузла находятся в работоспособном состоянии, а также дать рекомендации по улучшению контроля фильтрационного режима плотин и по проведению ремонтных мероприятий, после проведения которых фильтрационные проявления на низовом откосе были устранены.

2. По данным наблюдений за фильтрационным режимом плотины № 1–2 Нижегородской ГЭС в 2017 г. фильтрационный поток из основания плотины разгружался в канал только на ограниченном участке нового русла магистрального канала, что позволило на этом участке улучшить условия разгрузки депрессионной поверхности из тела плотины. На пикетах, расположенных выше, градиенты напора на входе фильтрационного потока в дренаж были выше критических, что представляло потенциальную опасность для сооружения. Проведенные исследования подтвердили эффективность выполнения работ по реконструкции дренажа на ограниченном участке, в результате чего было рекомендовано продолжить реконструкцию дренажной системы. После проведения реконструкции в полном объеме в соответствии с проектом с 2020 г. фильтрационный поток из основания плотины разгружается в магистральный канал, а из тела и основания плотины – в трубчатый дренаж; состояние плотины – нормальное.

3. До проведения работ по реконструкции низового откоса непроектный фильтрационный режим русловой плотины Павловской ГЭС, следствием которого был выход депрессионной поверхности на низовой откос плотины, представлял потенциальную опасность для сооружения. После выполнения ремонтных работ, рекомендованных по результатам оценки состояния сооружения, русловая плотина Павловской ГЭС находится в нормальном эксплуатационном состоянии.

4. Предложенная автором методика оценки состояния грунтовых плотин с проявлениями непроектного фильтрационного режима позволила определить причины отклонения фильтрационного режима от проектных предпосылок, оценить степень опасности для сооружения и рекомендовать мероприятия для обеспечения нормального эксплуатационного состояния грунтовых плотин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Абрамов Н.А., Ладенко С.Ю.** Аварии грунтовых плотин, связанные с нарушением фильтрационной прочности их тела/основания // Гидротехника XXI век. 2021. №. 2(48). С. 21-23.
2. **Абрамов Н.А.** Методика оценки фильтрационной прочности грунтовых плотин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 304. С. 77-85.

3. **Ладенко С.Ю., Иванова Т.В., Абрамов Н.А.** Признаки развития деструктивных процессов в теле и основании грунтовой плотины, связанные с изменением фильтрационного режима // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 297. С. 11-21.
4. **Абрамов Н.А.** Исследование фильтрационного режима грунтовых плотин Рузского и Озернинского гидроузлов // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. 2021. Вып. 5. С. 106-117
5. **Кузнецов В.С., Ладенко С.Ю.** Техническое состояние земляных плотин Нижегородской ГЭС после 60 лет эксплуатации // Гидротехническое строительство. 2015. № 10. С.11-20.
6. **Цыганова А.А., Ладенко С.Ю.** Выбор технического решения для реконструкции дренажной системы земляной плотины № 1-2 Нижегородской ГЭС // Материалы IV Международной научно-практической конференции. Гришанинские чтения. «Водные пути и русловые процессы». Май 2019 г. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. С. 371-377.
7. **Ладенко С.Ю., Камзолов М.В.** Опыт проведения многофакторных исследований гидротехнических сооружений Нижегородской ГЭС // Тезисы докладов XIV Научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, 2022. С. 196-197.
8. **Абрамов Н.А., Ладенко С.Ю., Иванова Т.В., Иванов С.Н.** Исследование фильтрационного режима тела и основания гидротехнических сооружений Павловской ГЭС с использованием результатов анализа химического состава вод // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 5-15.

REFERENCES

1. Abramov N.A., Ladenko S.Yu. Accidents of soil dams associated with violation of the filtration strength of their body/base. Hydraulic engineering XXI century. 2021;2 (48):21-23. (In Russ.).
2. Abramov N.A. Methodology for Assessing the Filtration Strength of Soil Dams. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;304:77-85. (In Russ.).
3. Ladenko S.Yu., Ivanova T.V., Abramov N.A. Signs of the development of de-structural processes in the body and base of the soil dam associated with the change in the filtration regime. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2020;297:11-215. (In Russ.).
4. Abramov N.A. Study of the filtration regime of soil plots of the Ruzsky and Ozerinsky waterworks. Waterways and channel processes. *Waterways hydraulic structures*. 2021;(5):106-117. (In Russ.).
5. Kuznetsov V.S., Ladenko S.Yu. Technical condition of earthen dams of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station after 60 years of operation. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*. 2015;(10):11-20. (In Russ.).
6. Tsyganova A.A., Ladenko S.Yu. Choice of technical solution for re-design of drainage system of earthen dam No. 1-2 of Nizhny Novgorod HPP//Materials of IV International Scientific and Practical Conference. Grishanin readings. «Waterways and channel processes». May 2019 St. Petersburg: Publishing House of the GUMRF named after Adm S. O. Makarova, 2019. P. 371-377.
7. Ladenko S.Yu., Kamzolov M.V. Experience in conducting multifactorial studies of hydraulic structures of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station. Theses of the docks of the XIV Scientific and Technical Conference «Hydropower. Hydraulic engineering. New development and technology». JSC «Vedeneev VNIIG», St. Petersburg, 2022. P. 196-197.

8. Abramov N.A., Ladenko S.Yu., Ivanova T.V., Ivanov S.N. Research of the filtration regime of the body and the foundation of hydraulic structures of the Pavlovsk hydroelectric power station using the results of analysis of the chemical composition of waters. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;291:5-15. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.А. Абрамов – инженер 1 категории.

Information about the authors

N.A. Abramov – Engineer of 1 category.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 27.11.2023; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 624.138.23

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОСТРУКТУРНОЙ СМОЛЫ НА АКРИЛАТНОЙ ОСНОВЕ (ГИДРОГЕЛЯ) В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

**Михаил Евгеньевич Михайлов¹, Константин Алексеевич Федосин²,
Евгений Васильевич Лавренюк³**

^{1, 2, 3} ООО «Эм-Си Баухеми», Санкт-Петербург, Россия

¹ Mikhail.Mikhailov@mc-bauchemie.ru

² Konstantin.Fedosin@mc-bauchemie.ru

³ Evgeniy.Lavrenyuk@mc-bauchemie.ru

Аннотация. Приводятся сведения о результатах испытания проникающей способности гидрогеля в песках различной крупности для метода пропитки и оценки возможности создания в них противифльтрационного элемента.

Ключевые слова: *противофильтрационные устройства, гидроструктурный гидрогель на акрилатной основе, грунтполимер, грунтовые плотины*

Для цитирования: Михайлов М.Е., Федосин К.А., Лавренюк Е.В. Исследования проникающей способности гидроструктурной смолы на акрилатной основе (гидрогеля) в песчаных грунтах // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 87–94.

Original article

EXPERIMENTAL WORK FOR THE HYDROGEL IMPREGNATION METHOD IN SANDS

Mikhail E. Mikhailov¹, Konstantin A. Fedosin², Evgeniy V. Lavrenyuk³

^{1, 2, 3} MC-Bauchemie, Saint Petersburg, Russia

¹ Mikhail.Mikhailov@mc-bauchemie.ru

² Konstantin.Fedosin@mc-bauchemie.ru

³ Evgeniy.Lavrenyuk@mc-bauchemie.ru

Abstract. The information on the results of testing of hydrogel in sands for the impregnation method in impervious devices of GTS is presented.

Keywords: *impervious devices, acrylate-based hydrostructural hydrogel, soil polymer, soil dams*

For citation: Mikhailov M.E., Fedosin K.A., Lavrenyuk E.V. Experimental work for the hydrogel impregnation method in sands. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:87-94. (In Russ.).

Выбор гидрогеля для создания противифльтрационных устройств

Статья посвящена изучению проникающей способности гидроструктурной смолы на акрилатной основе (гидрогеля) в пески разной крупности в условиях практических моделей. Гидроструктурная смола на

акрилатной основе (гидрогель) представляет собой многокомпонентные композиции, которые включают в себя базовый полимер, активатор, армирующий полимер и соль-стартер. Гидрогели предварительно приготавливаются на объекте с учетом требуемых параметров из субкомпонентов в заданных пропорциях. Гидрогели имеют низкую вязкость 3–16 мПа·с [2]. Следует отметить, что проницаемость грунта характеризуется величиной коэффициента фильтрации, который, в свою очередь, связан с размерами частиц грунта (их диаметром) [1], показателем пористости и вязкостью проникающей жидкости (гидрогеля).

Для проведения опытно-производственных испытаний были разработаны 13 специальных макетов размерами 1240×600×640 мм (рис. 1, 2, 3). Методика проведения испытаний заключалась в следующем: макеты заполнялись песком заданной крупности, в центральной части макета на всю глубину размещались инъекционные пики, после чего под давлением до 20 бар производилось нагнетание гидрогеля в песок. Успешным результатом проведения испытаний являлось формирование колонны из грунтополимера [2].



Рис. 1. Макеты для опытных испытаний № 1, № 2, № 3, № 4



Рис. 2. Макеты для опытных испытаний № 5, № 6, № 7, № 8

Для изучения проникающей способности гидрогеля использовались грунтовые материалы, приведенные в табл. 1.

Для проведения нагнетаний в качестве пропитки были выбраны гидрогели с различными значениями вязкости, варьирующимися от 5 до 16 мПа·с, а также с разной скоростью реакции гидрогеля от 38 с до 3 мин 31 с.

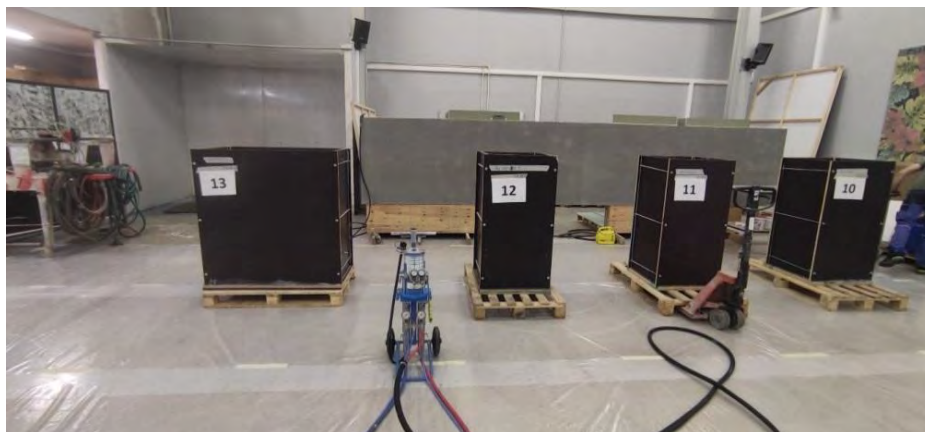


Рис. 3. Макеты для опытных испытаний № 10, № 11, № 12, № 13

Таблица 1

Нумерация макетов с разным гранулометрическим составом

Номер макета	Грунт	Крупность, мм
1	Песок мелкий	0,1–0,63
2	Песок средней крупности	2,0–2,5
3	Песок крупный	2,5–5
4	Щебень	5–20
5	Песок мелкий	0,1–0,63
6	Песок мелкий (увлажненный в макете)	0,1–0,63
7	Песок крупный (увлажненный в макете)	2,5–5
8	Микс песок (одинаковой пропорции)	(0,1–0,63)+(2,0–2,5)+ +(2,5–5)+ (5–20)
9	Песок мелкий	0,1–0,63
10	Песок мелкий	0,1–0,63
11	Песок мелкий (увлажненный в макете)	0,1–0,63
12	Микс песок (одинаковой пропорции)	(0,1–0,63)+(2,5–5)
13	Микс песок (одинаковой пропорции)	(0,1–0,63)+(2,5–5)

На основании проведенных испытаний было сделано следующее заключение: гидрогели, имеющие вязкость более 8 мПа·с, не способны проникать в мелкие пески, в то время как гидрогели с вязкостью 5–7 мПа·с проникают в мелкий песок и формируют колонну с диаметром 400 мм.

Гидрогели с вязкостью более 8 мПа·с

На макетах № 1, № 5 и № 6 в песок мелкий нагнетался гидрогель с вязкостью 16 мПа·с. В результате опытов консолидируемые колонны сформированы не были, наблюдался гидроразрыв с образованием отдельных слоев толщиной 50–100 мм (рис. 4).



Рис. 4. Образовавшиеся слои после гидроразрыва при пропитке песка мелкого гидрогелем с вязкостью более 8 мПа·с на макетах № 1, № 5, № 6

Для макета № 8 была использована смесь песков в равной пропорции и крупностью ((0,1–0,63мм) + (2,0–2,5мм) + (2,5–5мм) + (5–20 мм)), в которую осуществлялось нагнетание гидрогеля с вязкостью более 8 мПа·с. В результате нагнетания установлено, что песок средней крупности и крупный песок образуют прочную структуру под действием гидрогеля, в то время как мелкий песок осыпается, что отражено на рис. 5.



Рис. 5. Результат пропитки микс-песка гидрогелем с вязкостью более 8 мПа·с

На макетах № 2, № 3, № 4 осуществлялось нагнетание гидрогеля в песок средней крупности, в песок крупный и в щебень с вязкостью более 8 мПа·с, составляющей 16 мПа·с. На макетах были успешно сформированы устойчивые колонны (рис. 6).



Рис. 6. Сформированные колонны в результате нагнетания гидрогеля с вязкостью более 8 мПа·с

Экспериментально полученные результаты позволили определить область применения гидрогелей с вязкостью выше 8 мПа·с. Были установлены оптимальные значения скорости реакции материала и давления в процессе его нагнетания.

Гидрогели с вязкостью 3–7 мПа·с

На последующих макетах № 9, № 10, № 11, № 12 использовался гидрогель с низкой вязкостью для пропитки песков мелких (0,1–0,63 мм) и средних. В ходе проведения испытаний осуществлялась пропитка песка и последующее формирование устойчивых колонн (рис. 7). Давление, применяемое в процессе пропитки, не превышало 20 бар, а скорость реакции составила 3 мин 31 с.



Рис. 7. Сформированные колонны под воздействием гидрогеля вязкостью 3–7 мПа·с

В эксперименте с макетом 13 были использованы 2 инъекционные пики, для пропитки выбирались разные скорости реакции гидрогеля в пределах от 1 мин до 3 мин 31 с. В результате были сформированы две пересекающиеся колонны, образующие плотную контактную зону между собой, что наглядно представлено на рис. 8.



Рис. 8. Контактная зона колонн, образовавшаяся при пропитке гидрогелем с вязкостью 7 мПа·с на макете № 13

На рис. 8 видно, что сформированные колонны пересекаются и образуют непрерывную структуру, что является ключевым аспектом для создания стен в грунте на основе грунтополимера.

С учетом зависимости проницаемости песков мелких от коэффициента фильтрации, были продолжены лабораторные испытания с использованием гидрогеля вязкостью 5 мПа·с.

Испытания песков и гидрогеля для определения коэффициента фильтрации

Для определения коэффициентов фильтрации были проведены испытания грунтовых материалов разной крупности (песков средних, мелких, очень мелких и супеси песчанистой) по ГОСТ 25584-2016 [3]. Эксперименты были выполнены в лабораторных условиях и включали в себя фильтрацию как водой, так и с использованием гидрогеля с вязкостью в диапазоне 5 мПа·с. Полученные результаты отражены на графике (рис. 9).

Из графика следует, что коэффициент фильтрации супеси песчанистой при фильтрации водой составляет 0,11 м/сут, в то время как с применением гидрогеля коэффициент фильтрации незначительно снижается до 0,09 м/сут. Последующие результаты также подтверждают, что проникающая способность гидрогеля численно близка к коэффициенту фильтрации грунтов при использовании воды.

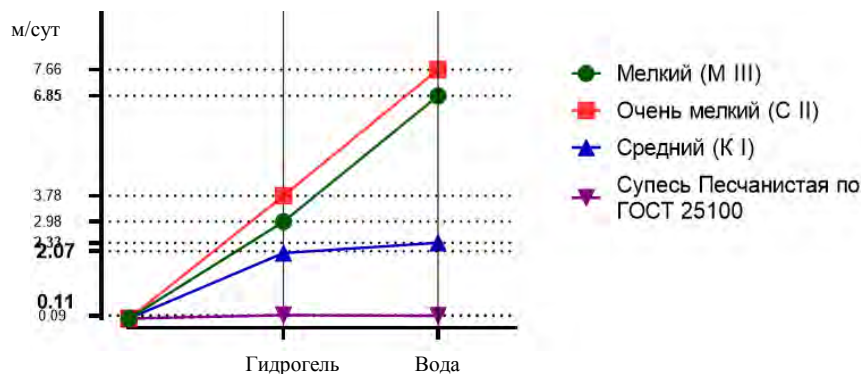


Рис. 9. Сравнительный график определения коэффициентов фильтрации грунтовых материалов при фильтрации водой и с использованием гидрогеля

Заключение

1. Опытные испытания на макетах продемонстрировали зависимость вязкости и диаметра частиц песка от метода пропитки. Опытным путем было установлено, что гидрогели с вязкостью более 8 мПа·с ограниченно проницаемы в мелких песках и не создают консолидируемые колонны и сплошные структуры. Гидрогели с вязкостью 3–5–7 мПа·с проницаемы в очень мелких песках и формируют устойчивые колонны диаметром 400 мм. Для выбора параметров гидрогелей необходимо руководствоваться изысканиями грунтов по инженерно-геологическому элементу и учитывать степень водонасыщенности грунтов.

2. Лабораторные испытания по определению коэффициента фильтрации грунтовых материалов с использованием воды и гидрогеля вязкостью 3–5 мПа·с подтверждают опытные испытания пропитки гидрогеля в песках мелких.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин Е.Н. Кислотно-основная буферность дисперсных грунтов как основа физико-механического регулирования вяжущих их поглотительной способности. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова. Геологический факультет. 2017. С. 231, 289.

2. Михайлов М.Е., Захарьин Е.Н. Применение гидроструктурной смолы при создании противодиффузионной завесы в грунтовой плотине // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 305. С. 20–32.

3. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М.: Стандартинформ, 2016.

REFERENCES

1. Samarin E.N. Acid-base buffering of dispersed soils as the basis for the physical and mechanical regulation of binders and their absorption capacity. M.: Moscow State University named after M.V. Lomonosov. Geological Faculty. 2017, pp. 231, 289. (In Russ.).
2. Mikhailov M.E., Zakharyin E.N. The use of hydrostructural resin in creating an anti-seepage curtain in a soil dam // *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;305:20-32. (In Russ.).
3. GOST 25584-2016. Soils. Methods for laboratory determination of filtration coefficient. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.).

Информация об авторах

М.Е. Михайлов – руководитель группы по работе в проектных сегментах;
К.А. Федосин – менеджер-проекта;
Е.В. Лавренюк – старший инженер по техническому сопровождению.

Information about the authors

M.E. Mikhailov – Team Leader for Project Segments;
K.A. Fedosin – Project Manager;
E.V. Lavrenyuk – Senior Technical Support Engineer.

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 11.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 11.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.88

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЬДА С ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ

Алексей Алексеевич Добродеев¹, Кирилл Евгеньевич Сазонов²

^{1,2} Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия,

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия,

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия

¹ A_Dobrodeev@ksrc.ru

² kirsaz@rambler.ru

Аннотация. Изучение глобальной ледовой нагрузки является важным аспектом исследований для тех сооружений, применительно к которым критичным условием эксплуатации является их устойчивость на грунте. К ним относятся практически все шельфовые сооружения и часть инфраструктуры портовых сооружений. Для таких сооружений, как защитные дамбы, проблема определения глобальной ледовой нагрузки обычно не стоит. Здесь важным является определение размеров и характера ледяных нагромождений, изучение возможности попадания льда на верхнюю поверхность дамбы. Кроме этого, крайне важным является рассмотрение сохранности поверхности дамбы, например, укрепленной каменной наброской, при взаимодействии со льдом. Примеры указанных и других выполненных исследований, а также особенности их осуществления, освещены в статье.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, ледовый бассейн, ледовая нагрузка, сценарий предельной кинетической энергии, модельные испытания

Для цитирования: Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Опыт исследования взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями в ледовом бассейне // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 95–107.

Original article

THE EXPERIENCE IN STUDYING THE INTERACTION OF AN ICE WITH HYDRAULIC STRUCTURES IN AN ICE BASIN

Aleksei A. Dobrodeev¹, Kirill E. Sazonov²

^{1,2} Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, Russia

^{1,2} Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹ A_Dobrodeev@ksrc.ru

² kirsaz@rambler.ru

Abstract. The study of global ice load is an important aspect of research for the fixed marine structures. The stability on the ground is a critical operating condition for such type of marine

structures. These include almost all offshore structures and part of the infrastructure of port facilities. For structures such as protective dams, the problem of determining the global ice load is usually not an issue. It is important here to determine the nature of ice encroachment and possibility of ice getting onto the upper surface of the dam. In addition, it is extremely important to consider the safety of the dam surface, for example, reinforced with riprap, when interacting with ice. Examples of these and other completed studies, as well as the features of their implementation, are highlighted in the paper.

Keywords: *hydraulic structures, ice model tank, ice load, limit momentum scenario, model tests*

For citation: Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. The experience in studying the interaction of an ice with hydraulic structures in an ice basin. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:95-107. (In Russ.).

Введение

Большинство гидротехнических сооружений (ГТС) нашей страны во время своей эксплуатации подвержены воздействию льда. Учет этого воздействия необходимо осуществлять на всех этапах жизненного цикла сооружения, начиная с момента его проектирования и заканчивая эксплуатацией и утилизацией. Можно указать целый ряд различных аспектов воздействия льда на ГТС термического и механического характера [1]. В данной статье будет рассмотрено только механическое воздействие на ГТС.

При рассмотрении механического воздействия на ГТС одним из основных вопросов является определение глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружение. Для ее определения применяют нормативный и расчетный подходы, а также натурный и модельный эксперименты.

Нормативный подход базируется на использовании нормативных документов, разработанных различными организациями и ведомствами. Этот подход, благодаря его консервативности, практически исключает возможность занижения уровня ледовой нагрузки, действующей на сооружение. Основным недостатком нормативного подхода являются серьезные трудности в его применении к реальным конструкциям ГТС. Нормативные документы, как правило, предлагают расчетные формулы для определения глобальной ледовой нагрузки на конструкции, которые имеют достаточно простую геометрию: цилиндрические колонны и различные конусы. В Правилах классификации и постройки морских стационарных платформ [2] в основном рассматриваются подобные сооружения. На практике, даже комбинация указанных простых элементов может быть уже достаточно сложна для определения глобальной ледовой нагрузки по нормативным документам. В таких руководствах также упоминается возможность расчетного определения уровня глобальной ледовой нагрузки с использованием специальных программ, одобренных нормативным органом.

Потенциально любой разработчик проекта ГТС может заказать разработку математической модели взаимодействия проектируемого сооружения со льдом. Однако в настоящее время такой метод практически не используется. Одной из причин является отсутствие общепринятых моделей описания поведения льда при взаимодействии с ГТС. В настоящее время все большее распространение получает метод дискретных элементов для моделирования ледовой нагрузки, тем не менее, время его эффективного применения для решения практических задач еще не наступило. Более подробно вопросы применения математических моделей освещены в работах [3, 4].

Казалось бы, важную информацию о глобальной ледовой нагрузке на ГТС могли дать данные натурных измерений. Однако проведение натурального эксперимента часто сталкивается с целым рядом, часто непреодолимых, трудностей. Для стационарных объектов не представляется возможным измерить глобальную ледовую нагрузку. Применение различных измерительных панелей позволяет зафиксировать лишь локальную нагрузку на них самих. Распространение результатов на все сооружение представляет собой некорректную задачу. В некоторых случаях возможно измерение глобальной нагрузки с помощью наклономеров и акселерометров. При применении любого типа датчиков на натурном объекте всегда возникает довольно сложная проблема их калибровки. Кроме этого, все указанные системы измерения должны быть предусмотрены еще на этапе проектирования ГТС. Обзор современных методов проведения натурального эксперимента и примеры таких исследований приведены в работе [5].

Модельный эксперимент в ледовом бассейне, хотя и не лишен ряда недостатков [4], позволяет обойти целый ряд трудностей, возникающих при использовании других подходов. К его достоинствам можно отнести возможность точно воспроизвести все конструктивные особенности ГТС, включая параметры акватории, на которой оно установлено. В ледовом бассейне имитируется большой набор различных ледовых условий. По нашему мнению, к его главным достоинствам относится возможность измерения глобальной ледовой нагрузки и изучение развития процессов взаимодействия сооружения со льдом во времени. В данной статье рассматривается опыт исследования взаимодействия льда с ГТС в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра [5]. В последнее время доля загрузки этого бассейна работами, связанными с изучением ГТС, достигает 50 %. Также в последнее время изменилась структура этих работ. Если ранее преобладали исследования различных шельфовых сооружений, то сейчас большое количество работ связано с проектированием новых портов в арктическом регионе и на замерзающих акваториях.

Исследование ледовой нагрузки при реализации сценария предельной кинетической энергии

При рассмотрении ледовой нагрузки на ГТС обычно рассматриваются три сценария: предельного напряжения, предельной кинетической энергии и предельной силы [6]. Далее кратко описываются модельные исследования сценария предельной кинетической энергии, так как он фигурирует в большинстве отечественных нормативных документов. Более подробно результаты изложены в [7].

Исследования проводились для швартовного пала, швартовно-отбойного пала и технологической площадки порта г. Приморска. Ниже приводятся некоторые результаты, полученные для швартовно-отбойного пала, который в соответствии с техническим заданием на работы мог взаимодействовать со льдом как телом ростверка, так и свайным основанием. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе модель пала (рис. 1), связанная с буксировочной тележкой через измеряющий глобальную ледовую нагрузку 6-компонентный динамометр, взаимодействовала с «бесконечным» ледяным полем, реализуя сценарий прорезания льда. На втором этапе изучалось взаимодействие пала с отдельными льдинами, для которых ва-

рыировались их площадь и скорость движения. При осуществлении этих экспериментов модель оставалась неподвижной вместе с буксировочной тележкой, а льдина разгонялась до заданной скорости вспомогательной тележкой бассейна.



Рис. 1. Модель швартовно-отбойного пала

Результаты испытаний, полученные на первом этапе, представлены в табл. 1. В этой таблице горизонтальная нагрузка на пал P_{Σ} определялась по формуле

$$P_{\Sigma} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2},$$

где F_x, F_y – компоненты глобальной ледовой нагрузки, измеренные динамометром.

Появление поперечной силы обусловлено взаимодействием свайного основания со льдом (рис. 2). Из приведенных рисунков следует, что при взаимодействии пала со льдом по сценарию прорезания происходит воздействие льда на сваи как минимум до третьего ряда.

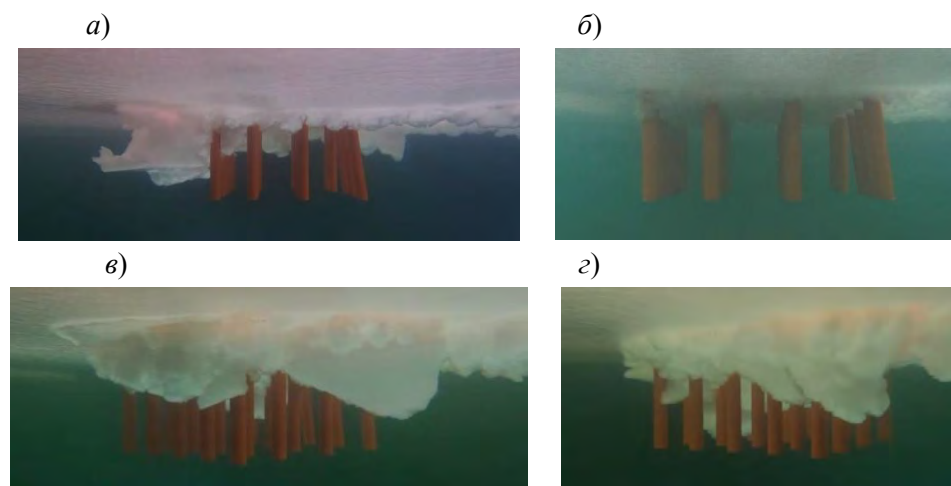


Рис. 2. Взаимодействие с ровным льдом толщиной 0,72 м:

- a* – со льдом взаимодействует ростверк. Направление дрейфа 0° . Скорость дрейфа 0,03 м/с;
- б* – со льдом взаимодействует свайное основание. Направление дрейфа 0° . Скорость дрейфа 0,29 м/с;
- в* – со льдом взаимодействует ростверк. Направление дрейфа 60° . Скорость дрейфа 0,29 м/с;
- з* – со льдом взаимодействует свайное основание. Направление дрейфа 60° . Скорость дрейфа 0,29 м/с

Таблица 1

**Величина ледовой нагрузки на швартовно-отбойный пал
(сценарий прорезания)**

Направление дрейфа, град	Скорость дрейфа, м/с	F_x , МН	F_y , МН	P_{Σ} , МН
0	0,29	7,67/2,70*	0,27/4,43	7,68/2,74
0	0,03	4,64/4,57	0,15/0,17	4,65/4,58
30	0,29	13,36/8,9	1,69/1,18	14,47/8,98
45	0,18	14,99/8,93	1,22/1,18	15,04/8,96
60	0,18	12,46/9,05	6,86/1,81	14,24/9,23
60	0,03	10,30/7,29	6,05/1,62	11,95/7,48

* – числитель дроби относится к ростверку, а знаменатель – к свайному основанию

Данные табл. 1 показывают, что глобальная ледовая нагрузка на свайное основание сопоставима с нагрузкой на ростверк. При фронтальном взаимодействии величина этой нагрузки зависит от скорости дрейфа льда. При высокой скорости чаще реализуется сценарий чистого прорезания и, соответственно, регистрируется меньший уровень воздействия. При малой скорости происходит нагромождение льда между сваями (см. рис. 2), которое приводит к росту нагрузки. Визуальные наблюдения в ледовом бассейне показывают, что взаимодействие со льдом простирается вплоть до третьего ряда свай, реже до четвертого.

На втором этапе проводились исследования по сценарию предельной кинетической энергии. Результаты этих испытаний представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Данные, приведенные на рис. 3, позволяют сделать предположение, что, начиная с некоторой скорости, ледовая нагрузка перестает от нее зависеть. Эта нагрузка, как показывают результаты сопоставления с данными эксперимента в бесконечном поле, примерно соответствует нагрузке, полученной при проведении эксперимента с теми же объектами в бесконечном поле. По-видимому, запаса кинетической энергии в дрейфующей льдине большого размера оказывается достаточно для реализации сценария предельного напряжения.

В теории считается, что предельное значение силы достигается в конце процесса внедрения льдины в твердое тело. Эти же положения приняты в [8]. Такой вывод следует из принятой расчетной схемы, согласно которой площадь контакта льдины с сооружением постоянно увеличивается, а эффективное давление льда остается постоянным. Результаты проведенных экспериментов показывают, что принятая схема плохо соответствует действительности. В табл. 2 приведены данные о продолжительности контакта льдины с сооружением t_c , а также указано, в какой момент контакта была зафиксирована максимальная нагрузка (значение коэффициента k в соотношении kt_c). По-видимому, это связано с нелокальным разрушением кромки ледяного покрова при внедрении в нее сооружения.

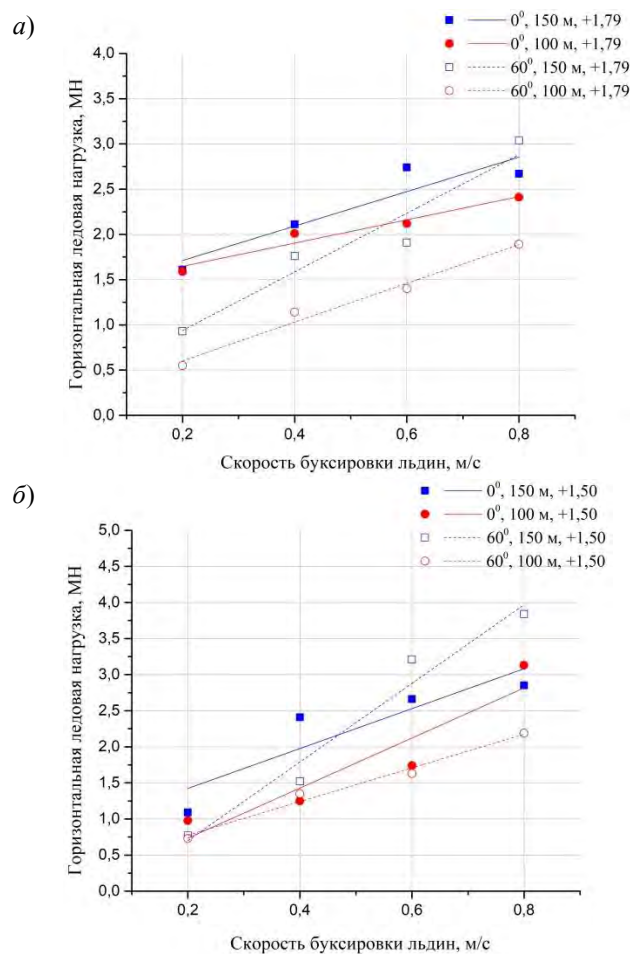


Рис. 3. Ледовая нагрузка на швартовно-отбойный пал при воздействии обломков льда размером 100 м на 100 м и 150 м на 150 м при взаимодействии с ростверком (а) и свайным основанием (б)

Взаимодействие льда с протяженными ГТС

В работе ледового бассейна Крыловского центра в последнее время значительное место занимают работы по исследованию воздействия льда на протяженные ГТС (причальные стенки, защитные дамбы и прочее) вновь проектируемых портов для замерзающих морей. Подробности и основные результаты этих исследований изложены в работах [5, 9, 10], поэтому здесь будут сформулированы лишь основные выводы, полученные в ходе их выполнения.

При проведении модельных испытаний протяженных ГТС одной из проблем является выбор масштаба модели. ГТС имеют длину до 10^3 м, длина же чаши ледового бассейна Крыловского центра составляет 80 м, а ширина 10 м [5]. Поэтому исследовать полную модель ГТС в ледовом бассейне невозможно. При проведении экспериментов используется неполное (в геометрическом смысле) моделирование. Для определения нагрузки на все сооружение используется погонная нагрузка.

Практически всегда испытания моделей протяженных ГТС осуществляются по схеме обращенного движения, при использовании которой

модель буксируется через неподвижное ледяное поле. Потенциально ледовые бассейны могут проводить испытания и по схеме прямого движения. Возможность использования такой схемы подтверждена непосредственными проверками в ледовом бассейне [11].

Таблица 2

Продолжительность соударения льдины с препятствием и относительная временная координата положения максимума нагрузки

V, м/с	S, м ²	Угол, град	Ростверк		Куст свай	
			t_c , с	k	t_c , с	k
0,21	22500	0	2,36	0,61	4,21	0,48
		60	13,25	0,64	10,2	0,41
	10000	0	3,12	0,80	2,19	0,53
		60	6,49	0,50	4,21	0,30
0,41	22500	0	3,01	0,50	4,25	0,37
		60	8,49	0,80	11,98	0,78
	10000	0	2,74	0,56	4,09	0,75
		60	5,47	0,63	6,14	0,63
0,62	22500	0	3,26	0,50	5,49	0,29
		60	9,87	0,44	13,91	0,47
	10000	0	2,59	0,60	2,42	0,42
		60	4,7	0,78	6,01	0,78
0,82	22500	0	3,54	0,21	5,98	0,67
		60	9,11	0,62	11,42	0,44
	10000	0	3,13	0,55	3,07	0,39
		60	5,18	0,80	7,78	0,72

Протяженные ГТС можно разделить на две категории: сооружения с вертикальной и наклонной стенками. В теории считается, что характер взаимодействия со льдом у этих сооружений различный. Для вертикальной стенки преобладают процессы дробления льда, а у наклонной в основном реализуется разрушение изгибом.

Вертикальная стенка. Рассмотрим типичные результаты экспериментов (рис. 4), представленные в виде временной зависимости ледовой нагрузки на модель ГТС. На рис. 5 приведены данные для некоторых компонент ледовой нагрузки на причальную стенку.



Рис. 4. Взаимодействие модели с вертикальной стенкой со льдом в ледовом бассейне

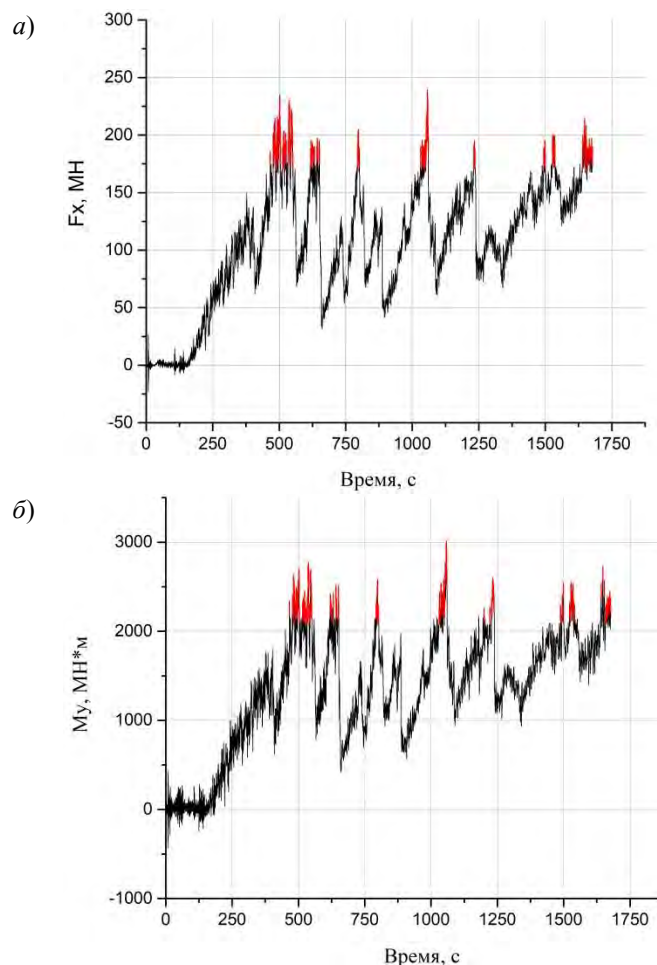


Рис. 5. Временные зависимости ледовой нагрузки на причальную стенку для максимальной скорости дрейфа льда и фронтальном воздействии ледяного покрова. Толщина льда 2,5 м:
а – продольное усилие; *б* – опрокидывающий момент

Приведенные экспериментальные реализации обладают явно выраженной цикличностью с условно высокой и низкой частотой. Первую из этих частот можно связать с дроблением и локальным сколом льда при взаимодействии с вертикальной стенкой. Такие процессы довольно подробно описаны в литературе [6]. Расчетные зависимости нормативных документов [2, 8] описывают именно такие процессы.

Низкочастотный сигнал свидетельствует о влиянии разрушения ледяного поля изгибом. Оно возникает из-за большой протяженности моделей сооружений по сравнению с толщиной моделированного льда, то есть при отношении длины сооружения к толщине льда, существенно превышающем 1. Существует несколько возможных механизмов, объясняющих возникновение изгибных деформаций в этом случае [9]. Анализ этих и им подобных экспериментов позволяет предположить, что простые формулы, содержащиеся в нормативных документах, не совсем точно описывают процессы взаимодействия вертикальной стенки со льдом. Хотя в большинстве случаев расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями не превышает 20–25 %, редко увеличиваясь до 50 %.

В экспериментах по воздействию льда на ГТС с вертикальной стенкой изучались также процессы формирования ледяного нагромождения перед сооружением и нагрузка от торосов. Об этом подробно написано в работе [9].

Наклонная стенка. Наклонная стенка характерна для профиля таких защитных ГТС, как дамбы. Обычно при проектировании дамбы вопрос о величине ледовой нагрузки на нее не стоит. Наибольший интерес у проектировщиков вызывают вопросы, связанные с формированием ледяного нагромождения. Их интересует, не будут ли попадать льдины на верхнюю поверхность дамбы, по которой, как правило, проходят различные коммуникации. Поэтому целью экспериментов является отработка формы поверхности дамбы для минимизации риска попадания льда на верхнюю поверхность. Тем не менее, измерения ледовой нагрузки на модели дамб выполнялись, и их результаты позволили прийти к интересным выводам.

Было проведено сопоставление ледовой нагрузки на сооружения с вертикальной и наклонной стенками. На рис. 6 представлены временные зависимости продольной ледовой нагрузки на такие сооружения.

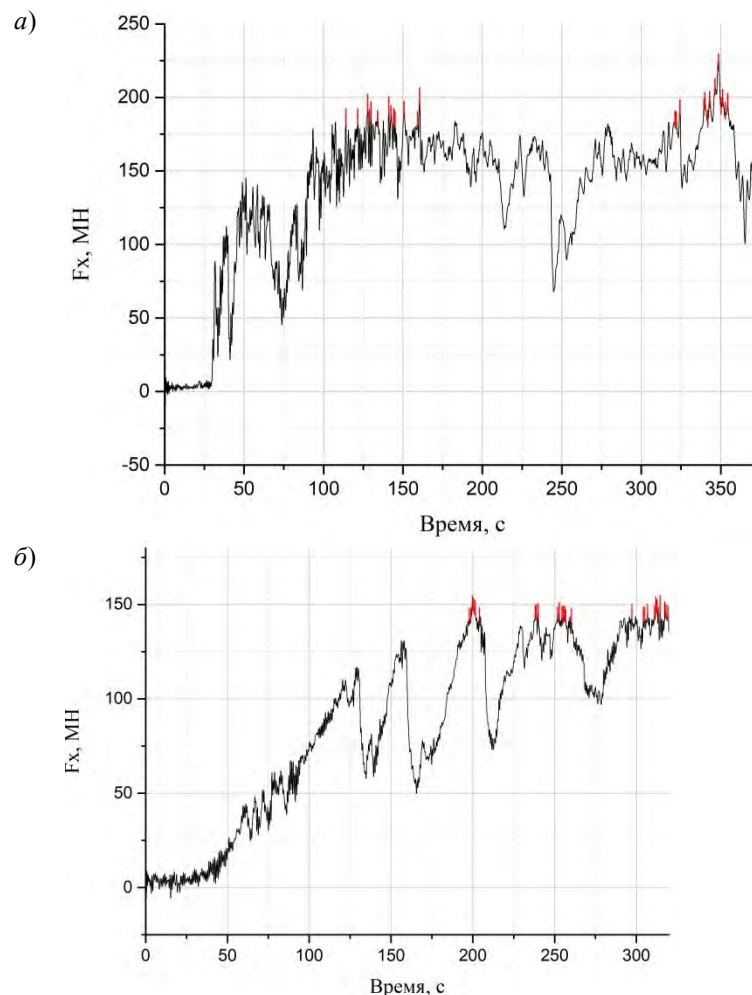


Рис. 6. Временные реализации продольной составляющей ледовой нагрузки на сооружения с вертикальной (а) и наклонной (б) стенкой

На приведенном рисунке видно, что различие процессов взаимодействия вертикальной и наклонной стенок со льдом наблюдается лишь на их начальной стадии. Через некоторое время, которое зависит от особенностей сооружения и глубины акватории, различия между процессами постепенно исчезают. Как правило, за время перед сооружением формируется ледяное нагромождение, контактирующее с дном.

Сравнение численных значений глобальной ледовой нагрузки показывает, что разница не превышает 10 %. Этот факт свидетельствует о том, что характер ледяного нагромождения и его размеры играют определяющую роль в формировании ледовой нагрузки. Форма взаимодействующей со льдом грани определяет ледовую нагрузку только в начальной стадии процесса взаимодействия. Дальнейший рост нагрузки в основном зависит от параметров нагромождения. По-видимому, этот вывод справедлив для любых ГТС.

Воздействие льда на каменную наброску

Каменная наброска часто применяется для укрепления откосов различных гидротехнических сооружений, а также берегов различных водоемов [12]. Основное назначение каменной отсыпки – защитить сооружение или берег от разрушительного воздействия волн. Взаимодействие каменной наброски со льдом практически не изучено. Нет ответов на вопрос о степени влияния каменной наброски на величину глобальной ледовой нагрузки, не ясна ее роль в формировании ледовых нагромождений перед ГТС и прочее. В ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра [13] был проведен ряд исследований, который позволил дать предварительные ответы на указанные вопросы.

Подробно методика проведения исследований и основные полученные результаты изложены в работе [13]. Здесь же кратко будут сформулированы полученные выводы.

Основной целью наших исследований было изучение влияния каменной наброски на величину глобальной ледовой нагрузки и формирование ледяных нагромождений, кроме этого, изучалась устойчивость этой наброски при воздействиях дрейфующего льда. В результате были получены следующие оценки.

1. По данным проведенных экспериментов, каменная наброска не способствует увеличению горизонтальной глобальной ледовой нагрузки на ГТС. Этот важный вывод, тем не менее, требует дополнительных исследований и подтверждений. Экспериментальные данные показывают, что каменная наброска приводит к заметному снижению вертикальной составляющей глобальной ледовой нагрузки. По-видимому, снижение вертикальной нагрузки происходит по причине, изложенной ниже.

2. При наличии каменной наброски процесс формирования ледяного нагромождения внешне протекает точно так же, как и без нее. Однако эта наброска способствует смещению надводного ледяного нагромождения в сторону моря от сооружения. Другими словами, из-за повышенного трения наброски по сравнению с гладкой поверхностью наползающие на сооружение льдины тормозятся эффективнее. Это обстоятельство является важным фактором, обеспечивающим повышение безопасности верхних поверхностей сооружения.

3. Эксперименты показали, что каменная наброска может разрушаться под воздействием льда, и это разрушение в основном происходит на границе контакта наброски с кромкой надвигающегося ледяного поля. В опытах были зафиксированы два возможных механизма такого разрушения. Первый, основной механизм, заключается в непосредственном выворачивании кромкой льда отдельных камней наброски. Как правило, лед вырывает из наброски те камни, которые недостаточно сжаты соседними и возвышаются над средним уровнем наброски. Второй механизм проявляется в выдавливании камней за счет внутренних усилий в наброске при ее взаимодействии со льдом. Такое выдавливание наблюдается в эксперименте с камнями, до которых кромка надвигающегося льда еще не дошла.

4. По предварительным результатам исследования можно рекомендовать использовать каменную наброску для ГТС в условиях замерзающих морей. При этом вполне возможно, что периодически такая наброска может потребовать проведения восстановительных работ.

Заключение

В статье дан краткий обзор и приведены некоторые новые результаты исследований взаимодействия со льдом ГТС с помощью моделей в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра. По мнению авторов, физический эксперимент открывает новые возможности для гидротехников для понимания непростых процессов взаимодействия сложных технических конструкций со льдом. Авторы далеки от абсолютизации полученных результатов и заверений о безграничных возможностях ледового бассейна.

Во-первых, физическая модель так же, как и математическая, всего лишь модель сложного природного явления. В ней неизбежно присутствует целый ряд упрощений и условностей. Основное достоинство физического моделирования в том, что в нем часто можно смоделировать вещи, которые трудно или невозможно (по крайней мере, пока) описать в рамках математических моделей. Во-вторых, ледовый бассейн, как любая экспериментальная установка, имеет свои ограничения и пределы возможностей. Тем не менее, мы считаем, что испытания в ледовом бассейне должны занять подобающее место в процессе проектирования ГТС. Результаты таких испытаний позволят проектировщикам получить дополнительный взгляд на создаваемый ими технический объект.

В заключении еще об одной проблеме, которая является общей для любого подхода к определению ледовой нагрузки на ГТС. Речь идет о качестве исходной информации о природной среде, основанной на данных инженерно-гидрометеорологических изысканий [14]. По нашему мнению, необходимо внести в нормативные документы требования по определению параметров внешней среды, в том числе и ледовой, в зависимости от класса сооружений и рассматриваемого временного периода эксплуатации. В первую очередь, данные требования должны учитывать необходимость установления взаимосвязи между характеристиками льда, которые являются определяющими в величине ледовой нагрузки. Такой подход позволит выбирать наиболее реалистичные сочетания параметров внешней среды для определения уровня нагрузки на сооружения.

Работа выполнена как часть проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования» №0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Шаталина И.Н., Трегуб Г.А.** Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2013. 452 с.
2. **Правила** классификации и постройки морских стационарных платформ. Часть II. Корпус НД № 2-020201-027. СПб.: РМРС, 2023. 64 с.
3. **Петров И.Б.** Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 7. С. 103-136.
4. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Моделирование в морской ледотехнике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 4. С. 557-567. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567
5. **Сазонов К.Е.** Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыл. гос. науч. центр», 2021. 306 с.
6. **Løset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V.** Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. Student's Book for Institutes of Higher Education, St. Petersburg: «LAN», 2006. 272 p.
7. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Новый подход к определению ледовой нагрузки на инженерные сооружения для сценария предельной кинетической энергии // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3. Ч. 3. С. 58-64. DOI: DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.044
8. **СП 38.13330.2018.** Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Минстрой РФ, 2018.
9. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 77-89. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
10. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 90-100. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
11. **Карулин Е.Б., Карулина М.М., Благовидов Л.Б.** Модельные исследования взаимодействия со льдом платформы кессонного типа на мелководье // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. Вып. 34(318). С. 5-21.
12. **Глявлиня Г.В., Вялый Е.А.** Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 53-69. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-53-69.
13. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** О воздействии льда на каменную наброску портовых сооружений // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 1. С. 97-105. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-97-105.
14. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечение промышленного освоения Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 91-105. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.

REFERENCES

1. Shatalina I.N., Tregub G.A. Ice problems of construction and operation of hydraulic structures. SPb.: Publishing house of Vedeneev VNIIG, 2013. 452 p. (In Russ.).

2. Rules for the classification and construction of fixed offshore platforms. Part II. Hull ND No. 2-020201-027. St. Petersburg: RMRS, 2023. 64 p. (In Russ.).
3. Petrov I.B. Problems of simulation of natural and anthropogenous processes in the arctic zone of the Russian Federation. *Mathematical modelling*, 2018. Vol. 30. № 7, pp. 103-136. (In Russ.).
4. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Modeling in marine ice engineering. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021. Vol. 11. no. 4, pp. 557-567. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567. (In Russ.).
5. Sazonov K.E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St.Petersburg: Krylov State Research Centre, 2021, 306 p. (In Russ.).
6. Løset S., Shkhinek K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V. Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. Student's Book for Institutes of Higher Education. St. Petersburg, «LAN», 2006. 272 p.
7. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. A new approach to determining the ice load on marine engineering structures for the critical kinetic energy scenario. *Marine intellectual technologies*. 2023. Vol. 3, no 3, pp. 58-64. DOI: DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.044. (In Russ.).
8. SP 38.13330.2018. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and vessels). M.: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2018. (In Russ.).
9. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. *Arctic: ecology and economics*. 2020, 4 (40): 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4 -77-89. (In Russ.).
10. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Sloping constructions with an inclined edge. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021. Vol. 11. no. 1, pp. 90-100. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. (In Russ.).
11. Karulin E.B., Karulina M.M., Blagovidov L.B. Model studies of interaction with ice of a caisson type platform in shallow water. *Proceedings of TsNII im. akad. A. N. Krylova*. 2007. Vol. 34 (318), pp. 5–21. (In Russ.).
12. Tlyavlina G.V., Vyalyj E.A. The natural stone using in marine hydraulic engineering construction. *Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea*. 2022. no. 2, pp. 53-69. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-53-69. (In Russ.).
13. Dobrodeev, A. A., Sazonov, K. E. About the impact of ice on the riprap of hydraulic structures. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023. Vol. 13. no. 1, pp. 97–105. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-97-105. (In Russ.).
14. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay. *Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (1): 19–105. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Добродеев – канд. техн. наук, заместитель начальника лаборатории – начальник сектора, старший преподаватель, старший научный сотрудник;

К.Е. Сазонов – доктор техн. наук, начальник лаборатории, профессор.

Information about the authors

A.A. Dobrodeev – PhD of Engineering Science, Deputy Ice Laboratory Head, Chief Lecturer, Senior Researcher;

K.E. Sazonov – Doctor of Engineering Science, Ice Laboratory Head, Professor.

Статья поступила в редакцию 25.11.2023; одобрена после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 25.11.2023; approved after reviewing 22.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 627.131

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ И РАЗМЫВОВ РУСЛА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ РОГУНСКОЙ ГЭС НА ПРАВОМ БЕРЕГУ РЕКИ ВАХШ

**Маргарита Вульфовна Алексеевская¹, Георгий Александрович
Судольский², Артем Владимирович Шилиев³,
Фазлиддин Аббосович Холов⁴**

^{1,2,3} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

⁴ ОАО «Тоҷикгидроэлектромонтаж», Душанбе, Республика Таджикистан

¹ AlekseevskajaMV@vniig.ru

² SudolskyGA@vniig.ru

³ ShilyaevAV@vniig.ru

⁴ holovf@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных и расчетных гидравлических исследований, посвященных изучению режимов течений в нижнем бьефе и размывов русла реки Вахш при совместной работе правобережных водосбросных сооружений Рогунской ГЭС на различных этапах строительства и эксплуатации гидроузла. Исследования проводились на физической модели масштаба 1:60 и на математической модели. Оценивались режимы течений в нижнем бьефе, деформации русла реки и подпоры ГЭС при совместной работе водосбросных сооружений. Выполнено сравнение параметров отброса струи с носков-трамплинов водосбросов при сопряжении сбросных потоков с нижним бьефом и режима течений в реке Вахш, определенных по данным физической и математической моделей.

Ключевые слова: водосбросные сооружения, туннельный водосброс, здание ГЭС, уровни воды, скорости течения, деформации русла, физическая модель, математическая модель

Для цитирования: Алексеевская М.В., Судольский Г.А., Шилиев А.В., Холов Ф.А. Гидравлические исследования режимов течения и размывов русла при совместной работе водосбросных сооружений Рогунской ГЭС на правом берегу реки Вахш // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 108–123.

Original article

HYDRAULIC STUDIES OF FLOW REGIMES AND CHANNEL EROSION DURING THE JOINT OPERATION OF WATER OUTLETS OF THE ROGUN HPP ON THE RIGHT BANK OF THE VAKHSH RIVER

**Margarita V. Alekseevskaya¹, Georgy A. Sudolsky², Artem V. Shilyaev³,
Fazliddin A. Holov⁴**

^{1,2,3} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

⁴ JSC «Tochikhydroelectromontazh», Dushanbe, Republic of Tajikistan

¹ AlekseevskajaMV@vniig.ru

² SudolskyGA@vniig.ru

³ ShilyaevAV@vniig.ru

⁴ holovf@mail.ru

© Алексеевская М.В., Судольский Г.А., Шилиев А.В., Холов Ф.А., 2024

Abstract. The results of experimental and computational hydraulic studies devoted to the study of flow regimes in the downstream and erosion of the Vakhsh River bed during the joint operation of the right-bank water outlets of the Rogun HPP at various stages of construction and operation of the hydroelectric complex are presented. The studies were carried out on a physical model at a scale of 1:60 and on a mathematical model. The flow regimes in the downstream, deformations of the river bed and the backwater of the hydroelectric power station were assessed during the joint operation of outlets. A comparison has been made of the parameters of jet throwing from the flip buckets of outlets when the discharge flows are coupled with the downstream and the flow regime in the Vakhsh River, determined from the data of a physical and mathematical model.

Keywords: spillways, tunnel outlet, HPP powerhouse, water levels, flow velocities, channel deformations, physical model, mathematical model

For citation: Alekseevskaya M.V., Sudolsky G.A., Shilyaev A.V., Holov F.A. Hydraulic studies of flow regimes and channel erosion during the joint operation of water outlets of the Rogun HPP on the right bank of the Vakhsh river. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:108-123. (In Russ.).

Рогунская ГЭС строится на р. Вахш в Республике Таджикистан.

Расчетные расходы гидроузла: в строительный период – 5600 м³/с, в эксплуатационный период – 8900 м³/с.

В состав гидроузла входят (рис. 1):

здание ГЭС подземного типа с 6 агрегатами мощностью 3600 МВт, расположенное на левом берегу р. Вахш;

каменно-набросная плотина высотой 335 м, длиной по гребню 670 м (после завершения строительства будет самой высокой грунтовой плотиной в мире);

7 водосбросных сооружений туннельного типа (диаметры туннелей 10–15 м) – 5 строительных (СТ1 – СТ5) и 2 эксплуатационных туннельных водосброса верхнего уровня (ТВВУ1 и ТВВУ2), а также эксплуатационный водосброс поверхностного типа (ТВП), расположенные на правом берегу р. Вахш.



Рис. 1. План Рогунской ГЭС

Строительные водосбросы рассчитаны на пропуск расходов $3500 \text{ м}^3/\text{с}$, туннельные эксплуатационные ТВВУ1 и ТВВУ2 – на пропуск $2100 \text{ м}^3/\text{с}$, поверхностный эксплуатационный водосброс ТВП – на пропуск $3500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Строительные водосбросы СТ1 и СТ2 уже используются и будут использоваться в дальнейшем для сброса расходов ($1800 \text{ м}^3/\text{с}$) с агрегатов здания ГЭС.

Пропуск расходов через водосбросные сооружения предусмотрен при напорах 120 – 140 м.

В данной статье рассматриваются результаты гидравлических исследований режимов течений, деформаций русла реки и подпоров здания ГЭС при совместной работе правобережных водосбросных сооружений за исключением эксплуатационного водосброса ТВВУ2, поскольку его выходное сечение расположено в нескольких километрах от выходных сечений остальных правобережных водосбросных сооружений, расположенных на правом берегу в зоне влияния друг на друга (см. рис. 1).

На рис. 2 приведена схема правобережных водосбросных сооружений Рогунской ГЭС.

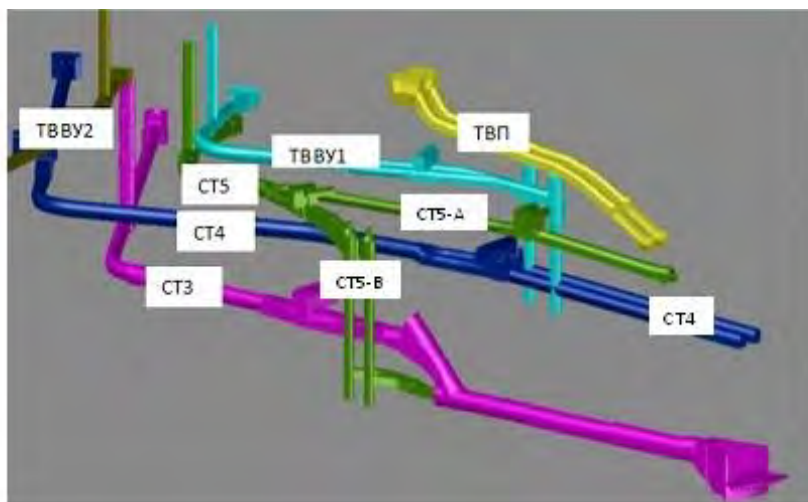


Рис. 2. Правобережные водосбросные сооружения Рогунской ГЭС

На рис. 3 дана схема расположения выходных сечений водосбросных сооружений по высоте правого берега.

Сопряжение сбросных потоков с нижним бьефом осуществляется в одном створе р. Вахш путем отброса струи с носков-трамплинов для сооружений СТ4, одной из веток туннеля СТ5 – СТ5-А в строительный период и для ТВВУ1 и ТВП в эксплуатационный период. Высота носков-трамплинов исследуемых сооружений варьируется относительно бытового УНБ в пределах 76 – 184 м.

В эксплуатационный период для пропуска эксплуатационных расходов из водосброса ТВВУ1 используется концевой участок строительного водосброса СТ4, а для сброса расходов одной из двух веток строительного туннеля СТ5 – СТ5-В используется отводящий участок строительного туннеля СТ3.

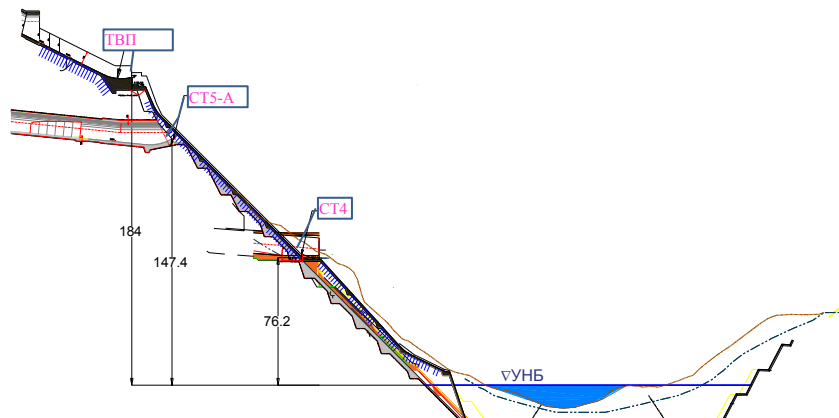


Рис. 3. Схема расположения выходных сечений водосбросных сооружений по высоте правого берега (размеры в метрах)

Строительные туннели СТ1 и СТ2, используемые для отвода в нижний бьеф воды с агрегатов, расположены на расстоянии 200 м выше по течению от створа, где происходит сброс потоков в русло реки с вышелепечисленных водосбросных сооружений.

Строительный туннель СТ3 сопрягается с руслом реки посредством водобойного колодца. Поток воды выходит в русло реки из водобойного колодца на расстоянии около 200 м ниже по течению выходных сечений сооружений: СТ4 (ТВВУ1), СТ5-А и поверхностного водосброса ТВП.

С 2023 г. на Рогунской ГЭС пропуск расходов осуществляется через 2 введенных в действие агрегата ГЭС и уже построенный строительный туннель СТ3.

На рис. 4 и 5 показан выход сбросных потоков в НБ в натуре из уже построенных туннелей СТ1, СТ2 и СТ3.

Последовательность ввода в действие водосбросов и пропуска через них расходов осуществляется по мере наполнения водохранилища и готовности сооружений.



Рис. 4. Выход потока с агрегатов здания ГЭС через строительные туннели СТ1 и СТ2 в натуре



Рис. 5. Сопряжение потока, выходящего из строительного туннеля СТ3, с нижним бьефом в натуре во время паводка

Гидравлические исследования режимов течений в НБ при совместной работе правобережных водосбросных сооружений выполнялись на пространственной физической модели масштаба 1:60 и на математической модели.

На рис. 6 приведена фотография физической модели масштаба 1:60.

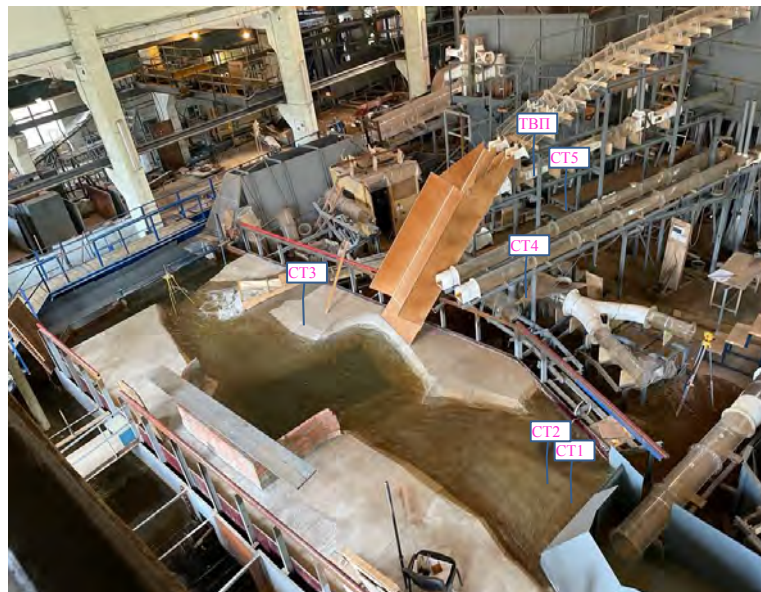


Рис. 6. Вид пространственной физической модели масштаба 1:60

На модели воспроизведен участок русла р. Вахш длиной 1 км и концевые участки сооружений: СТ1, СТ2, СТ3, СТ4 (ТВВУ1), СТ5-А и ТВП.

Русло реки на модели выполнено жестким – из цементной стяжки в соответствии с рельефом дна и берегов.

В месте сопряжения отбрасываемых потоков с водосбросов в русло реки на модели организована яма размыва глубиной 1,25 м (в пересчете на натуру соответствует 75 м).

Яма размыва заполнена несвязным грунтом со средним диаметром 3,4 мм в соответствии с блочностью основания в натуре (10 – 20 см).

Участки туннелей изготовлены из оргстекла, отдельные детали сооружений сделаны из дерева.

Моделирование выполнялось по критерию подобия Фруда Fr с соблюдением геометрического подобия прототипу [1, 2]:

$$Fr = idem, \quad (1)$$

$$Fr = V^2/gh, \quad (2)$$

где V – скорость; h – характерный линейный размер.

При выполнении подобия по Фрудру все полученные в результате эксперимента линейные величины, такие как глубины, скорости течения, расходы воды пересчитываются в натуру по масштабным коэффициентам длины α_l , скорости α_v и расхода α_Q соответственно: $\alpha_v = \alpha_l^{0.5}$; $\alpha_Q = \alpha_l^{2.5}$ [1]. Для модели масштаба 1:60 $\alpha_l = 60$; $\alpha_v = 7,75$; $\alpha_Q = 27885$.

При моделировании движения жидкости в напорных и безнапорных водоводах для достижения подобия сил трения на модели и в натуре определяющим является критерий подобия Рейнольдса (Re)

$$Re = Vh/\nu, \quad (3)$$

где V – скорость; h – характерный линейный размер; ν – кинематический коэффициент вязкости ($\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Для того, чтобы обеспечить выполнение условия автомодельности по критерию Рейнольдса при проведении исследований необходимо соблюдение зависимости

$$Re \geq Re_{кр}, \quad (4)$$

где $Re_{кр}$ – критическое число Рейнольдса.

В выходных сечениях водосбросов и в русле реки, рассматриваемых в данной работе, имеет место безнапорный режим течения.

Критические числа Рейнольдса для выходных сечений сооружений на моделях, выполненных из оргстекла, при безнапорном режиме течения равны $Re_{кр} = (1,0 - 1,5) \cdot 10^5$ [2, 3].

Критические числа $Re_{кр}$ при моделировании русел рек в зоне влияния гидротехнических сооружений составляют $10^3 - 10^4$ [1].

Кроме сил трения на характеристики потока на модели оказывает влияние сила поверхностного натяжения, которая характеризуется числом Вебера (We).

$$We = V/(\sigma/\rho h)^{0.5}, \quad (5)$$

где V – скорость; h – характерный линейный размер; ρ – плотность воды; σ – коэффициент поверхностного натяжения воды ($\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\sigma = 0,073 \text{ кг с}/\text{м}$).

Для обеспечения моделирования силы поверхностного натяжения потока на тракте водотока необходимо соблюдение условия автомодельности по критерию Вебера (We)

$$We \geq We_{кр}. \quad (6)$$

Для обеспечения моделирования траектории отлета струи также необходимо соблюдение условия (6), однако зависимость для определения числа Вебера в случае отброса струи записывается следующим образом

$$We = V/(\sigma/\rho l)^{1/2}, \quad (7)$$

где l – дальность отлета струи.

Критические числа Вебера: $We_{кр} = 100$ при моделировании потоков в водоводах [4] и $We_{кр} = 650$ – в случае моделирования отброса струи [5].

В таблице приведены модельные значения чисел Re в выходных сечениях сооружений и в русле реки и чисел We в выходных сечениях и в отброшенной струе.

Критерии моделирования

Модель	$Re_{\text{вых сеч}}$	$We_{\text{вых сеч}}$	$We_{\text{отброс струи}}$
СТЗ	$(5,4 - 8,1) \cdot 10^5$	181 – 272	
СТ4	$(1,0 - 1,2) \cdot 10^5$	150 – 350	790 – 1800
СТ5-А	$(1,7 - 2,5) \cdot 10^5$	103 – 116	670 – 720
ТВП	$(1,4 - 3,2) \cdot 10^5$	100 – 160	980 – 1540
Русло реки	$3,9 \cdot 10^4 - 3,0 \cdot 10^5$		

Как видно из таблицы, при проведении экспериментов диапазон чисел Рейнольдса в выходных сечениях водосбросных сооружений на модели равен $Re = (1,0 - 8,1) \cdot 10^5$, а в русле реки $3,9 \cdot 10^4 - 3,0 \cdot 10^5$, что соответствует автомодельной области.

Таким образом, условие автомодельности (4) по обеспечению подобия сил трения на модели и в натуре при проведении исследований выполняется.

Диапазон чисел Вебера в выходных сечениях моделей равен $We = 100 - 350$, а при отбросе струи значения чисел Вебера составляют $We = 670 - 1800$, то есть обеспечивается автомодельность по числу Вебера как на тракте туннеля, так и при отбросе струи в русло реки.

Таким образом, условия автомодельности (6) и (7) по обеспечению подобия поверхностного натяжения на модели и в натуре при проведении исследований выполняется.

Для измерений на модели использовалась следующая аппаратура:

расход воды измерялся с помощью прямоугольного мерного водослива с тонкой стенкой, установленного в сбросном лотке модели (погрешность измерения 2–3 %);

уровни воды в русле реки измерялись мерной иглой (точность измерения 0,1 мм);

скорости течения в русле реки измерялись вертушкой, диапазон измерения 0,05–10 м/с, диаметр крыльчатки 11 мм (погрешность измерения 2 %);

деформации грунта, слагающего русло реки, определялись с помощью нивелира (точность измерения 0,5 мм).

В задачи исследований входило:

1. Изучение режимов течения в НБ (в русле р. Вахш) при совместной работе правобережных водосбросных сооружений.

2. Изучение деформаций русла при совместной работе правобережных водосбросных сооружений.

3. Определение предельного расхода, сбрасываемого в НБ, при котором возможна работа агрегатов.

4. Разработка рекомендаций по креплению русла и берегов в НБ в зоне воздействия сбросных потоков при совместной работе правобережных водосбросных сооружений.

Исследования проводились для различных комбинаций совместной работы сооружений и пропуске через них суммарных расходов в диапазоне 4000 – 8900 м³/с.

На рис. 7 и 8 показаны режимы течения на модели в нижнем бьефе при совместном пропуске расходов через водосбросные сооружения.



Рис. 7. Общий вид на отброс струи и режим течения в НБ при пропуске суммарного расхода 4300 м³/с через 1 ветку строительного туннеля СТ4 и 1 ветку строительного туннеля СТ5 (СТ5-А)



Рис. 8. Общий вид на отброс струи и режим течения в НБ при пропуске суммарного расхода 7350 м³/с через 1 ветку строительного туннеля СТ5 (СТ5-А), 1 ветку эксплуатационного туннеля ТВВУ1 и поверхностный водосброс ТВП

На рис. 9 и 10 приведены схемы, на которых показаны дальность и характер отброса струи каждого сооружения при совместном пропуске расходов.

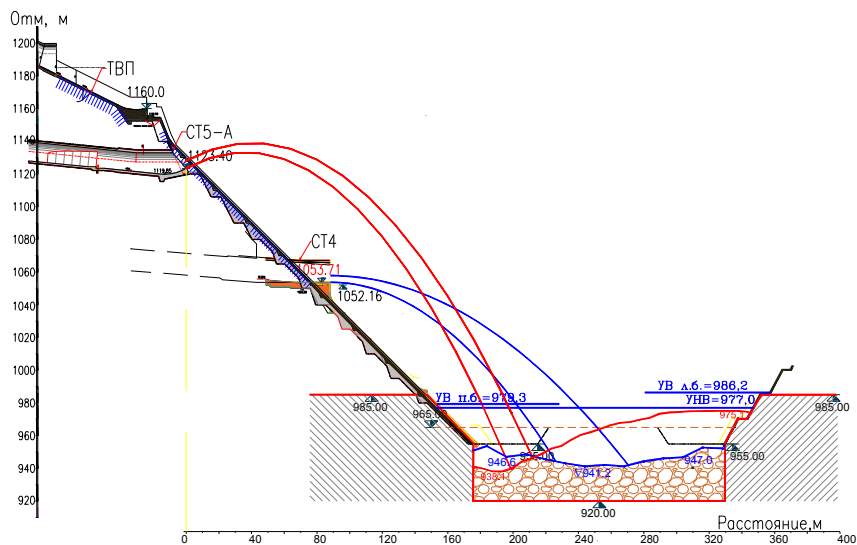


Рис. 9. Схема отброса струи при сопряжении сбросного потока с НБ при пропуске суммарного расхода $4300 \text{ м}^3/\text{с}$ через 1 ветку строительного туннеля СТ4 и 1 ветку строительного туннеля СТ5 (СТ5-А)

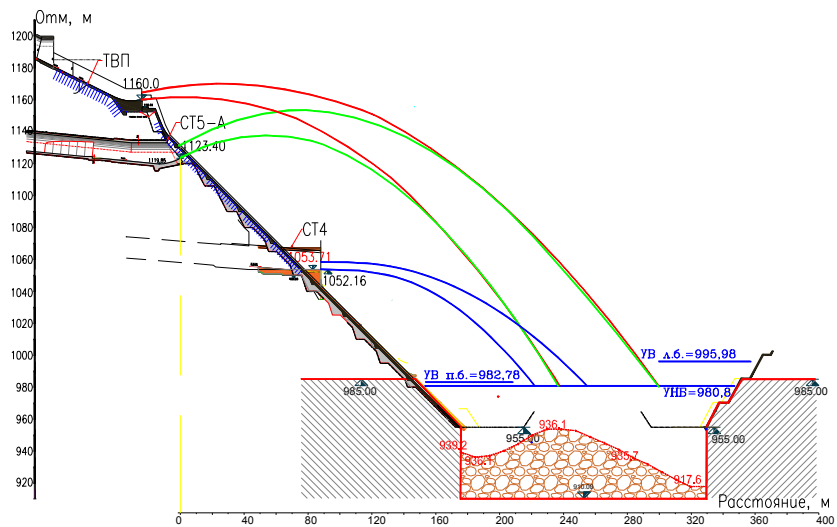


Рис. 10. Схема отброса струи при сопряжении сбросного потока с НБ при пропуске суммарного расхода $7350 \text{ м}^3/\text{с}$ через 1 ветку строительного туннеля СТ5 (СТ5-А), 1 ветку эксплуатационного туннеля ТВВУ1 и поверхностный водосброс ТВП

Из приведенных выше материалов исследований видно, что при пропуске строительных расходов (см. рис. 7, 9) при совместной работе 1 ветки водосброса СТ4 и 1 ветки водосброса СТ5 (СТ5-А) струя из водосброса СТ4 отбрасывается несколько дальше, чем струя, отбрасываемая с ветки водосброса СТ5 - СТ5-А.

Следует отметить, что выходные сечения указанных водосбросов также смещены в плане друг от друга. Дальность отброса струи от носка водосброса СТ4 составляет 115–150 м от носка ветки водосброса СТ5-СТ5-А – 180–200 м.

Наибольшая глубина размыва при этом достигает 40 м у правого берега и около 30 м у левого берега.

При пропуске эксплуатационных расходов, близких к расчетным, через еще работающую 1 ветку водосброса СТ5 (СТ5-А), 1 ветку эксплуатационного водосброса ТВВУ1 и через поверхностный водосброс ТВП, состоящий из 2 веток (см. рис. 8, 10), траектории струй от водосбросов СТ5-А и ТВП практически совпадают.

В плане зоны сопряжения струй с нижним бьефом от водосбросов СТ5-А и ТВП практически совпадают, а направление струй от туннеля СТ4 смещено в сторону против течения.

Дальность отброса струй от носка водосброса составляет: 237–300 м для водосброса СТ5-А, 135–165 м для водосброса ТВВУ1 (СТ4) и 260–325 м для водосброса ТВП.

При пропуске расхода 7350 м³/с глубина размыва у правого берега составляет 40–45 м, а у левого – больше 50 м.

В середине русла реки в зоне сброса потоков с водосбросных сооружений образуется небольшой бар, обусловленный водоворотной областью.

В задачи исследований входило изучение режимов течений и деформаций не только русла реки в месте сопряжения струй, сбрасываемых с водосбросных сооружений, но и воздействие сбросных потоков на берега реки.

На рис. 11 и 12 представлены графики изменения уровня воды (УВ) вдоль берегов русла. Створ «0» соответствует выходу потоков с гидроагрегатов (туннели СТ1 и СТ2).

Зона отброса струй с водосбросных сооружений находится на расстоянии 250–450 м от выхода потоков с агрегатов.

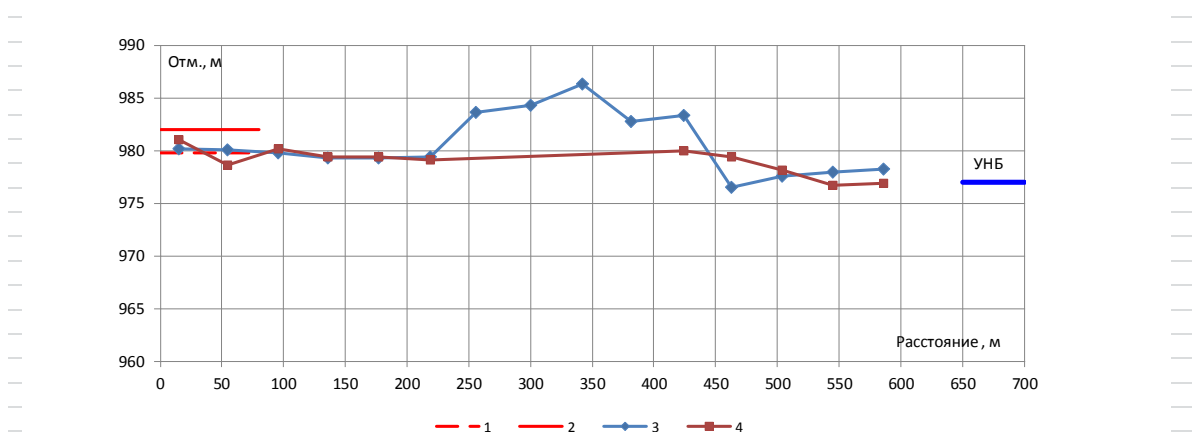


Рис. 11. Изменение УВ вдоль берегов русла при сопряжении сбросного потока с НБ при пропуске суммарного расхода 4300 м³/с через 1 ветку строительного туннеля СТ4 и 1 ветку строительного туннеля СТ5 - СТ5-А:

1 – предельный УВ, обеспечивающий эксплуатацию турбин; 2 – предельный УВ, вызывающий остановку турбин; 3 – УВ вдоль левого берега; 4 – УВ вдоль правого берега

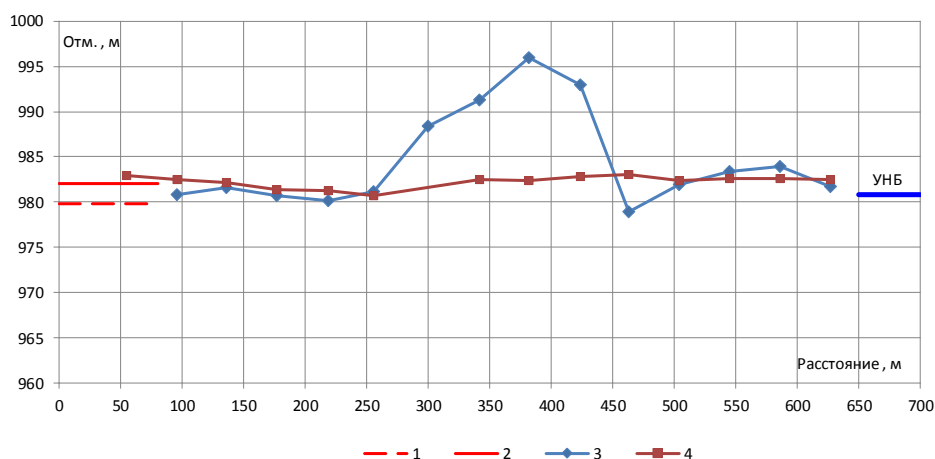


Рис. 12. Изменение УВ вдоль берегов русла при сопряжении сбросного потока с НБ при пропуске суммарного расхода $7350 \text{ м}^3/\text{с}$ через 1 ветку строительного туннеля СТ5 – СТ5-А, 1 ветку эксплуатационного туннеля ТВВУ1, поверхностный водосбор ТВП: 1 – предельный УВ, обеспечивающий эксплуатацию турбин; 2 – предельный УВ, вызывающий остановку турбин; 3 – УВ вдоль левого берега; 4 – УВ вдоль правого берега

Изучение уровня режима вдоль берегов показало, что при входе струй в воду образуется гидравлической прыжок, достигающий левого берега реки в створе их отброса.

Накат потока на левый берег способствует увеличению отметок уровней воды у левого берега и некоторое их понижение под отбрасываемой струей у правого берега.

При накате потока на левый берег отметки УВ повышаются до 5,5 м относительно среднего УВ в русле при суммарном сбросном расходе $4300 \text{ м}^3/\text{с}$ и до 12 м при суммарном расходе $7350 \text{ м}^3/\text{с}$, что необходимо учитывать при устройстве крепления левого берега, где проходит автодорога.

Изучение распределения УВ в русле было также необходимо для определения предельного паводкового расхода, сбрасываемого в НБ, при котором возможна работа агрегатов.

В проекте заданы значения предельного УВ у выхода потока с агрегатов, при котором обеспечивается эксплуатация турбин и предельного УВ, вызывающего остановку турбин.

На рис. 13 приведен график зависимости УВ у выхода потоков с агрегатов (туннели СТ1 и СТ2) от суммарного сбросного расхода водосбросных сооружений.

Как видно из рис. 13, подпор здания ГЭС, то есть превышение уровней воды у выхода из туннелей СТ1 и СТ2 по сравнению с УНБ, закономерно увеличивается с ростом сбросного расхода в НБ и в строительный период достигает 1,5 м, а в период эксплуатации 2,0 – 2,5 м. При расходах, которые превышают $5000 \text{ м}^3/\text{с}$, УВ близки к обеспечивающим гарантированную эксплуатацию турбин, поэтому эффективная работа здания ГЭС возможна только при меньших расходах.

В интервале сбросных расходов от 5000 до $6000 \text{ м}^3/\text{с}$ работа здания ГЭС нецелесообразна. При расходах, которые больше $6000 - 6500 \text{ м}^3/\text{с}$, происходит автоматическая остановка турбин.

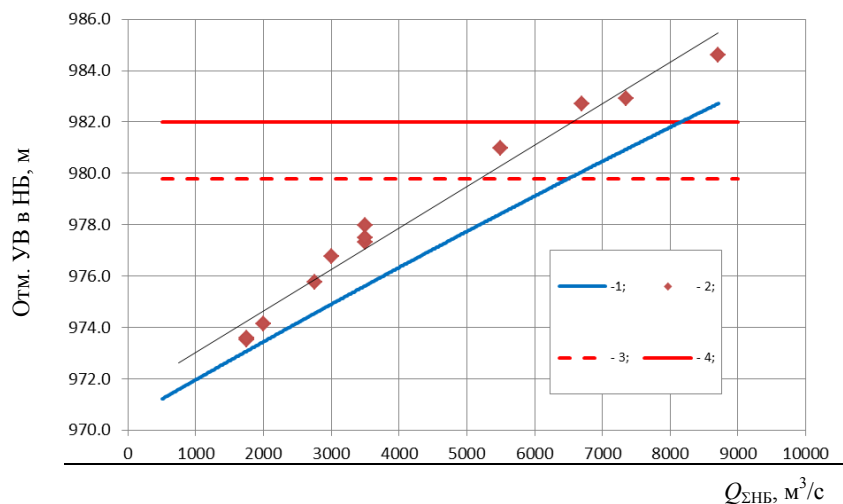


Рис. 13. Зависимость УВ у выхода воды с агрегатов (туннели СТ1 и СТ2) от сбросного расхода НБ:

- 1 – кривая связи УНБ и расхода в НБ; 2 – УВ у выхода из туннелей СТ1 и СТ2 (здание ГЭС);
 3 – предельный УНБ, обеспечивающий эксплуатацию турбин; 4 – предельный УНБ, вызывающий остановку турбин

При проведении исследований выполнялось измерение скоростей течений в русле р. Вахш в НБ правобережных водосбросных сооружений.

На рис. 14 приведены эпюры средних по глубине скоростей течения в русле р. Вахш при сбросе в НБ суммарного расхода $5600 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует расчетному расходу строительного периода. Створы измерения расположены друг от друга на расстоянии 60 м в пересчете на натуру. Створ 2 у правого берега соответствует выходу потоков с агрегатов ГЭС (туннели СТ1 и СТ2).

Скорости течения в гидравлическом прыжке в зоне наката потока на левый берег достигают $5,5 - 6,5 \text{ м/с}$. Также зафиксированы водоворотные зоны с направлением части потока под струю и в сторону верхнего бьефа.

Наибольшие скорости течения, достигающие $6,5 - 8,5 \text{ м/с}$, наблюдаются у левого берега сразу за зоной расширения русла реки (створа сопряжения сбросных потоков).

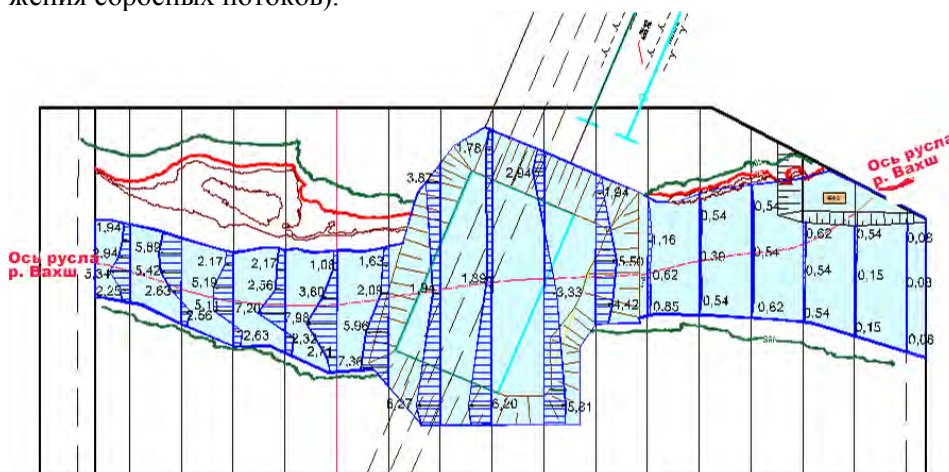


Рис. 14. Скорости течения в НБ при пропуске суммарного расхода $5600 \text{ м}^3/\text{с}$

Полученные результаты по величине УВ и скоростей течений в зоне влияния сбросных потоков при совместной работе сооружений должны быть учтены при проектировании крепления русла и берегов реки.

В рамках выполнения работы, посвященной исследованиям режимов течения при совместной работе правобережных водосбросных сооружений Рогунской ГЭС, кроме физического было выполнено математическое моделирование с использованием программного комплекса Flow-3D.

Для проведения исследований была создана математическая модель ММ4, включающая в себя геометрию концевых участков водосбросов и участок русла р. Вахш в нижнем бьефе. Деформации русла реки на этой модели не изучались, однако при выполнении расчетов учитывались деформации русла, определенные в процессе проведения экспериментов на физической модели.

Параметры модели:

Размер ячейки расчетной сетки выбран $1 \times 1 \times 1$ м. Сетка прямоугольная, одноблочная, коэффициент шероховатости поверхности $k_{\text{F3D}}=0,000055$, что соответствует эквивалентной шероховатости $k_s = 1$ мм.

Модель турбулентности $k - \epsilon$.

Граничные условия:

Расход и уровень воды в туннеле, соответствующий каждому сооружению на границе x_{min} .

Расход в р. Вахш, имитирующий расход через ГЭС на границе y_{max} .

Уровень воды, соответствующий суммарному расходу через водосбросы и ГЭС на границе y_{min} , направление течения $-y$.

Остальные границы модели непроницаемые (Wall).

Результаты исследований, полученные на математической модели, приведены на рис. 15 – 17.

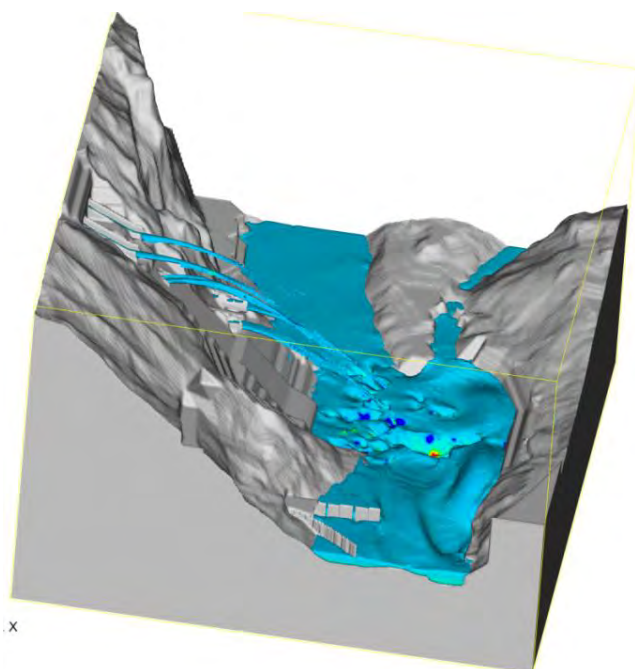


Рис. 15. Поперечный разрез в районе выхода туннелей СТ4, СТ5-А и ТВП при совместном пропуске расходов (по данным математического моделирования)

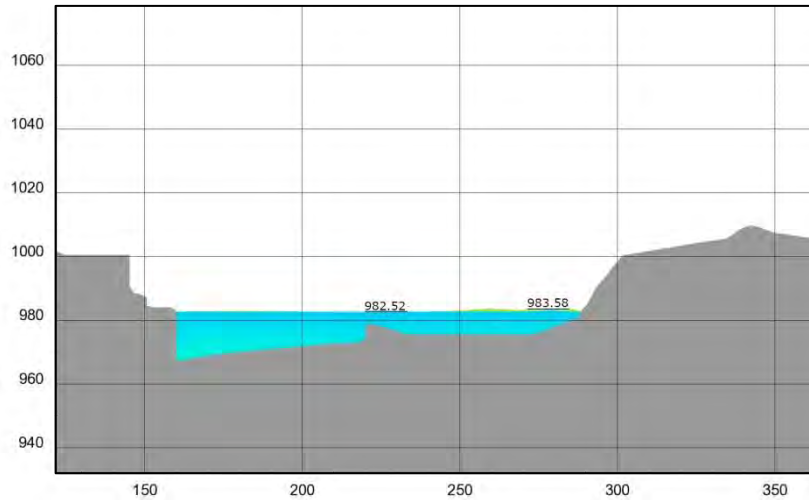


Рис. 16. УВ у выхода потока с агрегатов в НБ по данным математического моделирования

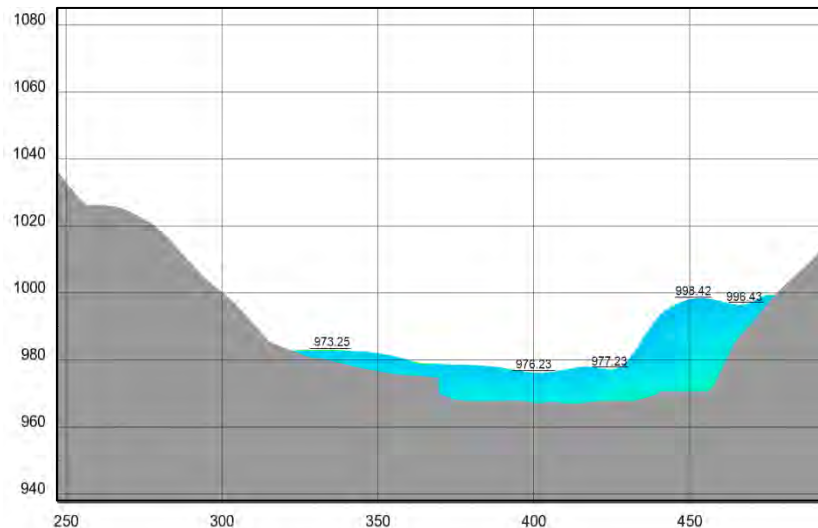


Рис. 17. УВ в реке в створе сопряжения сбросных потоков водопропускных сооружений с НБ (по данным математического моделирования)

На рис. 15 видны траектории отброса струи при совместной работе водосбросов ТВВУ1 (СТ4), СТ5-А и ТВП, а на рис. 16 и 17 приведено распределение УВ по ширине русла у выхода потоков с агрегатов и в створе сопряжения сбросных потоков с НБ соответственно.

Сравнение результатов, полученных на математической модели, с результатами экспериментов на физической модели показало аналогичные результаты по характеру режима течений и величине УВ в НБ (см. рис. 12 и рис. 16, 17), также имеет место хорошее совпадение формы траекторий и дальности отброса струи с носков-трамплинов водосбросов (см. рис. 10 и рис. 15).

Заключение

По результатам гидравлических исследований на пространственной физической модели масштаба 1:60 и математической модели, посвященных изучению режимов течения и деформаций русла р. Вахш в НБ при совместной работе правобережных водосбросных сооружений Рогунской ГЭС, можно сделать следующие выводы:

1. Исследования на физической модели работы не одного водосбросного сооружения, как принято при проведении подобных исследований, а одновременной работы нескольких водосбросов, является уникальным опытом.

2. В результате исследований получены параметры потока в НБ (УВ, скорости течения, данные о деформациях русла), позволившие разработать рекомендации по креплению русла и берегов в зоне сопряжения сбросных потоков с НБ.

3. Изучение уровня режима у выхода потоков с агрегатов ГЭС при работе ГЭС и водосбросов позволило определить величину подпора ГЭС и предельные сбросные расходы, при которых эффективна работа агрегатов и при которых происходит их автоматическое отключение.

4. Сравнение результатов исследований на физической и математической моделях показало аналогичные результаты по характеру режима течений и величине УВ в НБ, а также по форме траектории отброса струи с носков-трамплинов сооружений и дальности ее отброса.

5. Результаты исследований показали, что режим течения в НБ при совместной работе водосбросных сооружений, расположенных на правом берегу р. Вахш, является приемлемым и позволяет пропускать расходы в соответствии с Проектом с учетом рекомендаций, разработанных по результатам исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Левин И.И.** Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967.
2. **Ляхтер В.М., Прудовский А.М.** Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. **Гидравлические** расчеты туннельных и трубчатых водосбросов гидрозлов // Рекомендации для проектирования. Л.: Энергия. 1974. С. 82-83.
4. **Chanson H.** The hydraulics of stepped chutes and spillways. 2002.
5. **Таварткиладзе Н.Е.** О некоторых характеристиках потоков, свободно падающих с гребней высоких арочных плотин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. 1969. Вып. 52. Л.: Энергия. С. 507-518.

REFERENCES

1. Levi I.I. Modeling of hydraulic phenomena. Leningrad, Energia, 1967. 235 p. (In Russ.).
2. Lyakhter V.M., Prudovsky A.M. Hydraulic modeling. Energoatomizdat, Moscow, 1984. (In Russ.).
3. Hydraulic calculations of tunnel and tubular spillways of hydraulic structures. Recommendations for design. Leningrad, Energia, 1974. pp. 82-83. (In Russ.).
4. Chanson H. The hydraulics of stepped chutes and spillways, 2002.

5. Tavartkiladze N.E. Concerning some characteristics of flows freely falling from the crests of high arch dams. Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering. 1969. 52-th edition. Leningrad, Energia, 1969. (In Russ.).

Информация об авторах

М.В. Алексеевская – старший научный сотрудник;
Г.А. Судольский – канд. техн. наук, заведующий лабораторией;
А.В. Шиляев – ведущий инженер;
Ф.А. Холов – менеджер проекта.

Information about the authors

M.V. Alekseevskaya – Senior Researcher;
G.A. Sudolsky – Ph.D. Tech. Sciences, Head of Laboratory;
A.V. Shilyaev – Lead Engineer;
F.A. Holov – Project Manager.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 14.11.2023; approved after reviewing 31.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Научная статья
УДК 624.04

ЯКОРНЫЕ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ ПЛАВУЧИХ ОБЪЕКТОВ: ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ЦЕПНОЙ ЛИНИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ГИБКИХ СВЯЗЕЙ

Владимир Васильевич Мищенко

АО «Ленгидропроект», Санкт-Петербург, Россия, MishchenkoVV@lhp.ru

Аннотация. Программный комплекс «Anchored Structures» позволяет рассчитывать якорные связи различных конфигураций, учитывая их растяжение, наличие масс и плавучестей, расположенных на связях, жесткости связи на растяжение, возможности укладки части связи на дно акватории, которое, в свою очередь, может иметь наклон. Представленный метод расчета якорных связей на основе параметрического уравнения цепной линии позволяет решать аналогичные задачи с использованием стандартных математических программ (например, Mathcad).

Ключевые слова: *якорная система удержания, цепная линия, реакция якорной связи*

Для цитирования: Мищенко В.В. Якорные системы удержания плавучих объектов: параметрическое уравнение цепной линии при расчете гибких связей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 124–135.

Original article

ANCHOR SYSTEMS FOR HOLDING FLOATING OBJECTS: PARAMETRIC EQUATION OF A CHAIN LINE WHEN CALCULATING FLEXIBLE LINKS

Vladimir V. Mishchenko

JSC «Lenhydroproject», Saint Petersburg, Russia, MishchenkoVV@lhp.ru

Abstract. The software «Anchored Structures» allows you to calculate anchor connections of various configurations, while taking into account their stretching, the presence of masses and buoyancy located on the ties, the rigidity of the tension connection, the possibility of laying part of the connection to the bottom of the water area, which, in turn, may have a slope. The presented method of calculating anchor connections based on the parametric equation of the chain line allows solving similar problems using standard mathematical programs (for example, Mathcad).

Keywords: *anchor retention system, chain line, anchor bond reaction*

For citation: Mishchenko V.V. Anchor systems for holding floating objects: parametric equation of a chain line when calculating flexible links. *Proceedings of the VNIIG*. 2024;311:124-135. (In Russ.).

Проектирование якорных систем удержания строится на расчете гибких связей, которые при анализе устойчивости плавучего объекта моделируют работу якорных цепей (тросов, канатов). Влияние системы удержания на поведение плавучего объекта в процессе его смещения под действием возможных (волновых, ветровых и т.д.) нагрузок выражается в виде реакции якорной связи в точке ее крепления к объекту. Очевидно, что лю-

бое смещение точки крепления гибкой связи к плавучему объекту (ключевой точки) относительно неподвижного якоря изменяет реакцию якорной связи.

Реакция якорной связи на перемещения плавучего объекта моделируется при анализе как односторонняя связь задаваемой жесткости. Упрощая, систему якорного удержания при расчете можно заменить набором отдельных растянутых пружин (односторонних связей), прикрепленных к объекту в заданных местах (ключевых точках). Если плавучий объект рассматривать как абсолютно жесткое тело, то мгновенная жесткость каждой пружины зависит только от перемещения ключевой точки и не зависит от реакции других пружин (рис. 1).

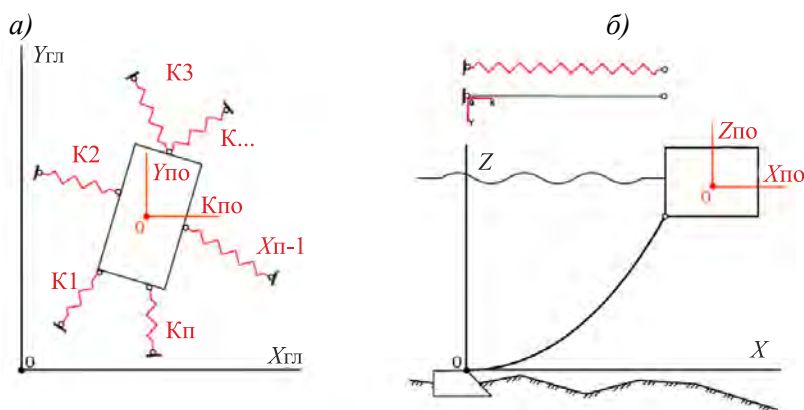


Рис. 1. Якорная система удержания плавучего объекта – набор независимых пружин (а). Локальная система координат для расчета отдельной якорной связи (б)

Таким образом, расчет якорных систем удержания плавучих объектов можно разделить на две последовательные задачи:

определение жесткости (реакции) отдельной якорной связи заданной конструкции на перемещение ключевой точки крепления относительно неподвижного якоря;

анализ поведения плавучего объекта на заданные нагрузки с учетом опорных реакций от односторонних гибких связей с определенной на предыдущем этапе жесткостью.

Статья посвящена решению первой из указанных выше задач: определению жесткости (реакции) отдельной якорной связи при относительном смещении точек крепления.

Расчетная схема якорной связи – гибкая растяжимая тяжелая нить, закрепленная в крайних точках. Кривая провисания – цепная линия. Существующие методы расчета используют *явное* уравнение цепной линии, когда координата Z кривой провисания задается непосредственно как функция от координаты X

$$z(x) = a \operatorname{ch} \frac{x}{a}. \quad (1)$$

Введем параметр t , который равен тангенсу угла между касательной к цепной линии и осью X

$$t = dz/dx = sh \frac{x}{a}. \quad (2)$$

Тогда уравнение цепной линии можно записать в *параметрическом* виде, когда координаты X и Z есть функция введенного параметра t

$$x(t) = a \ln(t + \sqrt{t^2 + 1}), \quad (3,a)$$

$$z(t) = a\sqrt{t^2 + 1}. \quad (3,b)$$

Длина дуги между двумя любыми точками A и B цепной линии в параметрическом виде

$$L_{AB} = a(t_B - t_A). \quad (4)$$

Геометрическая характеристика цепной линии a – коэффициент подобия или масштабный коэффициент – связана с механическими характеристиками кривой провисания тяжелой гибкой нити следующим отношением

$$a = H/q, \quad (5)$$

где H – горизонтальная составляющая тяжения (распор); q – погонная нагрузка на гибкую связь.

Тяжение в произвольной точке цепной линии с параметром t

$$T(t) = aq\sqrt{t^2 + 1} = H\sqrt{t^2 + 1}. \quad (6)$$

Параметрическое уравнение цепной линии (3) и связанные с ним уравнения (4)–(6) позволяют формулировать конкретную задачу расчета гибкой якорной связи в виде системы разрешающих уравнений, объединяющей заданные величины и искомые переменные. При этом сама задача сводится к двум относительно независимым в части исполнения этапам: инженерному и численному.

Инженерный этап заключается в правильной формулировке системы разрешающих уравнений. В качестве примера далее сформулированы разрешающие системы для наиболее распространенных, по мнению автора, задач расчета гибкой якорной связи с использованием параметрического уравнения цепной линии. Цель всех задач – определить реакцию (жесткость) связи, в том числе при относительном смещении точек ее крепления.

Численное решение сформулированной системы возможно в любой математической программе, реализующей численные методы решения систем нелинейных уравнений. Найденный результат позволяет найти мгновенную жесткость якорной связи – реакцию связи как при исходном ее положении, так и при смещении клюзовой точки.

Геометрическая задача. Известно взаимное расположение точек крепления якорной связи: X – горизонтальное расстояние; Z – вертикальное расстояние, а также длина гибкой связи L . Геометрическое положение кривой провисания – дуга цепной линии длиной L , проходящей через точки крепления 1 и 2 (рис. 2) – однозначно определяется при известном коэффициенте цепной a и известных значениях параметра в точках крепления t_1 и t_2 . Для этого необходимо решить систему трех уравнений:

$$\begin{cases} X = a \left[\ln(t_2 + \sqrt{t_2^2 + 1}) - \ln(t_1 + \sqrt{t_1^2 + 1}) \right], \\ Z = a \left(\sqrt{t_2^2 + 1} - \sqrt{t_1^2 + 1} \right), \\ L = a(t_2 - t_1). \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) решается в Mathcad при помощи встроенного оператора *find*, предназначенного для численного решения систем уравнений. При использовании стандартных математических программ, таких как Mathcad, инженеру-проектировщику не требуется «погружаться» в численные методы либо искать аналитическое инженерное решение путем введения «допущений», упрощающих расчетную схему. Чаще всего ценой введенных допущений оказывается потеря точности результатов либо серьезное ограничение области применения аналитического инженерного метода, построенного на этих допущениях.

Решение системы (7) – тройка найденных значений неизвестных величин a , t_1 и t_2 – позволяет найти геометрическое положение любой промежуточной точки со значением параметра $t_1 \leq t \leq t_2$ при помощи (3) и (4), а также значение тяжения с использованием (5) и (6).

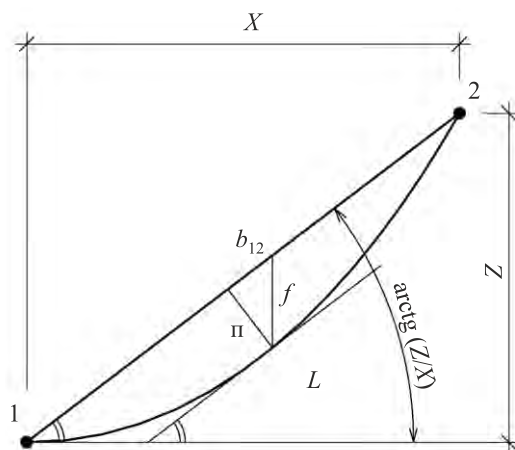


Рис. 2. Геометрическая задача: определение кривой провисания гибкой связи заданной длины L при известном взаимном расположении точек крепления 1 и 2

Обозначив кратчайшее расстояние между точками подвеса b_{12} , длину гибкой связи L можно выразить через монтажное удлинение δ_L (превышение длины связи относительно кратчайшего расстояния между точками крепления) следующим образом

$$L = b_{12}(1 + \delta_L). \quad (8)$$

Последнее уравнение в системе (7) соответствует условию: длина гибкой связи после монтажа известна и равна значению L . Если принимаем, что $L = \text{const}$, то решение системы (7) дает кривую провисания для «нерастяжимой гибкой нити». Необходимо отметить: при более строгом обосновании [5] указано, что L – это геометрическая длина, которая может быть принята в физическом плане как для недеформируемого, так и для растянутого состояния гибкой нити.

Предварительное натяжение. Часто длина якорной связи неизвестна, но известно ее предварительное (монтажное) натяжение $T_{\text{монт}}$ в клюзовой точке (рис. 3). Необходимо отметить, что гибкие связи в момент фиксации их длины в клюзовой точке всегда являются предварительно натянутыми. Натяжение гибких связей, в том числе «свободно провисающих», обеспечивает погонная нагрузка q , которая включает в первую очередь ее собственный вес.

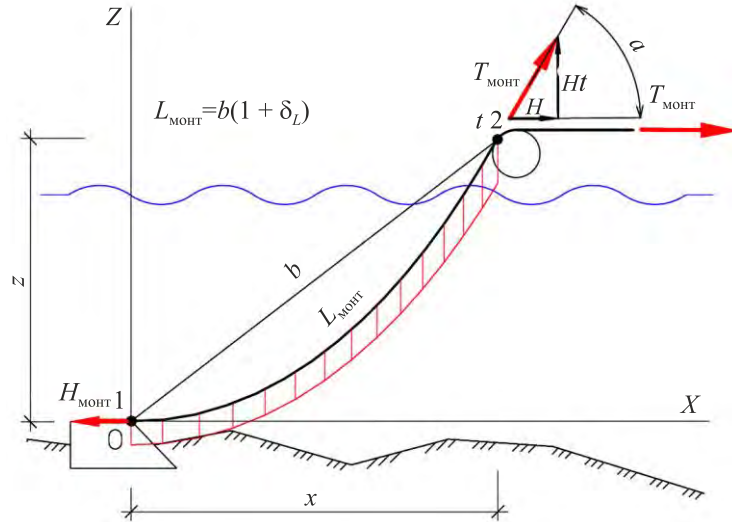


Рис. 3. Геометрическая задача: определение кривой провисания гибкой связи заданной длины L при известном взаимном расположении точек крепления 1 и 2

Покажем, что предварительное натяжение якорной связи $T_{\text{монт}}$ однозначно определяет величину монтажного удлинения δ_L . Для этого, заменив в системе (7) последнее уравнение на (6), получим

$$\begin{cases} X = a \left[\ln(t_2 + \sqrt{t_2^2 + 1}) - \ln(t_1 + \sqrt{t_1^2 + 1}) \right], \\ Z = a \left(\sqrt{t_2^2 + 1} - \sqrt{t_1^2 + 1} \right), \\ T_{\text{монт}} = aq\sqrt{t_2^2 + 1}. \end{cases} \quad (9)$$

Решив систему (9) в Mathcad, найдем неизвестные a , t_1 и t_2 . Подставив длину гибкой связи по формуле (4) в (8), получим после преобразования следующее выражение

$$\delta_L = \frac{a(t_2 - t_1)}{\sqrt{X^2 + Z^2}} - 1. \quad (10)$$

Очевидно, что верно и обратное утверждение: величина монтажного удлинения δ_L однозначно определяет предварительное натяжение якорной связи $T_{\text{монт}}$.

Физическое уравнение. Для расчета якорных связей применяются расчетные схемы как недеформируемой [2], так и деформируемой гибкой нити с осевой жесткостью при растяжении EF [1,3]. Очевидно, что любая гибкая связь после монтажа деформируется под действием тяжения, то есть происходит ее удлинение на относительную величину δ_e . На рис. 4

представлено положение недеформируемой (монтажной) заготовки сразу после монтажа, что соответствует условию $EF=\infty$. После деформации под действием тяжения длина гибкой нити увеличится, то есть деформированная гибкая связь получит дополнительный провис, вызванный упругим удлинением (рис. 4).

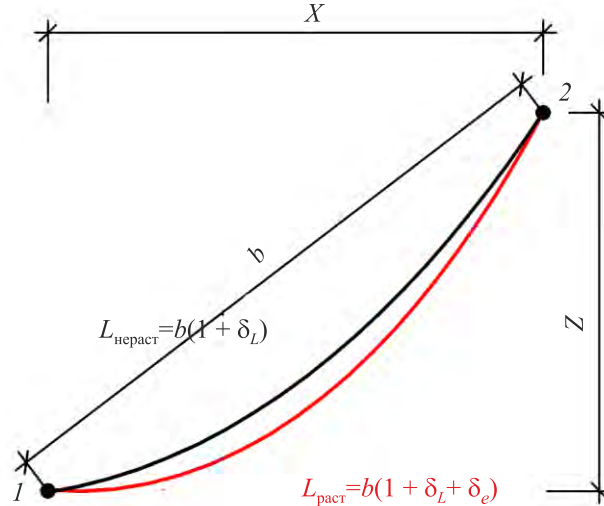


Рис. 4. Удлинение гибкой связи после монтажа под действием тяжения

Для «растяжимой гибкой нити» последнее уравнение в системе (7) необходимо заменить на *физическое* уравнение, которое связывает длину нерастянутой монтажной заготовки (длина якорной связи, в которой отсутствует тяжение, например, когда она лежит на земле) с ее деформированным состоянием после монтажа. Для удобства восприятия *физическое* уравнение представлено ниже как система 3-х уравнений, из которой путем последовательного исключения величин T_{ef} и δ_e легко получить единое выражение:

$$\begin{cases} a(t_2 - t_1) = b_{12}(1 + \delta_L + \delta_e), \\ \delta_e = \frac{T_{ef}}{EF}, \\ T_{ef} = \frac{\frac{aq}{2} \left(t_2 \sqrt{t_2^2 + 1} - t_1 \sqrt{t_1^2 + 1} + \ln \frac{t_2 + \sqrt{t_2^2 + 1}}{t_1 + \sqrt{t_1^2 + 1}} \right)}{t_2 - t_1}, \end{cases} \quad (11)$$

где T_{ef} – действующее тяжение – фиктивное равномерное тяжение, действие которого вызывает упругую деформацию связи, равную деформации под действием фактического тяжения, неравномерного по длине связи (рис. 5).

Уравнения равновесия. Для расчета однородной якорной связи достаточно решить систему трех уравнений: систему геометрических уравнений (7), в которой последнее уравнение заменено на физическое уравнение (11). Как отмечалось ранее, результатом решения являются значения неизвестных: коэффициента цепной линии a , параметров в точках крепления t_1 и t_2 .

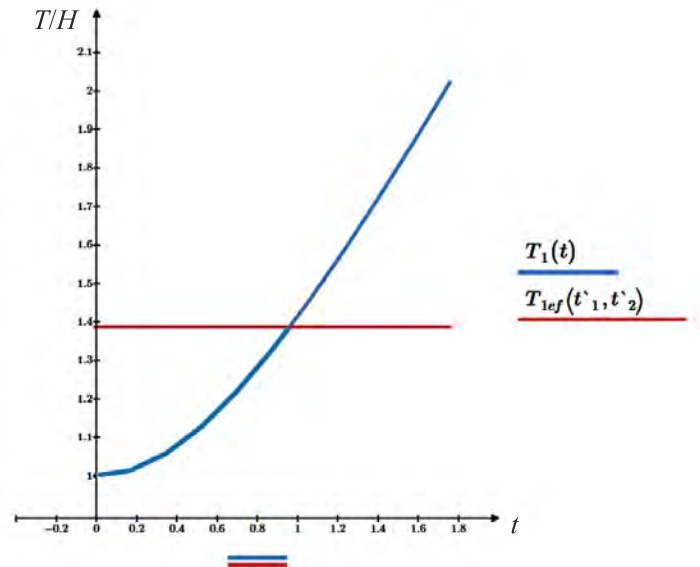


Рис. 5. Фактическое тяжение (синий цвет) и «действующее» значение (красный цвет)

Для комбинированных якорных связей (цепь–трос) или в случае применения плавучестей и массивов количество уравнений разрешающей системы увеличивается. Если в комбинированной связи имеется N последовательных однородных гибких элементов, тогда общее количество геометрических и физических уравнений системы составит $3N$. Дополнительно в промежуточных узлах, в которых сходятся разные гибкие элементы или приложена сосредоточенная сила, можно составить *уравнения равновесия* (рис. 6, а). Количество уравнений равновесия в промежуточных узлах для плоской задачи составит $2(N-1)$. При необходимости можно составить уравнения равновесия во внешних узлах связи (якорном и клюзовом). Так, в системе (9) последнее уравнение является уравнением равновесия в клюзовой точке.

На рис. 6 представлены примеры решения простых разрешающих систем с уравнениями равновесия в промежуточных узлах: при сосредоточенной вертикальной нагрузке (рис. 6, б), для комбинированной связи «легкий трос (внизу) – тяжелая цепь (вверху)» и наоборот (рис. 6, в и 6, г, соответственно). Результаты представлены в виде графика изменения тяжения T вдоль оси X якорной связи.

Исходное состояние и смещение клюзовой точки. Геометрию кривой провисания гибкой связи определяет длина монтажной заготовки L_M – длина нерастянутой связи до ее монтажа (на рис. 7 отмечено черным цветом). Фактическое положение якорной связи после монтажа, когда происходит фиксация ее «растянутой» длины в клюзовой точке, на рис. 7 отмечено красным цветом. Послемонтажная длина якорной связи L в результате упругого удлинения на относительную величину δ_e превышает длину монтажной заготовки L_M . Подставляя значения заданных координат X и Z , определяющих исходное положение клюзовой точки, в систему (7) с учетом физического уравнения (11), можно найти соответствующие искомые неизвестные a , t_1 и t_2 .

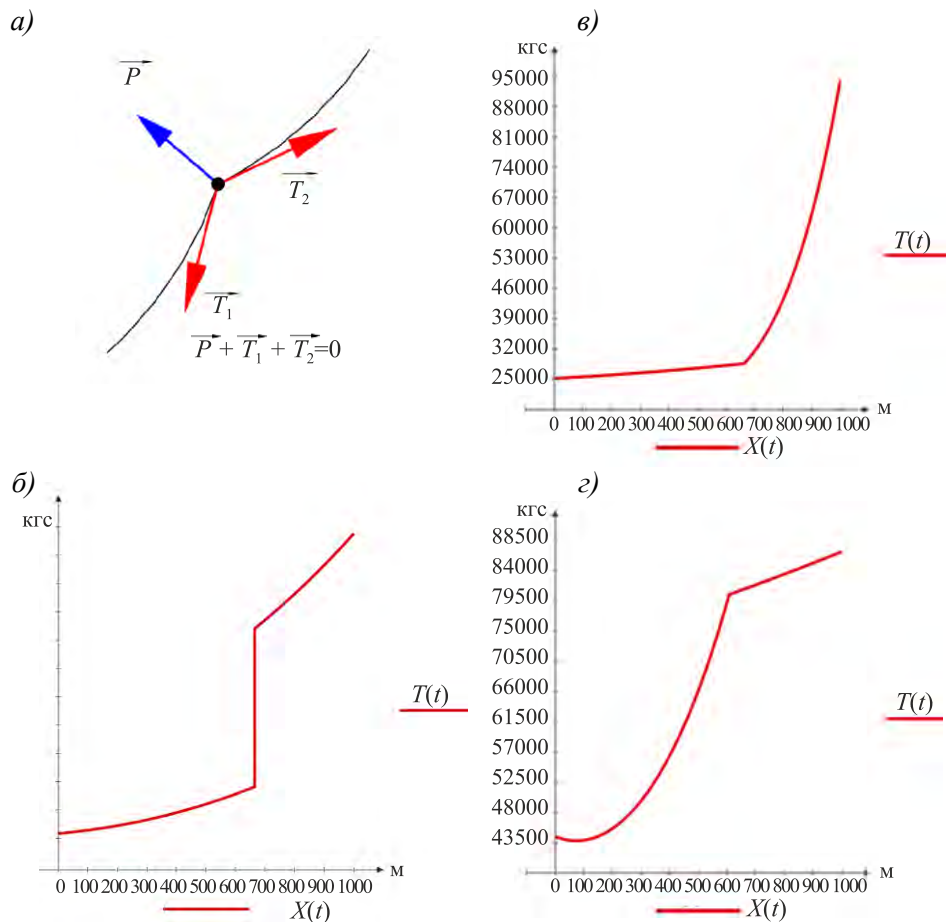


Рис. 6. Уравнение равновесия в промежуточном узле (а). Примеры тяжения в якорной связи: при наличии подвешенного груза (б), для комбинированной связи «трос–цепь» (в) и «цепь–трос» (г)

Очевидно, что значения X и Z однозначно определяют исходное состояние гибкой якорной связи: параметры a , t_1 и t_2 цепной линии, соответствующей кривой ее провисания. Используя (6), можно определить тяжение во всех точках якорной связи. Тяжение в клюзовой точке, когда значение параметра в (6) равняется t_2 – мгновенная жесткость (реакция) якорной связи в исходном состоянии.

Смещение клюзовой точки в результате перемещения плавучего объекта приводит к изменению напряженно-деформированного состояния якорной связи. Подставляя новые координаты клюзовой точки $X+dX$ и $Z+dZ$ в систему (7) с учетом физического уравнения (11), можно найти искомые неизвестные $a_{\text{нов}}$, $t_{1\text{нов}}$ и $t_{2\text{нов}}$, соответствующие кривой провисания якорной связи в новом положении. Так как найденные параметры $a_{\text{нов}}$, $t_{1\text{нов}}$ и $t_{2\text{нов}}$ отличаются от аналогичных параметров для исходного состояния (a , t_1 и t_2), то определяемые при их помощи значения фактического и действующего тяжения (см. формулы (6) и (11)) соответственно будут отличаться. Таким образом, любое перемещение клюзовой точки приводит к изменению как тяжения, так и геометрии кривой провисания из-за изменения значения упругого удлинения якорной связи (рис.7).

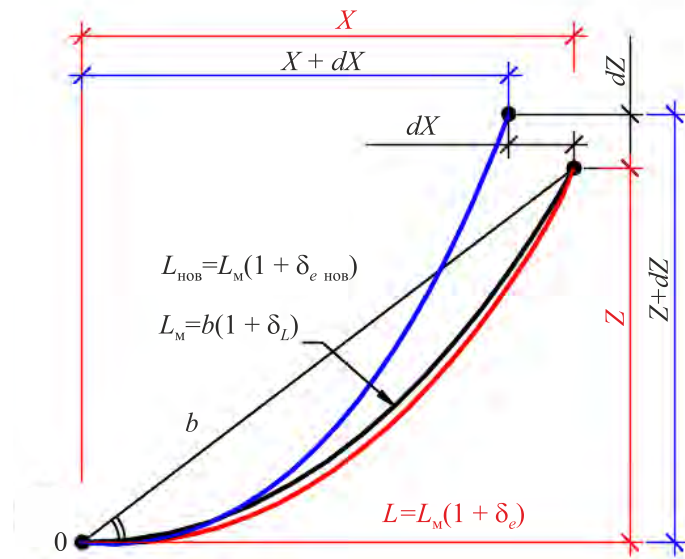


Рис. 7. Положение якорной связи: исходное (красный цвет) и при смещении клюзовой точки (синий цвет)

Однако существует «инвариант» якорной связи, который остается неизменным при любом перемещении плавучего объекта. Это монтажная (нерастянутая) длина связи L_M , которую можно определить, предварительно уложив связь на землю, то есть исключив продольное тяжение. При фиксации длины связи L в клюзовой точке связь находится в растянутом состоянии, поэтому для определения L_M (или δ_L) необходимо решить систему (7), после чего определить искомую монтажную длину с использованием физического уравнения (11). Аналогичным образом можно поступить при фиксации в клюзовой точке в исходном состоянии монтажного тяжения $T_{\text{монт}}$ вместо длины стравленной якорной связи. В этом случае необходимо предварительно решить систему (9) вместо системы (7), после чего воспользоваться физическим уравнением (11).

Пример определения мгновенной жесткости (реакции) якорной связи. Учитывая ограниченный объем публикации, пример представлен на рис. 8 в виде набора операторов математического приложения MathCad Prime 4.0, который включает необходимые исходные данные (первые 2 строки), блок встроенного оператора *find* для решения систем уравнений (3–5 строки на рис. 8), функции для анализа результатов численного расчета (последние 3 строки).

Численное решение системы $\text{sol}(\delta_X, \delta_Z)$ – вектор искомых параметров a , t_1 и t_2 – и тяжение в клюзовой точке $T_{\text{макс}}(\delta_X, \delta_Z)$ представлены как функция относительных смещений $\delta_X = dX/X$ и $\delta_Z = dZ/Z$ (пояснение, что представляют X , Z , dX и dZ – см. на рис. 7), при этом их значение варьировалось от $-\delta_L$ до δ_L . Величина монтажного удлинения δ_L в примере принята равной 50 %. Исходное состояние соответствует значениям $\delta_X=0$ и $\delta_Z=0$.

Результаты представлены на рис. 9, где мгновенная жесткость (реакция) якорной связи K_δ – это отношение тяжения в клюзовой точке $T_{\text{макс}}$ к пределу прочности связи R_{lim} .

$$\begin{aligned}
X &:= 1500 \text{ m} & Z &:= 1000 \text{ m} & t_{12} &:= \frac{Z}{X} = 0.67 & b_{12} &:= \sqrt{X^2 + Z^2} & \delta_L &:= 50 \cdot m\varepsilon & L &:= b_{12} \cdot (1 + \delta_L) = 1892.9 \text{ m} \\
d &:= 43 \text{ mm} \quad (\text{калубр}) & q &:= 34 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} & R_{lim} &:= 102.8 \text{ tf} & F &:= 0.0029 \text{ m}^2 & E &:= 1010880 \cdot \frac{\text{tf}}{\text{m}^2} \\
a &:= L & t_1 &:= t_{12} - \Delta t & t_2 &:= t_{12} + \Delta t \\
X \cdot (1 + \delta_X) &= a \cdot \Delta X_1(t_1, t_2) & Z \cdot (1 + \delta_Z) &= a \cdot \Delta Z_1(t_1, t_2) & L \cdot \left(1 + \frac{a \cdot q \cdot T_{1cf}(t_1, t_2)}{E \cdot F}\right) &= a \cdot (t_2 - t_1) \\
\text{sol}(\delta_X, \delta_Z) &:= \text{find}(a, t_1, t_2) \\
a(\delta_X, \delta_Z) &:= \text{sol}(\delta_X, \delta_Z)_0 & t_1(\delta_X, \delta_Z) &:= \text{sol}(\delta_X, \delta_Z)_1 & t_2(\delta_X, \delta_Z) &:= \text{sol}(\delta_X, \delta_Z)_2 \\
T_{max}(\delta_X, \delta_Z) &:= a(\delta_X, \delta_Z) \cdot q \cdot T_1(t_2(\delta_X, \delta_Z)) \\
\delta_X &:= -\delta_L, -\delta_L + 10 \text{ m}\varepsilon \dots \delta_L & \delta_Z &:= -\delta_L, -\delta_L + 10 \text{ m}\varepsilon \dots \delta_L & K_\delta &:= \frac{T_{max}(\delta_X, \delta_Z)}{R_{lim}}
\end{aligned}$$

Рис. 8. Пример определения мгновенной жесткости (реакции) якорной связи

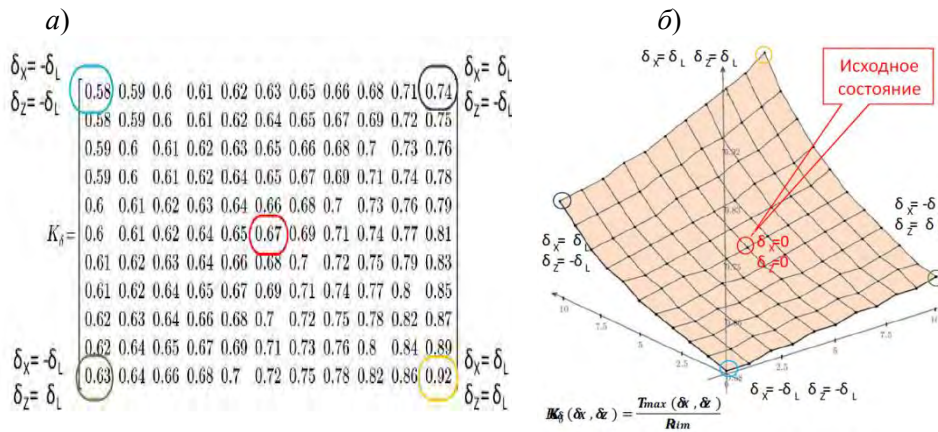


Рис. 9. Мгновенная жесткость (реакция) якорной связи K_δ при смещении клюзовой точки: в виде матрицы значений (а) и графика (б)

Представленный выше метод расчета якорных связей на основе параметрического уравнения цепной линии позволяет анализировать поведение каждой отдельной связи. Результат численного анализа – матрица (график) изменения реакции якорной связи (см. рис.9). Далее можно выполнить полный анализ поведения плавучего объекта с учетом полученных результатов: путем замены якорной системы удержания набором гибких связей известной жесткости.

Заключение

Перспективные, по мнению автора, направления исследования якорных систем удержания плавучих объектов, в том числе при помощи предлагаемого метода расчета гибких связей:

Сравнительный анализ существующих методов расчета гибких якорных связей. Определение допустимой области применения существующих методов расчета.

Поиск «условно-матричного», поддающегося автоматизации, метода расчета (аналог метода перемещений в строительной механике) для решения «многопролетной» задачи, когда якорная связь – это набор разделенных промежуточными узлами гибких элементов, для которых можно составить:

геометрические уравнения, определяющие взаимное расположение концевых точек гибких элементов – узлов якорной связи;

уравнения равновесия между внутренними усилиями (со стороны гибких элементов) и внешних сосредоточенных сил в узлах связи;

физические уравнения, связывающие монтажную (нерастянутую) и фактическую (растянутую) длину гибкого элемента с действующими внутренними усилиями.

Поиск методики (алгоритма), позволяющей использовать стандартные программы расчета строительных конструкций (SCAD, Лира и т.д.) для анализа поведения плавучих объектов. При этом схема воздействия жидкой среды на границе плавучего объект – винклеровское основание. Якорные гибкие связи – односторонние связи (пружины) известной жесткости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Смелов В.А. и др.** Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе // Л.: Судостроение, 1989.
2. **Кульмач П.П.** Якорные системы удержания плавучих объектов (Вопросы статики и динамики плавучих сооружений на якорях). Л.: Судостроение, 1980.
3. **ВСП 33-01-99/МО РФ.** Инструкция по расчету и проектированию якорных систем плавучих объектов ВМФ – введена в 1999. М.: Типография 26 ЦНИИ МО РФ, 2000.
4. **Тертышникова А.С., Кушнир В.М.** Якорная система удержания глубоководной SPAR платформы на фиксированной точке бурения при экстремальных гидрометеорологических условиях Черного моря // Вестник СевНТУ. Серия: Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. 2011. Вып.120. С. 206-210.
5. **Мищенко В.В.** Гибкие связи: основные уравнения и расчетные характеристики // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 2. С. 18-28.

REFERENCES

1. Simakov G.V., Shkhinek K.N., Smelov V.A. et al. Marine hydraulic structures on the continental shelf // Leningrad: Shipbuilding, 1989. (In Russ.).
2. Kulmach P.P. Anchor systems for holding floating objects (Issues of statics and dynamics of floating structures at anchors). Leningrad: Sudostroenie, 1980. (In Russ.).
3. VSP 33-01-99/MO RF. Instructions for the calculation and design of anchor systems for floating objects of the Navy – introduced in 1999. M., Printing house 26 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2000. (In Russ.).
4. Tertyshnikova A.S., Kushnir V.M. Anchoring system for holding a deep-water SPAR platform at a fixed drilling point under extreme hydrometeorological conditions of the Black Sea. Vestnik SevNTU. Series: Mechanics, energy, ecology: collection. scientific tr. 2011;120:206-210. (In Russ.).

5. Mishchenko V.V. Flexible connections: basic equations and design characteristics // Structural mechanics and design of structures. 2023;(2):18-28. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Мищенко – главный инженер проекта.

Information about the authors

V.V. Mishchenko – Chief Project Engineer.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 14.11.2024; approved after reviewing 18.01.2024; accepted for publication 20.03.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Кондратьев С.Б., Филиппова Е.А., Веселов А.Б., Охапкин Г.В.</i> Роль аналитического центра в цифровой трансформации производственного блока ПАО «РусГидро» в области обеспечения безопасности и надёжности ГТС	5
<i>Антилогова И.Н., Казаров Г.И.</i> Промежуточные итоги выполнения НИОКР, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации блоков АЭС с БИГ	14
<i>Драган Наупарац, Драган Приич.</i> Функциональная модульность при проектировании электрогидравлических систем привода движения затворов в составе гидромеханического оборудования на объектах гидротехники	26
<i>Фролов А.С., Матвеев Ю.Д., Максимова Т.Н., Мартынов А.А.</i> Выбор оптимального варианта реконструкции подруслового водозабора на реке Суусе	37
<i>Елистратов В.В., Ригель И.В.</i> Конструктивные решения и методы проектирования фундаментов ветроэнергетических установок для условий Арктики	43
<i>Барило К.Н., Терехова М.С., Борус О.А., Охапкин Г.В.</i> Опыт восстановления водонепроницаемости холостых водосбросов на примере Иркутской ГЭС	56
<i>Белослудцева Ю.О., Котлов О.Н.</i> Прогноз температурного режима гидротехнических сооружений с учетом фильтрационного потока	65
<i>Абрамов Н.А.</i> Оценка состояния грунтовых плотин с проявлениями непроектного фильтрационного режима	75
<i>Михайлов М.Е., Федосин К.А., Лавренюк Е.В.</i> Исследования проникающей способности гидроструктурной смолы на акрилатной основе (гидрогеля) в песчаных грунтах	87
<i>Добродеев А.А., Сазонов К.Е.</i> Опыт исследования взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями в ледовом бассейне	95
<i>Алексеевская М.В., Судольский Г.А., Шильев А.В., Холов Ф.А.</i> Гидравлические исследования режимов течения и размывов русла при совместной работе водосбросных сооружений Рогунской ГЭС на правом берегу реки Вахш	108
<i>Мищенко В.В.</i> Якорные системы удержания плавучих объектов: параметрическое уравнение цепной линии при расчете гибких связей	124

CONTENT

Preface	3
<i>Kondratiev S.B., Filippova E.A., Veselov A.B., Okhapkin G.V.</i> The analytical center's role in the digital transformation of the production unit of PJSC RusHydro in the field of ensuring the safety and reliability of hydraulic structures	5
<i>Anpilogova I.N., Kazarov G.I.</i> Intermediate results performing scientific research aimed at ensuring the safe operation of NPP units with evaporative cooling towers	14
<i>Dragan Nauparac, Dragan Prsic.</i> Functional modularity in the design of electro-hydraulic gate movement drive systems as part of hydromechanical equipment at hydraulic engineering facilities	26
<i>Frolov A.S., Matveev Y.D., Maksimova T.N., Martynov A.A.</i> The optimal option selection for under-river water intake reconstruction on the Susuya river	37
<i>Elistratov V.V., Rigel I.V.</i> Structural solutions and design methods for wind turbine foundations in Arctic conditions	43
<i>Barilo K.N., Terekhova M.S., Borus O.A., Okhapkin G.V.</i> The experience of waterproof's restoration of idle spillway using the example of the Irkutsk hydroelectric station	56
<i>Belosludtseva Y.O., Kotlov O.N.</i> Temperature regime forecast of hydraulic structures taking into account filtration flow	65
<i>Abramov N.A.</i> Assessment of the condition of ground dams with manifestations of non-design filtration mode	75
<i>Mikhailov M.E., Fedosin K.A., Lavrenyuk E.V.</i> Experimental work for the hydrogel impregnation method in sands	87
<i>Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.</i> The experience in studying the interaction of an ice with hydraulic structures in an ice basin	95
<i>Alekseevskaya M.V., Sudolsky G.A., Shilyaev A.V., Holog F.A.</i> Hydraulic studies of flow regimes and channel erosion during the joint operation of water outlets of the Rogun HPP on the right bank of the Vakhsh river	108
<i>Mishchenko V.V.</i> Anchor systems for holding floating objects: parametric equation of a chain line when calculating flexible links	124

**Перечень организаций, представивших статьи
для опубликования в сборнике научных трудов
«Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», т. 311**

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия;

АО «Ленгидропроект», Санкт-Петербург, Россия;

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия;

ОАО «Точикгидроэлектромонтаж», Душанбе, Республика Таджикистан;

ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация», Иркутская область, г. Иркутск;

ООО «Эм-Си Баухеми», Санкт-Петербург, Россия;

ПАО «РусГидро», Москва, Россия;

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия;

ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия;

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ
ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В СБОРНИКЕ НАУЧНЫХ ТРУДОВ
«ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ им. Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

Редакционной коллегией принимаются к публикации открытые для печати оригинальные статьи, нигде ранее не публиковавшиеся и не предназначенные для публикации в другом издании.

Статьи должны включать следующие основные элементы:
формулировка целей статьи (постановка задачи);
краткий анализ современных достижений по рассматриваемому вопросу;
изложение основного материала с анализом полученных результатов;
выводы, рекомендации для дальнейшего использования полученных результатов исследований.

Автор (авторы) предоставляют **Справку** (с подписями) о передаче прав издательству АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» на опубликование статьи в сборнике «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и с подтверждением, что статья ранее не публиковалась и не представлена для опубликования в другие издания, а также согласие на обработку персональных данных.

Специалисты из **сторонних организаций** сопровождают статью рекомендательным письмом от организации и **экспертным заключением** о возможности открытого опубликования.

Необходимо предоставить полные сведения о каждом авторе статьи: имя, отчество, фамилию полностью на русском языке и в транслитерированной форме на латинице; наименование организации, где работает или учится автор, и город, в котором она расположена; должность и ученая степень (при наличии); электронный адрес; открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии.

Если у статьи несколько авторов, указывается автор, ответственный за переписку (и в статье не приводятся электронные адреса других авторов). Имена всех авторов при публикации приводятся в принятой ими последовательности.

Заголовок статьи должен отражать ее содержание и быть по возможности кратким – не более 7–9 слов (не считая предлоги и союзы).

Статья должна сопровождаться краткой *аннотацией* объемом не более 250 слов, содержащей основные результаты исследования, и перечнем *ключевых слов* (не менее 3 и не более 15 слов (словосочетаний) в зависимости от объема текста).

Заголовок статьи, аннотация, ключевые слова должны быть продублированы на *английском языке*.

В начале статьи необходимо указать ее тип: научная, обзорная, дискуссионная и т.д.

Объем статьи не должен быть менее 8 и более 18 страниц формата А4, включая текст, рисунки, таблицы, список литературы (рекомендуемый объем статьи – от 9 000 до 25 000 знаков).

Текст статьи должен быть представлен в электронном виде (формат электронного документа – doc, docx).

Основной текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 11 пт с абзачным отступом (красная строка) 1 см, с одинарным межстрочным интервалом и выравниванием абзаца по ширине.

Заголовок статьи набирается шрифтом Arial размером 12 пт прописными буквами с выравниванием по центру строки.

Поля устанавливаются следующего размера: верхнее – 3,0 см, нижнее – 4,7 см, внутри и снаружи – 4,2 см.

Формулы следует набирать только в редакторе формул Microsoft Equation или MathType с выравниванием по центру, а их порядковые номера в круглых скобках с выравниванием по правому краю. Русские, греческие буквы набираются прямым шрифтом, латинские – курсивом.

Рисунки цветные и черно-белые. Каждый рисунок представляется в виде отдельного файла. В тексте приводятся ссылки на номера всех рисунков. Размер каждого рисунка не должен превышать 125×220 мм. Формат: TIFF, PSD, JPEG, разрешение для сканированных фотографий – 300 dpi.

Подписи к рисункам набираются шрифтом Times New Roman размером 9 пт с выравниванием по центру, представляются в виде отдельного файла. Подписи к рисункам должны быть продублированы на английском языке.

Таблицы. Текст таблицы набирается шрифтом размером 10 пт. Слово «Таблица» и ее номер набираются курсивом размером 10 пт и располагаются над заголовком таблицы с выравниванием по правому краю. Заголовки к таблицам набираются шрифтом Times New Roman жирным начертанием размером 10 пт с межстрочным интервалом один и выравниванием по центру без точки в конце заголовка.

Список литературы приводится в конце статьи. Порядковый номер ссылки указывается в соответствующей строке текста в квадратных скобках. Источники в библиографическом списке располагаются в порядке их упоминания в статье. В описании указывается: фамилии и инициалы авторов, название книги, статьи, сборника или журнала на русском языке и его перевод на английский язык, город, издательство, год издания, номер журнала, количество страниц.

Материал представляется в издательство по электронной почте.

Статьи направлять в издательство

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по адресу:

Россия, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская 21, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

Тел: (812) 590-82-51

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научный редактор *В.Б. Глаговский*
Редакторы *Т.М. Бовичева, И.В. Кривошапка*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Подписано к печати 22.03.2024.

Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 1. Печать цифровая.

Печ.л. 8,75. Усл.печ.л. 12,25. Тираж 300 (100). Заказ 19.

Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Типография ООО «ПК Марка».

195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.