

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

ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ

им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Издание основано в 1931 году

Том 308

Санкт-Петербург
2023

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, Ю.С. Васильев, 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 научных трудов «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» публикуются новые научные результаты в области гидротехнического, промышленного и гражданского строительства, водного хозяйства, оснований и фундаментов, подземных сооружений, гидравлики и инженерной гидрологии.

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 of scientific papers «Proceedings of VNIIG» publishes new scientific results in the field of hydraulic, industrial and civil engineering, water industry, bases and foundations, underground structures, hydraulics and engineering hydrology.

The collection is intended for specialists in the field of engineering geology and groundwater hydrology, soil mechanics, hydraulics, hydraulic engineering, ecology, as well as for students, postgraduates and lecturers 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

Научная статья
УДК 624.15:626/627

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ И ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОРСКОГО НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

Олег Михайлович Финагенов

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

Аннотация. Проведен анализ особенностей системы контроля состояния грунтового основания и опорной части морского нефтегазопромыслового гидротехнического сооружения – мониторинга за состоянием системы «опорная часть – грунтовое основание». Показаны подход к определению и оценке достаточности объема контролируемых параметров системы контроля состояния и пути модернизации существующих систем.

Ключевые слова: *грунтовое основание, опорная часть, контролируемые параметры, мониторинг, платформа*

Для цитирования: Финагенов О.М. Особенности мониторинга грунтового основания и опорной части морского нефтегазопромыслового гидротехнического сооружения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 3–14.

Original article

FEATURES OF GROUND BASE MONITORING AND BEARING PART OF THE OFFSHORE OIL AND GAS PRODUCTION HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURES

Oleg M. Finagenov

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

Abstract. The analysis of the features of the system for monitoring the state of the ground base and the bearing part of the offshore oil and gas production hydraulic engineering structure – monitoring the state of the «bearing part – ground base» system is carried out. An approach to determining and assessing the adequacy of the volume of controlled parameters of the condition monitoring system and ways to modernize existing systems are shown.

Keywords: *ground base, bearing part, controlled parameters, monitoring, platform*

For citation: Finagenov O.M. Features of ground base monitoring and bearing part of the offshore oil and gas production hydraulic engineering structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:3-14. (In Russ.).

Введение

Исторически на первых этапах разработки шельфовых нефтегазовых месторождений на глубинах моря до 100 м использовались морские стационарные платформы, на которых размещались буровой и добычной комплексы. Последний включает устья добывающих и нагнетательных скважин, системы подготовки газа, нефти и воды. Таким образом, обустройство

одного месторождения осуществлялось рядом платформ, от которых углеводороды поступают в центральный пункт сбора подготовленными к внешней транспортировке. Такая схема обустройства месторождений относится к индивидуальной, а способ обустройства – к надводному. Необходимо отметить, что надводный способ обустройства широко применяется при обустройстве месторождений арктического шельфа.

В качестве опорных частей для размещения устьев скважин и технологического оборудования в данной статье рассмотрим гравитационные опорные части (основания):

- бетонные гравитационные опорные части (рис. 1, 2);
- стальные гравитационные опорные части (рис. 3, 4).



Рис. 1. Платформа «Пильтун-Астохская-Б»



Рис. 2. Платформа «Лунская-А»



Рис. 3. Морская ледостойкая стационарная платформа «Пильтун-Астохская-А» («Моликпак»)



Рис. 4. Морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная»

Устойчивость на грунте таких платформ обеспечивается за счет собственного веса, водяного и (или) бетонного балласта. Для осуществления непрерывного контроля (мониторинга) за состоянием системы «опорная часть – грунтовое основание» предназначена система контроля состояния опорной части (СКСОЧ) морского нефтегазопромыслового гидротехнического сооружения (МНГС).

Задачи, решаемые с помощью СКСОЧ:

мониторинг параметров, характеризующих поведение корпусных конструкций опорной части;

мониторинг параметров грунтового основания;
мониторинг сейсмической обстановки;
мониторинг ледовых нагрузок, действующих на опорную часть;
предупреждение персонала Центрального поста управления платформы о возможности возникновения потенциально опасных ситуаций, влияющих на общую безопасность опорной части или платформы в целом, путем подачи соответствующих аварийно-предупредительных сигналов.

Под понятием «мониторинг» подразумевается:

непрерывный контроль за состоянием системы «опорная часть – грунтовое основание» в период эксплуатации платформы, в том числе во время волновых и ледовых воздействий большой интенсивности;

получение натуральных данных о физических параметрах и процессах, происходящих в грунтовом основании и опорной части на протяжении всего периода эксплуатации платформы, первичная обработка данных и хранение информации;

многоцелевое использование собранных данных с целью предотвращения аварийных ситуаций, связанных с нарушением устойчивости платформы на грунте, а также с целью улучшения условий эксплуатации платформы, прогнозирования ее технического состояния и учета накопленной информации при проектировании последующих сооружений подобного рода [1].

С помощью СКСОЧ на платформе обеспечивается систематическое наблюдение за контролируемыми параметрами и обработка полученных данных, включая оценку соответствия проектных и фактических условий работы, а также прогноз поведения платформы на последующий период эксплуатации.

Программа мониторинга грунтового основания и опорной части МНГС

С целью обеспечения систематического анализа безопасности сооружения и осуществления своевременной разработки и реализации мер по предотвращению аварии сооружения должна быть разработана программа его мониторинга [2, 3].

В составе подсистемы мониторинга грунтового основания и опорной части, являющейся основной подсистемой СКСОЧ, осуществляется мониторинг следующих параметров, характеризующих состояние системы «грунтовое основание – опорная часть» и устойчивость платформы на грунте:

наклоны опорной части относительно двух горизонтальных осей;
давление грунта в подошве опорной части;
поровое давление воды под подошвой опорной части;
линейные ускорения конструкции опорной части.

В состав документации по ведению мониторинга безопасности сооружения рекомендуется включать:

проект мониторинга безопасности сооружения;
инструкцию о порядке ведения мониторинга безопасности сооружения;
аналитические сведения по результатам ведения мониторинга безопасности сооружения.

Проект мониторинга безопасности сооружения может выполняться как раздел проектной документации или как отдельная проектная документация на строительство сооружения.

Проект мониторинга безопасности сооружения для эксплуатируемых сооружений может составлять эксплуатирующая организация.

Инструкцию о порядке ведения мониторинга безопасности сооружения составляет эксплуатирующая организация.

Объектами мониторинга могут быть как сооружения в целом, так и их составляющие части (конструктивные элементы).

Для каждого контролируемого параметра рекомендуется определять [4]: *способ контроля* – инструментальный или визуальный (экспертный). При инструментальном контроле разрабатывается проектная документация контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), ее конструкция, схема и технология размещения, эксплуатации и т.п., являющаяся составной частью проектной документации мониторинга;

периодичность контроля устанавливается в различные периоды существования объекта мониторинга. Указываются условия, влияющие на периодичность контроля;

предельно допустимые значения (ПДЗ) – значения контролируемого параметра, определяющие состояние безопасности объекта мониторинга. Для каждого уровня безопасности задаются свои значения ПДЗ. Переход контролируемого параметра на более низкий уровень безопасности сопровождается изменением периодичности контроля, т.е. чем ниже уровень безопасности, тем чаще проводятся измерения контролируемого параметра. ПДЗ могут быть количественными и качественными. Количественные значения ПДЗ задаются для параметров, контролируемых инструментально. Некоторые ПДЗ получаются на основе расчета по результатам больших объемов инструментальных измерений. Качественные значения ПДЗ задаются для параметров, контролируемых визуально. В последнем случае приводится перечень (качественная шкала, описание или образцы) признаков, соответствующих ПДЗ. Для различных периодов существования объекта мониторинга его контролируемые параметры могут иметь различные ПДЗ. Целесообразно определить эти периоды (условия и признаки их выделения), если в этом есть необходимость;

методику измерений и наблюдений. Для параметров, контролируемых инструментально, приводится описание методик их измерения или даются ссылки на соответствующую нормативно-методическую литературу, которые прилагаются к проектной документации мониторинга. Для параметров, контролируемых визуально, могут применяться методики взвешенных экспертных оценок.

На основании анализа технического состояния сооружения делается вывод о его безопасности: надежное, удовлетворительное, аварийное.

Для контроля отбираются только параметры, которые в наибольшей степени характеризуют состояние безопасности объекта мониторинга.

В проектной документации мониторинга определяются способы идентификации (фиксация, обобщение, обработка, интерпретация и представление) контрольной информации, снятой с контролируемых параметров объектов мониторинга, в удобном для восприятия человеком (эргономичном) виде.

Визуализация контролируемых параметров СКСОЧ

Визуализация контролируемых параметров СКСОЧ проводится согласно требованиям действующих нормативных документов.

Первичная обработка данных мониторинга должна заключаться в переводе показаний КИА и измерительных устройств в физические величины контролируемых показателей основания (например, напряжения, смещения, крена и др.), в выявлении ошибок измерений и в оперативном занесении полученной обработанной информации в базы данных информационно-диагностической системы (компьютер пользователя) [5].

Информационно-диагностическая система должна создаваться на базе современных компьютерных и информационных технологий и программно-технического обеспечения.

Вторичная обработка введенной в информационно-диагностическую систему мониторинга информации о выполненных измерениях по КИА должна проводиться с использованием программного комплекса. Результаты вторичной обработки данных мониторинга должны быть представлены в виде таблиц, графиков изменения контролируемых показателей во времени и от действующих нагрузок, эпюр распределения значений показателей (напряжений, прогибов, осадок, смещений, напоров, температуры и др.) в пределах контрольных створов, секций, измерительных сечений [5].

Таким образом, система мониторинга должна выполнять две функции.

Во-первых, как можно раньше дать оператору платформы информацию о тенденциях, которые могли бы в будущем повлиять на ее безопасность или ее экономические показатели.

Во-вторых, система мониторинга должна давать данные, которые помогут в определении причин аномалий, зафиксированных приборами, при визуальном обследовании или как-нибудь еще.

Другими словами, данные, полученные системой мониторинга, имеют смысл только после должной интерпретации, проведенной квалифицированными инженерами.

Нужно осознавать, что данные и их интерпретация дают только часть информации, на которой операторы платформы основываются при принятии решений. Визуальные обследования также сильно влияют на оценку параметров платформы, так что эти два подхода нужно использовать совместно.

Автоматические системы мониторинга предоставляют инженерам мощный инструмент, который, будучи правильно использован, может внести большой вклад в проектирование, возведение и безопасную эксплуатацию морских сооружений. В автоматической системе мониторинга оборудование и методы измерений в сочетании с компьютерными технологиями формируют измерительную цепочку (рис. 5). Ее функцией является автоматическое количественное измерение физической информации и представление ее в упорядоченной форме, удобной для исследования и анализа.

Система мониторинга прежде всего должна фиксировать изменения параметров. Даже при сравнении с проектными параметрами абсолютные значения величин имеют меньшее значение, чем изменения параметров за какой-то период времени в ответ на изменяющуюся ситуацию.

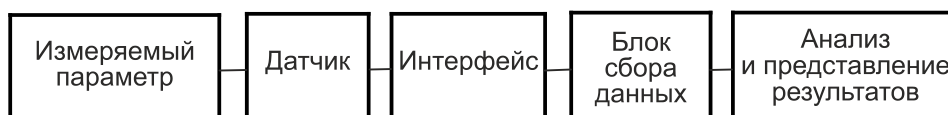


Рис. 5. Измерительная цепочка

Решения, принимаемые относительно безопасности платформы, являются ответственностью оператора. Поэтому система мониторинга и общий надзор за платформой в том, что касается приборов, частоты наблюдений, сбора, записи и анализа данных, организуются так, чтобы оператор мог эффективно принимать решения.

В связи с этим объем собираемых данных должен держаться в разумных пределах, и предпочтение отдаваться приборам, предоставляющим обзорную информацию, то есть приборам, реагирующим на события в любой точке платформы.

Частота наблюдений должна позволять вовремя заметить аномалию, это требует проводить анализ данных довольно быстро.

Для эффективного принятия решений очень полезно такое графическое представление информации, чтобы любые тенденции были видны невооруженным глазом.

Полученные данные дублируются по двум каналам для обеспечения эффективности работы системы. Персонал платформы занят кратковременными прогнозами, тогда как центральный офис (рис. 6) выполняет дублирование. Любой из них имеет возможность зафиксировать аномалию и предпринять соответствующие действия вовремя. Это может быть просто проверка показаний или повторные измерения, более тщательное исследование поведения платформы или изменение режима эксплуатации. В более трудных случаях требуются детальные инженерные исследования и ремонт.

Решение о необходимых действиях принимается на том уровне, который ответственен за такие решения, с привлечением других специалистов, если нужно.

В конечном итоге вся необходимая информация и все рекомендации (от офиса и (или) специалистов) стекаются к оператору, который и принимает окончательное решение.

Таким образом, для эффективного мониторинга требуется:

тщательно спроектированная система мониторинга специально для данной платформы;

строгие правила относительно приборов и методов наблюдений для обеспечения точности результатов за очень длительный период;

методы обработки и анализа информации, способные выделять существенную информацию;

интерпретация, проводимая опытными специалистами, для обеспечения правильности конечной оценки.

При проектировании нужно определить типы и положение приборов, обеспечивающих своевременно и с небольшими затратами сбор достаточного количества информации для фиксации любых тенденций, могущих повлиять на безопасность платформы.

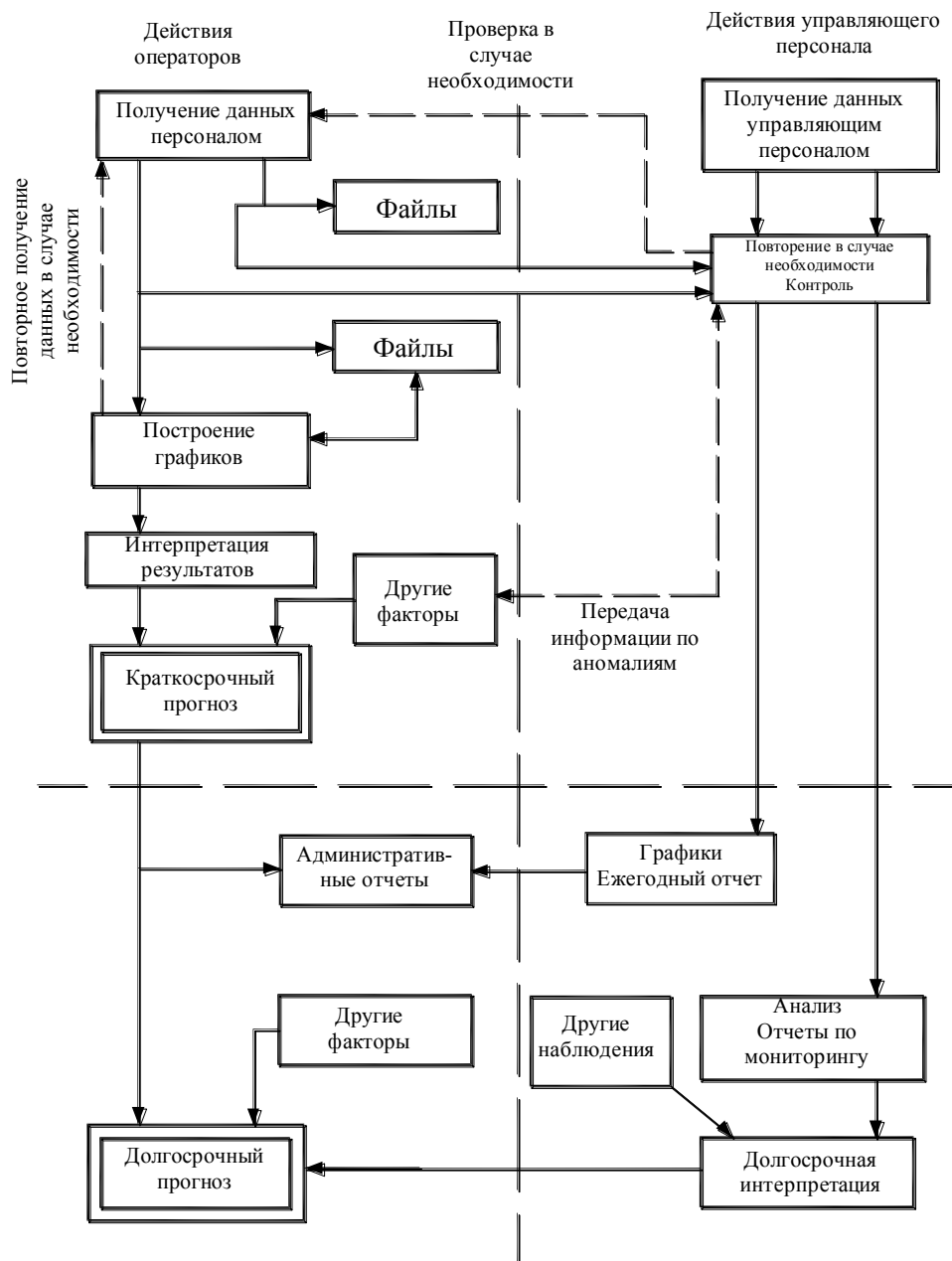


Рис. 6. Процесс анализа инструментальных данных

Так как любая платформа является уникальным сооружением, систему мониторинга нужно проектировать специально для нее.

Система анализа инструментальных данных организована так, чтобы давать ранние предупреждения об аномалиях, будь это ошибки чтения или неправильные реакции платформы. Используются главным образом графики, где аномалии видны с первого взгляда.

Интерпретацию проводят оба канала: операторы платформы и центральный офис. Однако ответственность за конечное решение лежит на операторах, центральный офис только советует.

Анализ достаточности объема контролируемых параметров СКСОЧ

Анализ достаточности объема контролируемых параметров СКСОЧ проводится согласно рекомендациям действующих нормативных документов.

Наблюдения за поведением оснований в процессе эксплуатации МНГС следует проводить на протяжении всего периода эксплуатации сооружений. Эти наблюдения должны обеспечить количественные оценки изменения состава, строения и свойств грунтов отдельных участков, зон основания в пространстве и во времени. Главной целью натурных наблюдений является обеспечение безопасной эксплуатации сооружения путем своевременного выявления опасного развития процессов взаимодействия сооружения с природной средой, а также выявления непрогнозируемых процессов и явлений для оперативного выполнения предупреждающих и защитных мероприятий [5].

В процессе наблюдений проводятся: оценка изменений инженерно-геологических условий за период эксплуатации сооружения, включая изменения гидрогеологических условий, строения и свойств грунтов, активности инженерно-геологических процессов; установление причин осадков, просадок, смещений, деформаций и других непроектных ситуаций; качественный и количественный прогноз изменения во времени и в пространстве техноприродных процессов с оценкой вероятности аварийных ситуаций и связанных с этим ущербов; разработка мер по предотвращению дальнейшего развития негативных процессов в основании, восстановлению условий нормальной его работы, обоснованию защитных мероприятий [5].

В задачи наблюдений должны входить: выявление и оконтуривание зон влияния опасных природных процессов; оценка изменений состояния и свойств грунтов основания, фиксирование динамики развития опасных инженерно-геологических (техноприродных) процессов, при которых в основании изменяется какая-либо характеристика состояния или свойства грунтов (разуплотнение, трещинообразование, геодинамические процессы и др.); выявление направлений изменения наблюдаемой характеристики; оценка изменения активной зоны под сооружением с оценкой ее мощности и послойным определением изменений характеристик свойств грунтов и т.д.

Наблюдения за поведением основания должны быть организованы на основе материалов инженерных изысканий с начала установки сооружения и продолжаться в течение всего времени эксплуатации.

Задачи, объем и периодичность наблюдений, состав сети первоначально устанавливаются проектом и в дальнейшем могут быть изменены на основании результатов наблюдений, в зависимости от состояния сооружения. Эти изменения согласовываются с проектной организацией, которая разработала проект сооружения.

Согласно нормативным документам [5, 6], для каждой МНГС в местных производственных инструкциях должны быть приведены разработанные проектной организацией предельно допустимые значения диагностических показателей состояния и свойств основания, которые могут уточняться на основе результатов проведенных наблюдений.

Для повышения оперативности и достоверности наблюдений за поведением основания в процессе эксплуатации рекомендуется использовать автоматизированные системы измерений, включающие современные ЭВМ. Уровень автоматизации определяется объемом КИА и условиями эксплуатации.

Проект натуральных наблюдений (мониторинга) гидротехнических сооружений должен разрабатываться специализированной организацией, имеющей соответствующие допуски на проведение данного вида работ.

Регулярные инструментальные и визуальные натурные наблюдения за основанием сооружения должны проводиться в режиме мониторинга в сроки и с периодичностью, определяемыми программой наблюдений [5].

В состав инструментальных натуральных наблюдений должны быть включены все наблюдения за основанием сооружения в соответствии с перечнем диагностических показателей, характеризующих его работу и техническое состояние, контролируемые значения которых могут измеряться стационарной КИА и (или) переносными приборами. Состав и объем натуральных наблюдений за основанием сооружения и природной средой в зоне взаимодействия с сооружением определяются в проекте мониторинга на основании сценариев возникновения чрезвычайных и аварийных ситуаций с целью своевременного их предотвращения [5].

Натурными наблюдениями за основанием МНГС необходимо оценивать:

- напряженно-деформированное состояние элементов грунтового основания;

- общие и относительные осадки грунтового основания и перемещения опорной части;

 - напряженно-деформированное состояние опорной части;

 - вибрационные нагрузки от работы агрегатов.

Заключение

Согласно нормативным документам [5, 6], натурные наблюдения за основаниями МНГС должны начинаться на стадии их строительства и продолжаться непрерывно в течение всего периода жизненного цикла сооружений вплоть до их консервации или ликвидации.

Для каждого конкретного основания МНГС периодичность регулярных натуральных наблюдений устанавливается индивидуально с учетом инженерно-геологических, гидрогеологических, геокриологических условий, компоновочных и конструктивных особенностей сооружений, характера реакции сооружения на нагрузки и воздействия, наличия (отсутствия) и интенсивности развития неблагоприятных для сооружения процессов или повреждений, условий эксплуатации. Все это должно быть определено в разработанной проектной организацией программе мониторинга и утверждено эксплуатирующей организацией.

Периодичность натуральных наблюдений должна составлять:

- в начальный период эксплуатации сооружения вплоть до проявления признаков установившегося режима его работы – не реже чем каждые 10–15 дней;

- после выхода работы сооружения на установившийся режим и при отсутствии аномальных явлений или процессов – не менее двух циклов в год.

В исключительных случаях, когда в работе сооружения наблюдаются проявление и интенсивное развитие опасных процессов (например, интенсификация осадок, кренов или горизонтальных смещений), измерения по КИА и визуальные осмотры сооружения должны проводиться по учащенному графику ежедневно или несколько раз в сутки вплоть до выяснения причин возникновения указанных процессов и реализации оперативных инженерных решений по их ликвидации.

Внеочередные циклы измерений по КИА и визуальных осмотров сооружения должны проводиться после землетрясений интенсивностью более 5 баллов, сильных штормов, сильных ледовых воздействий.

Изменения периодичности инструментальных натуральных наблюдений на эксплуатируемых гидротехнических сооружениях в сторону увеличения или уменьшения циклов измерений (в месяц, в год) должны производиться только при соответствующем обосновании этих изменений проектной или специализированной научно-исследовательской организациями в зависимости от соответствия работы и технического состояния сооружений требованиям проекта, критериям безопасности, а также степени информативности получаемых данных наблюдений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Алекперов В.Ю., Маганов Р.У., Заикин И.А. и др.** Защита окружающей среды при освоении ПАО «Лукойл» месторождений нефти и газа в Северном Каспии: становление, развитие, перспективы // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2018. № 1. С. 5–15.

2. **Климович В.И.** Исследования перспективного варианта конструкции защиты от размывов дна вблизи морских платформ для условий платформы «Приразломная» // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 293. С. 84–96.

3. **Загрядский И.И.** Оценка точности математических моделей сооружений по данным наблюдений за их напряженно-деформированным состоянием // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 294. С. 6–19.

4. **РД 03-417-01.** Методические рекомендации по составлению проекта мониторинга безопасности гидротехнических сооружений на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010445>.

5. **СП 23.13330.2018.** Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85. М.: Стандартинформ, 2019.

6. **СП 369.1325800.2017.** Платформы морские стационарные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018.

REFERENCES

1. Alekperov V.Y., Maganov R. U., Zaikin I.A., etc. Environment protection during the development of oil and gas fields in the Northern Caspian Sea by PJSC Lukoil: evolvement, development, prospects. *Environmental protection in oil and gas complex*. 2018;1:5-15. (In Russ.).

2. Klimovich V.I. Study of an advanced version of structure for protection against bed scours in proximity to offshore platforms for the conditions of the Prirazlomnaya platform. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;293:84-96. (In Russ.).

3. Zagryadsky I.I. Precision assessment of mathematical models of facilities as per stress-strain state observation results. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;294:6-19. (In Russ.).

4. RD 03-417-01. Guidelines for safety monitoring designs for hydraulic structures at plants, objects and organizations subject to GGTN control. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010445>. (In Russ.).

5. SP 23.13330.2018. Foundation of hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.02.02-85. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).

6. SP 369.1325800.2017. Fixed offshore platforms. Design principles. Moscow: Standartinform; 2018. (In Russ.).

Информация об авторе

О.М. Финагенов – доктор техн. наук, главный научный сотрудник.

Information about the author


O.M. Finagenov – Dr. Sci. (Techn.), Chief Researcher.

Статья поступила в редакцию 25.01.2023; одобрена после рецензирования 08.02.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 25.01.2023; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 627.833:532

ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ ЗАТВОРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗНЫХ УРОВНЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В СЛУЧАЕ ОТКАЗА В СИСТЕМЕ

Драган Наупарац¹ , Неманя Вишнич²

^{1,2} АО «ППТ Инжиниринг», Белград, Сербия, dragan.nauparac@ppt-inzenjering.rs 


Аннотация. Отмечается множество неадекватных требований по обеспечению работоспособности в случае отказа в работе электрогидравлических систем привода движения затвора. В первую очередь имеется в виду определение требований к резервированию ПЛК компьютера, что чаще всего неадекватно следует резервированию в гидравлической части системы. Показан рациональный подход к проектированию, гарантирующий получение только необходимого для требуемого качества работы функции, без функциональных вариантов, которые невозможно эффективно применить на практике.


Ключевые слова: приводы движения затворов, резервирование ПЛК, резервирование в гидравлической части системы

Для цитирования: Наупарац Д., Вишнич Н. Подход к проектированию электрогидравлических систем привода движения затворов для обеспечения разных уровней работоспособности в случае отказа в системе // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 15–26.

Original article

AN APPROACH TO THE DESIGN OF ELECTROHYDRAULIC GATE MOVEMENT DRIVE SYSTEMS TO ENSURE DIFFERENT LEVELS OF OPERABILITY IN THE EVENT OF A SYSTEM FAILURE

Dragan Nauparac¹ , Nemanja Vishnich²

^{1,2} JSC «PPT Engineering», Belgrade, Serbia, dragan.nauparac@ppt-inzenjering.rs 

Abstract. There are many inadequate requirements for ensuring workability in the event of a failure in the operation of electro-hydraulic gate drive systems. First of all, it means the determination of the requirements for the redundancy of the PLC computer, which most often does not adequately follow the redundancy in the hydraulic part of the system. A rational approach to design is shown that ensures that only the function needed for the required performance is obtained without functional options that cannot be effectively implemented in practice.

Keywords: gate movement drives, PLC redundancy, hydraulic system redundancy

For citation: Nauparac D., Vishnich N. An approach to the design of electrohydraulic gate movement drive systems to ensure different levels of operability in the event of a system failure. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:15-26. (In Russ.).

Введение

Электрогидравлические приводы гидромеханического оборудования (ГМО) для данного анализа можно классифицировать следующим образом: затворы (сегментные или плоские) с одним и двумя цилиндрами. По основной функции они могут обеспечивать: аварийную функцию быстрого закрытия трубопровода, опускание затвора, быстрый водосброс, подъем затвора, функцию регулирования расхода воды, а также секвенциальные функции открытия и закрытия, которые необходимы на шлюзах в рамках технологии шлюзования судов. В различных формах вышеуказанные функции затвора требуют поддержания полной или ограниченной работоспособности. Для реализации полной работоспособности необходимо наладить соответствующую связь с системами управления, которые в настоящее время большей частью базируются на программируемых логических контроллерах (ПЛК) компьютеров. Так что поднимается вопрос правильного и оптимального проектирования резервирования, т.е. дублирования гидравлической и управляющей компьютерной частей системы, для обеспечения работоспособности системы в условиях различных отказов в ее частях.

Технология удвоения (дублирования) управляющих компьютерных систем разработана для технологического оборудования со значительно более жесткими требованиями, чем это необходимо для рассматриваемого в данной статье класса электрогидравлических систем привода. Цель данной статьи – показать проектный подход в выборе конфигурации гидравлической и управляющей компьютерной частей системы, наиболее соответствующей реальным требованиям на практике для эксплуатации электрогидравлических систем привода движения затвора в гидротехнике.

Резервированные ПЛК компьютерной конфигурации

В мире существует множество крупных и мелких производителей ПЛК компьютеров, но только несколько из крупнейших могут предложить технологию аппаратного резервирования (Siemens, Allen Bradley и Yokogawa). Как производители они определили стандарты в этой области. Существуют варианты, когда дублируется только процессорный модуль, когда дублируется процессорный модуль и входные и выходные модули, когда дублируется связь, и ряд других вариантов, которые просто требуют гораздо больше места, чем объем этой работы позволяет. Самый общий вид представлен на рис. 1.

Нет необходимости в высокой синхронизации между рабочим и резервным компьютером, которая идет от 10 до 300 миллисекунд, что является одним из самых дорогих вариантов при выборе технологии для аппаратного резервирования ПЛК компьютера. Например, при выходе из строя насосного агрегата, когда необходимо включить резервный насосный агрегат, на это требуется не менее 3–5 с в зависимости от мощности насосного агрегата. Дублированием функций датчиков и гидравлических комплектующих могут быть обеспечены разные по своей природе сигналы, так что для резерва не нужно дублировать одни и те же входные и выходные мо-

дули ПЛК компьютера, а только правильным выбором входных и выходных модулей согласно имеющимся сигналам от гидравлической конфигурации, полный резерв может быть реализован в одной конфигурации ПЛК, в которой дублируются только процессорный модуль и, конечно, модуль питания. Подход к проектированию за счет дублирования гидравлических контуров при выборе рабочей конфигурации ПЛК полностью поясняется в следующем разделе, без дублирования входных и выходных модулей в рамках двух ПЛК конфигураций – рабочей и резервной.

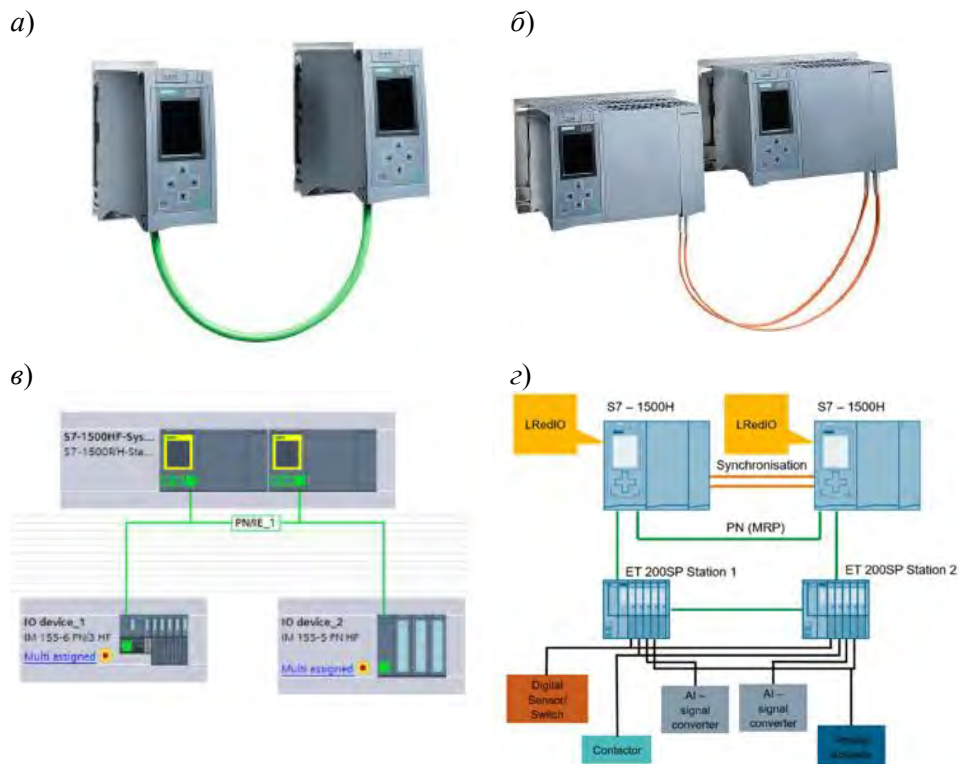


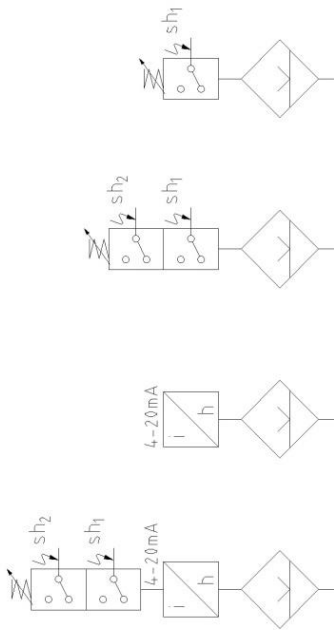
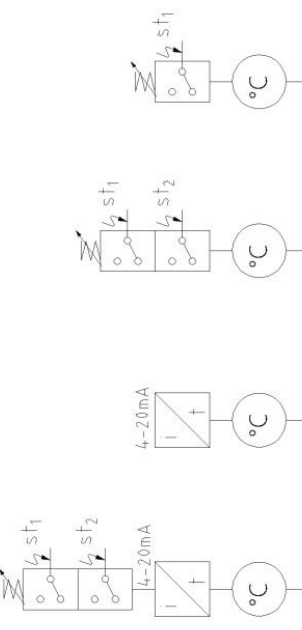
Рис. 1. Технология резервирования ПЛК компьютеров [1]

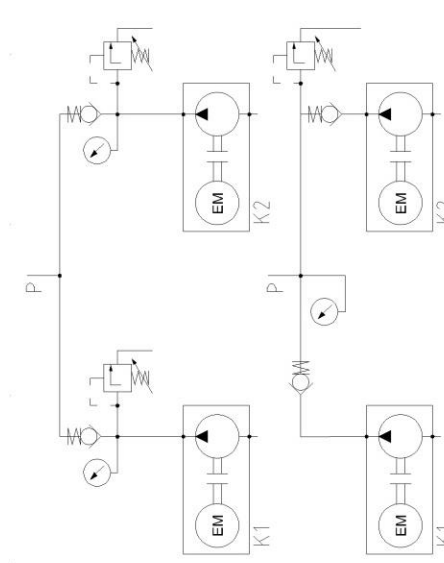
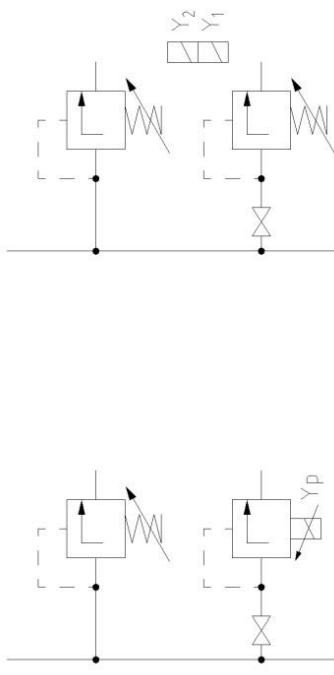
Дублирование гидравлических контуров

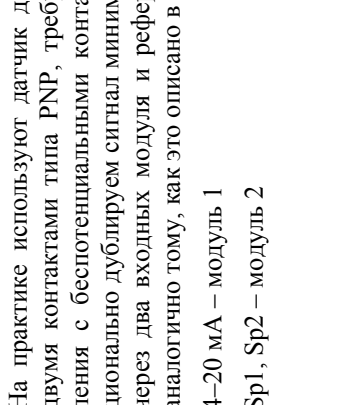
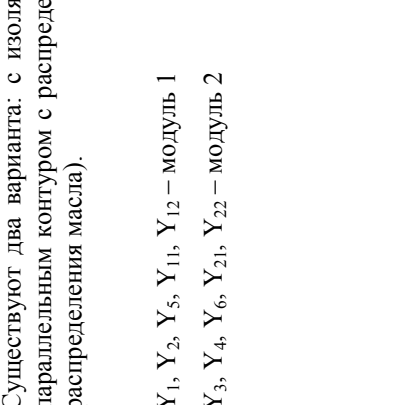
Дублирование гидравлических контуров наглядно показано в таблице и на рис. 2 по функциональным частям основного рабочего контура электрогидравлической системы.

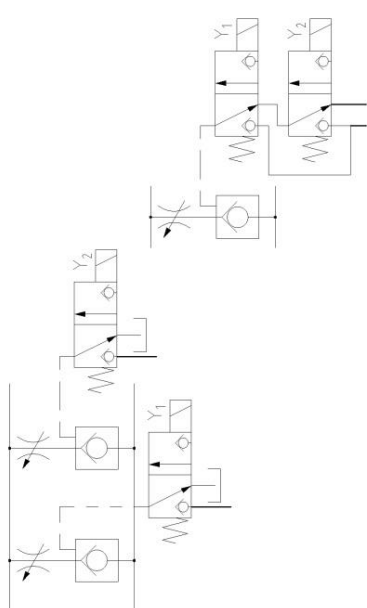
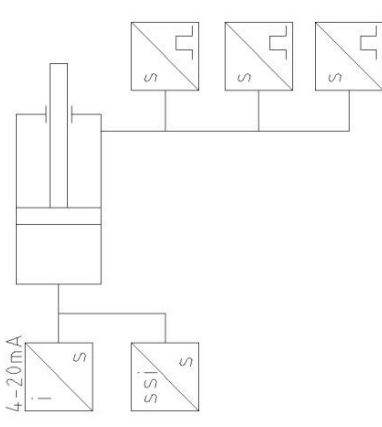
Идеальный случай дублирования

Совершенным или идеальным случаем дублирования является тот случай, когда, помимо комплектующих гидравлической и управляющей компьютерной частей системы, в дублирование включены исполнительные органы-цилиндры и механические соединения. На практике самой большой проблемой является цилиндр, потому что его трудно удвоить как исполнительный орган. У некоторых сегментных затворов с двумя цилиндрами, где мы имеем большую жесткость, можно функционально изолировать один цилиндр, если он имеет такие внутренние или внешние утечки,

№ пп.	Функция и графическое описание	Примечание
1	<p data-bbox="448 1361 480 1787">Измерение уровня масла в гидробаке</p> 	<p data-bbox="448 248 635 1095">Два датчика: один с двумя контактами и один с аналоговым выходным сигналом – непрерывное измерение уровня. Таким образом, сигналы двух разных модулей вводятся в ПЛК, контакты для минимального и максимального уровней дублируются через прикладное программное обеспечение, генерируются на основе адекватных эталонов для датчика с аналоговым выходным сигналом.</p> <p data-bbox="699 860 775 1095">4–20мА – модуль 1 Sh1, Sh2 – модуль 2</p>
2	<p data-bbox="876 1294 908 1787">Измерение температуры масла в гидробаке</p> 	<p data-bbox="876 248 1027 1095">Два датчика температуры: один с беспотенциальными контактами для минимальной и максимальной температур с газовым капилляром и зондом, а другой с электронным зондом для измерения температуры и аналоговым выходным сигналом. Логика соединения аналогична вышеописанной для уровня масла.</p> <p data-bbox="1091 860 1168 1095">4–20мА – модуль 1 St1, St2 – модуль 2</p>

3	<p>Насосный агрегат</p> 	<p>Существуют два варианта: со встроенным блоком клапанов и с общим блоком клапанов. В первом случае выход из строя блока «тянет» и насосный агрегат, и наоборот. Второй случай рассмотрен в п. 4 таблицы. В любом случае цифровые сигналы, связанные с одним насосным агрегатом, идут в один модуль, а от другого насосного агрегата в другой модуль ПЛК компьютера.</p> <p>K₁ – модуль 1 K₂ – модуль 2</p>
4	<p>Минимальное и максимальное давление в системе</p> 	<p>Здесь отдельно рассматривается вариант с пропорциональным клапаном ограничения давления и с клапаном с электромагнитом для разгрузки, когда один блок клапанов отвечает за два и более насосных агрегата.</p> <p>Y₁ – модуль 1 Y₂ – модуль 2</p>

№ пп.	Функция и графическое описание	Примечание
5	<p>Управляющий распределитель 4/3</p> 	<p>На практике используют датчик давления с аналоговым сигналом и двумя контактами типа PNP, требующими питания, и два реле давления с беспотенциальными контактами. Таким образом, мы функционально дублируем сигнал минимального и максимального давления через два входных модуля и референций программного обеспечения аналогично тому, как это описано в п. 1 и 2 этой таблицы.</p> <p>4–20 мА – модуль 1 Sp1, Sp2 – модуль 2</p>
6	<p>Блокирующий клапан</p> 	<p>Существуют два варианта: с изоляцией рабочего распределителя и с параллельным контуром с распределителями 2/2 (1 или 2 направления распределения масла).</p> <p>Y₁, Y₂, Y₅, Y₁₁, Y₁₂ – модуль 1 Y₃, Y₄, Y₆, Y₂₁, Y₂₂ – модуль 2</p>

7	<p>Позиция цилиндра</p> 	<p>Существуют два варианта: дублирование только управляющих распределителей или два клапана в параллельном соединении, где мы можем разделить расход по 50 % или 100 % на резервы в зависимости от того, что позволяет нам определенная технология привода движения затвора.</p> <p>Y₁ – модуль 1 Y₂ – модуль 2</p>
8	<p>Минимальное и максимальное давление в системе</p> 	<p>Относительно цилиндров, в зависимости от выбранной технологии измерения, сигнал может быть дублирован от 2 до 5 раз. Один вариант – дублирование магнестрикционного датчика хода, другой вариант – когда имеется встроенная измерительная система, которая соединена с покрытием штока, и три датчика-сенсора подчета одновременно заботятся о правильности измерения каждого канала.</p> <p>4–20мА – модуль 1 SSI – модуль 2 п – модуль 3 (4)</p>

что требуемое усилие не может быть достигнуто. Для этого необходимо, чтобы система была на 100 % увеличена по отношению к цилиндру. Но чаще всего работоспособность цилиндра теряется из-за механического повреждения (удара инородного тела), в первую очередь из-за изгиба штока так, что его перемещение блокируется, то есть теряется функция гидроцилиндра.



Рис. 2. Удвоение системы (датчики) электрогидравлического привода затвора ГМО – предохранительные уровни управления в алгоритме [2], [3]

Близкое к идеалу проектное решение было реализовано на практике за счет встроенных электрогидравлических и электромеханических приводов с редуктором и гидромотором, рассчитанным на 100 % номинальной мощности. Они работают в паре с одним уравновешенным сегментным затвором таким образом, что две «зубчатые линии» для цепочного механизма находятся на «остановочном» листе затвора, так что в случае отказа одного встроенного привода он механически отделяется от привода через автоматическую муфту. Таким образом, один встроенный привод независим от источника питания (обычно имеются два питания, рабочее и резервное, и третье от дизельного агрегата) до механического соединения привода, которое является автоматически разъединяемым. Базовый вид этого привода показан на рис. 3.

Принципы определения проектного решения на примере аварийно-ремонтного затвора

Управление аварийно-ремонтным затвором (АРЗ) с точки зрения надежности рабочей функции является наиболее требовательной электрогидравлической системой. В основном есть две номинальные функции: быстрое

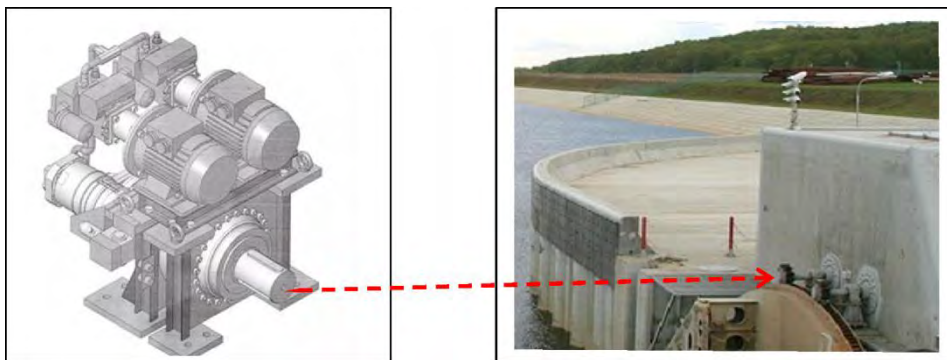


Рис. 3. Идеальный случай дублирования электрогидравлического привода

закрытие, т.е. опускание затвора в течение определенного времени в поток воды, и корректировка просадки затвора, находящегося в поднятом положении, пока работает турбина. Особенно важна первая номинальная функция, она реализуется чаще всего опусканием затвора под собственным весом, поэтому предметом рассмотрения работоспособности системы является не та часть, которая обеспечивает гидравлическую энергию, насосные агрегаты. Здесь важно только обеспечить надежность функционирования начала и поддержания функции управления опусканием. Чаще всего это делается при удвоении клапана 2/2 в нормально закрытом варианте или в нормально открытом варианте, чтобы опускание началось прерыванием управляющего напряжения. Кроме того, для абсолютной надежности этой функции на управляющий клапан в нормально закрытом варианте устанавливается механическая блокировка, так что однажды активированный клапан для опускания, открытый повышением напряжения, не может прекратить свою работу, пока это не будет сделано специальным управляющим электромагнитным сбросом, разумеется, только после завершения опускания затвора. На рис. 4 показан пример электрогидравлического контура опускания затвора в полном объеме в виде гибкой платформы, которую можно отдельно конфигурировать в соответствии с различными требованиями. Здесь резервирование достигается чаще всего с помощью двух независимых цепей управления и прямым проводным соединением для создания управляющего требования на быстрое аварийное опускание затвора.

Особенности решений для систем с синхронным движением

Этот класс систем чаще всего конфигурируется так, что в случае отказа насосных агрегатов или клапанов для управления синхронным движением, он переходит на 50 % скорости при сохранении рабочей функции синхронного движения.

Рабочий клапан для обеспечения синхронного движения, будь то пропорциональный или On/Off, сдвоен таким образом, что в случае отказа он работает с вдвое меньшим расходом. Это не настоящее удвоение, 100% пассивный резерв, а клапан меньшего и большего расхода, которые в основной конфигурации работают так, что клапан с большим расходом поддерживает номинальный расход и скорость, а меньший служит для ком-

пенсации погрешности синхронного движения с более высокой скоростью и точностью. В случае выхода из строя клапана с большим расходом номинальная, уменьшенная скорость переключается на более низкую, что одновременно компенсирует погрешность. Если клапан с меньшим расходом вышел из строя, то клапан с более высоким номинальным расходом берет на себя функцию клапана с меньшим расходом. У насосных агрегатов, когда они являются элементами управления синхронным движением (насосы с пропорциональным управлением расходом), мы можем иметь 100% пассивный резерв и тогда после отказа рабочего агрегата включаем резервный или имеем два рабочих агрегата, потоки которых суммируются. Тогда при выходе из строя одного отключается такой же с другой стороны, и движение продолжается с пониженным потенциалом скорости, но без нарушения качества синхронного движения. На рис. 5 представлен вариант удвоения с использованием On/Off клапанов 2/2 и 3/2 с седлом, что также обеспечивает надежность функции синхронного движения.

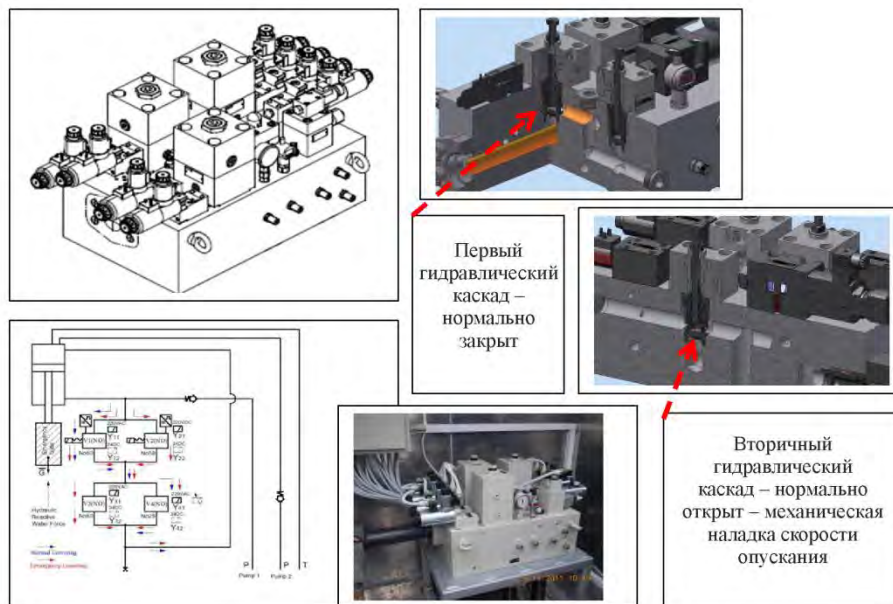


Рис. 4. Управление аварийно-ремонтным затвором

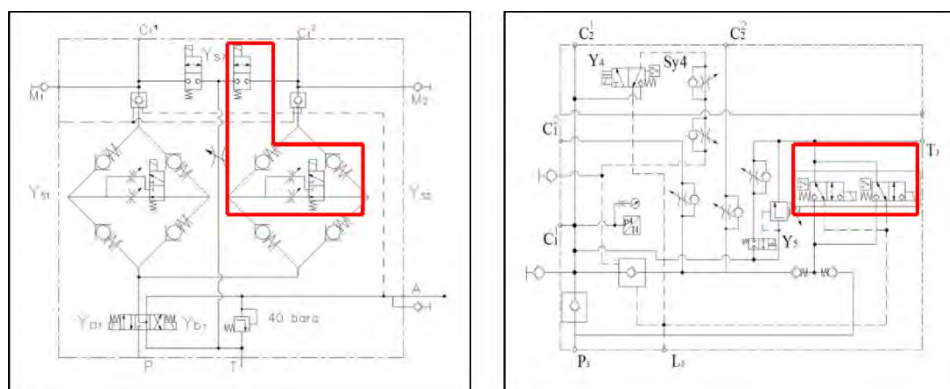


Рис. 5. Синхронное движение затвора

Заключение

На основании ранее рассмотренного мы можем сделать следующие выводы.

Необходимо полностью согласовать конфигурацию гидравлической части и управляющей компьютерной части системы.

Оптимальной конфигурацией управляющей компьютерной части является дублирование конфигурации ПЛК на уровне питания и процессорного модуля, причем связь осуществляется напрямую без отдельного коммуникационного модуля (рис. 1, а).

При ранее определенной конфигурации ПЛК, наряду с адекватными решениями по дублированию функций в гидроконтуре системы (см. таблицу), могут быть обеспечены различные виды работоспособности в случае отказа: от ограниченной (по скорости и качеству работы) до такой, которая на 100 % соответствует номинальной рабочей емкости.

Только в случае системы АРЗ имеется дополнительный вариант реле управления аварийным опусканием ввиду дублирования комплектующих в гидравлической части и чаще всего наличия двух независимых защитных систем управления, которые также используют разные управляющие напряжения для гидравлических комплектующих.

На основании таблицы мы видим, что в конфигурации ПЛК возможно разделение сигналов по модулям, поэтому выход из строя одного модуля не означает потери информации для алгоритма управления, так как во втором модуле есть информация, которая вместе с программной логикой может функционально заменить ту, что была в модуле, где произошел отказ.

Вышеупомянутое обозначает, что в варианте удвоения ПЛК модули не должны дублироваться для прохождения одного и того же сигнала через два модуля. Это значит, что возможно полностью обеспечить резервирование ПЛК и работоспособность системы управления при любом сбое в системе управления только на базе удвоенного модуля центрального процессора (рис. 1, а).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Siemens SIMATIC-S7-1500 R/H Redundant System: system manual**, edition 10/2018. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7506b4b1-8261-4942-9346-7c28d6951ff0/s71500rh-manual-en-us-en-us.pdf>.
2. **Техническая документация** «ППТ-Инжиниринг».
3. **Каталоговая документация** фирмы Waycon. URL: <https://waycon.ru/downloads/>.

REFERENCES

1. **Siemens SIMATIC-S7-1500 R/H Redundant System: system manual**, edition 10/2018. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7506b4b1-8261-4942-9346-7c28d6951ff0/s71500rh-manual-en-us-en-us.pdf>.
2. PPT-Engineering technical documentation.
3. Waycon catalog documentation. URL: <https://waycon.ru/downloads/>.

Информация об авторах

Наупарац Д. – доктор техн. наук, инженер-механик, главный инженер;
Вишнич Н. – доктор техн. наук, инженер-механик, руководитель проекта.

Information about the authors

Nauparas D. – Dr. Sci. (Techn.), Mechanical Engineer, Chief Engineer;
Vishnich N. – Dr. Sci. (Techn.), Mechanical Engineer, Project Leader.

Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 05.12.2022; approved after reviewing 03.03.2022; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 551.482.215.1

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОКОВОЙ ПРИТОЧНОСТИ НА УЧАСТКЕ р. ВИЛЮЙ МЕЖДУ ГИДРОУЗЛАМИ ВИЛЮЙСКИХ ГЭС-1, 2 И СВЕТЛИНСКОЙ ГЭС

**Наталья Симовна Бакановичус¹, Анна Алексеевна Лялина²,
Анна Александровна Максимова³, Алена Владимировна Пучкарюс⁴**

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

¹ BakanovichusNS@vniig.ru

² LyalinaAA@vniig.ru

³ MaksimovaAA@vniig.ru

⁴ PuchkaryusAV@vniig.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетов гидрологических характеристик боковой приточности на участке р. Виллюй между створами гидроузлов Виллюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС для среднегодового, максимального стока за период весеннего половодья и дождевых паводков, минимального стока с учетом данных последних лет наблюдений. Проведен сравнительный анализ полученных характеристик с результатами исследований прошлых лет. Определено, что в условиях современной гидрометеорологической изученности наиболее корректным является получение гидрологических характеристик боковой приточности на рассматриваемом участке р. Виллюй с привлечением данных по стоку р. Улахан-Ботубуйа в створе действующего гидрологического поста Захар.

Ключевые слова: *Виллюйские ГЭС-1,2, Светлинская ГЭС, река Улахан-Ботубуйа, боковая приточность, гидрологические характеристики, среднегодовой сток, максимальный сток, минимальный сток*

Для цитирования: Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Пучкарюс А.В. Обоснование расчетных гидрологических характеристик боковой приточности на участке р. Виллюй между гидроузлами Виллюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 27–41.

Original article

SUBSTANTIATION OF THE CALCULATED HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE LATERAL INFLOW ON THE VILYUY RIVER SECTION BETWEEN THE HYDROELECTRIC UNITS OF THE VILYUY HPP-1, 2 AND THE SVETLINSKAYA HPP

**Natalia S. Bakanovichus¹, Anna A. Lyalina²,
Anna A. Maksimova³, Alyona V. Puchkoryus⁴**

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

¹ BakanovichusNS@vniig.ru

² LyalinaAA@vniig.ru

³ MaksimovaAA@vniig.ru

⁴ PuchkaryusAV@vniig.ru

© Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Пучкарюс А.В., 2023

Abstract. The results of calculations of the hydrological characteristics of the lateral inflow on the Vilyuy River section between the waterworks of the Vilyuy HPP-1, 2 and Svetlinskaya HPP for the average annual, maximum flow during the spring tide and rain floods, minimum flow taking into account the data of recent years of observations are presented. A comparative analysis of the obtained characteristics with the results of previous years research is carried out. It is determined that in the conditions of modern hydrometeorological knowledge, the most correct is to obtain the hydrological characteristics of the lateral inflow in the considered section of the Vilyu River with the involvement of data on the flow of the Ulakhan-Botuobuya River in the alignment of the current hydrological post Zakhar.

Keywords: *Vilyuy HPP-1,2, Svetlinskaya HPP, Ulakhan-Botuobuya River, lateral inflow, hydrological characteristics, average annual flow, maximum flow, minimum flow*

For citation: Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Maksimova A.A., Puchkoryus A.V. Substantiation of the calculated hydrological characteristics of the lateral inflow on the Vilyuy River section between the hydroelectric units of the Vilyuy HPP-1, 2 and the Svetlinskaya HPP. *Proceedings of the VNIIG.* 2023;308:27-41. (In Russ.).

Введение. Общие сведения

Вилуйское и Светлинское водохранилища – водоемы, образованные путем каскадного зарегулирования стока р. Вилуей (рис. 1).

Светлинская ГЭС находится в стадии незавершенного строительства при наполнении водохранилища до промежуточной отметки НПУ, равной 175,0 м БС-77. В 2021 г. во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева для выявления факторов, влияющих на формирование уровенного режима в нижнем бьефе гидроузла Вилуйских ГЭС-1, 2, была проведена комплексная работа, состоящая из последовательно выполненных блоков исследований [1].



Рис. 1. Обзорная схема района расположения Вилуйского и Светлинского водохранилищ

Данная статья посвящена результатам обоснования расчетных гидрологических характеристик боковой приточности на участке р. Вилуей протяженностью 141 км между створами плотин Вилуйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС, с актуализацией рядов гидрологических наблюдений до 2019 г. включительно.

Боковая приточность на участке р. Виллой между створами гидроузлов Виллойских ГЭС-1,2 и Светлинской ГЭС формируется с частной площади водосбора 20 000 км². Следует отметить, что 88 % частной площади приходится на правобережный приток р. Виллой – реку Улахан-Ботубуйа, площадь водосбора которой составляет 17 500 км².

Первые наблюдения за гидрологическим режимом на р. Улахан-Ботубуйа приурочены к концу 1962 г., к открытию поста в селе Тас-Юрях, наблюдения на котором велись до 1993 г. С мая 1993 г. по настоящее время в 40 км от устья действует гидрологический пост (г.п.) р. Улахан-Ботубуйа – г.п. Захар. Гидрологическая изученность исследуемого района представлена на рис. 2.

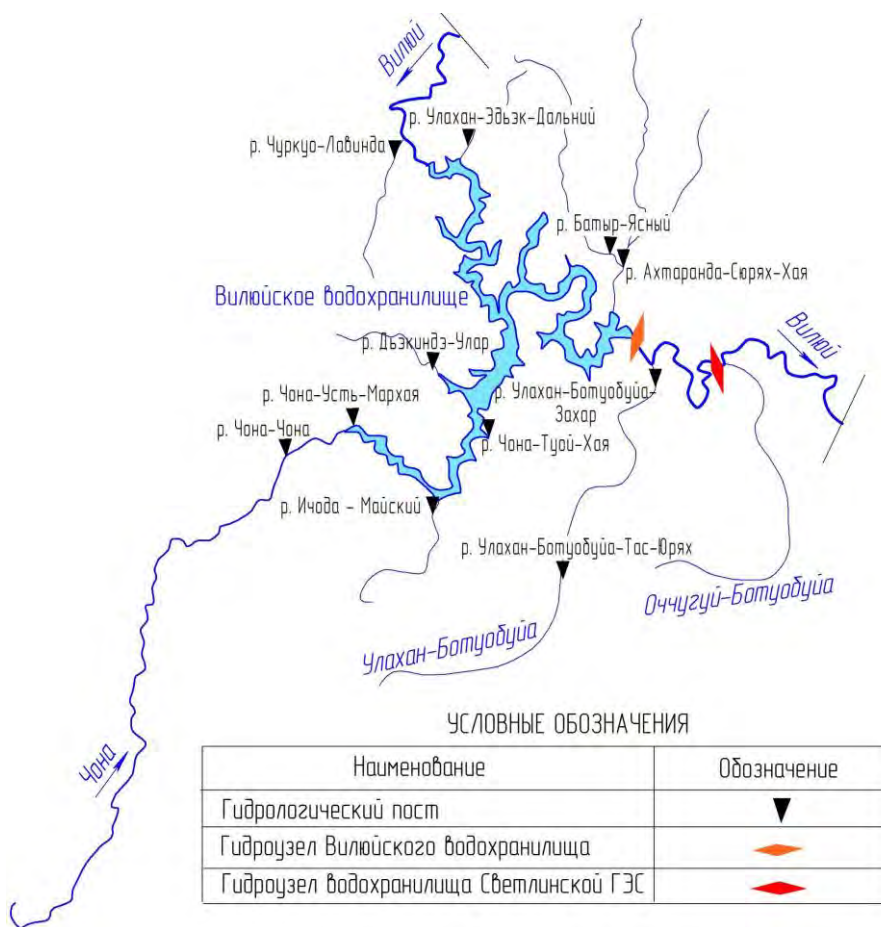


Рис. 2. Гидрологическая изученность исследуемого участка р. Виллой

Методики формирования исходных рядов гидрологических характеристик

На момент проведения исследований основными работами, посвященными обоснованию гидрологических характеристик боковой приточности, являлись:

1. Проект Вилюйской ГЭС-III на р. Вилюй, разработанный Ленинградским отделением Гидропроекта в 1982 г. (далее по тексту – Проект 1982 г.), где представлены сведения о характеристиках боковой приточности, определенные за период наблюдений до 1980 г. [2].

2. Проект «Уточнение отметки наполнения водохранилища Вилюйской ГЭС-III, обеспечивающей прочность и устойчивость элементов плотины Каскада Вилюйских ГЭС им. Е.Н. Батенчука», том 1329-2-664т-ИЗ «Инженерно-гидрологические изыскания», выполненный АО «Ленгидропроект» в 2015 г. (далее по тексту – ЛГП), содержащий результаты исследований по определению характеристик боковой приточности, актуализированных до 2015 г. включительно [3].

Анализ результатов предыдущих исследований и гидрологической изученности участка р. Вилюй между створами гидроузлов Вилюйского и Светлинского водохранилищ свидетельствует о том, что расчет гидрологических характеристик может быть осуществлен несколькими альтернативными способами. Блок-схема методик расчета гидрологических характеристик представлена на рис. 3.

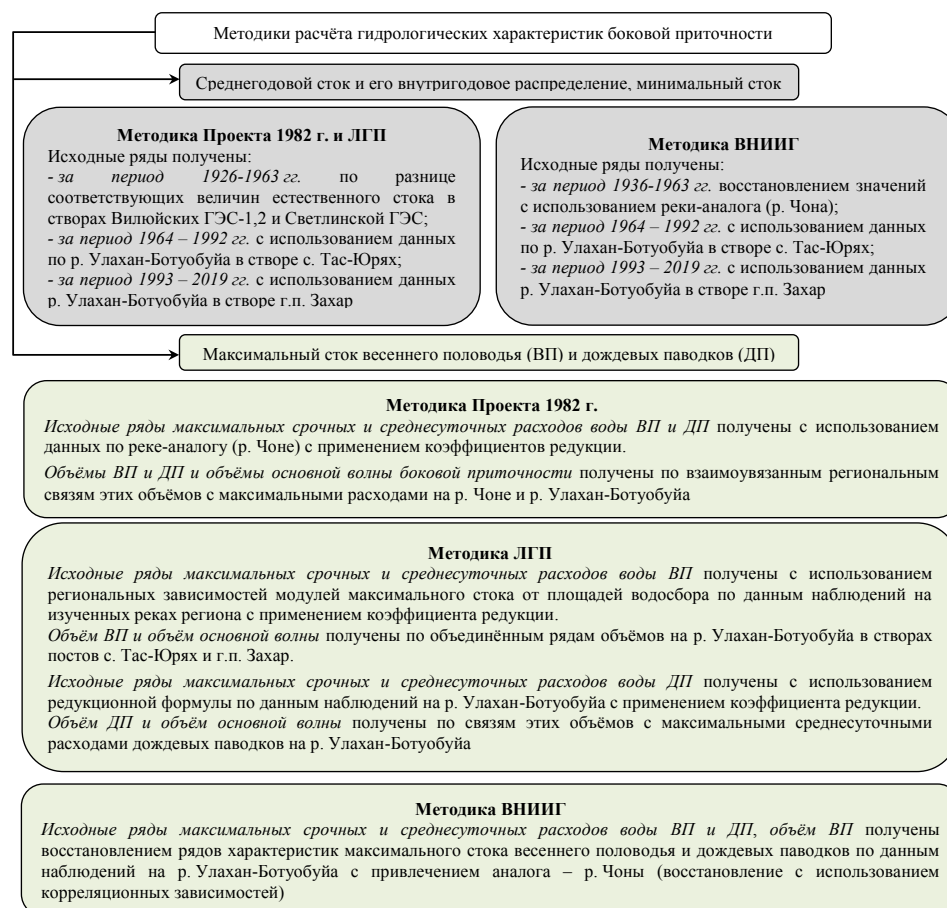


Рис. 3. Блок-схема методик расчета гидрологических характеристик

Результаты исследований и их анализ. Сравнение результатов

Годовой сток

Ключевым отличием в формировании рядов среднемесячных и среднегодовых расходов воды боковой приточности в методиках, представленных в отчетных материалах Проекта 1982 г. и ЛГП, и альтернативными расчетами ВНИИГ является восстановление значений в период до начала наблюдений на р. Улахан-Ботуобуйа, т.е. до 1963 г.

Сток с частной площади водосбора за 1926–1963 гг. в рамках Проекта 1982 г. (с дальнейшим использованием ЛГП в своих изысканиях) с учетом имеющихся на тот момент данных наблюдений получен с привлечением нескольких аналогов, усредненных зимних коэффициентов, графиков связей уровней на различных гидрологических постах и пр., вследствие чего привнесенная в расчеты суммарная ошибка различных методик может быть значительной.

Для восстановления годового стока за период до 1963 г. во ВНИИГ был использован метод гидрологической аналогии, в качестве реки-аналога была выбрана р. Чона, которая является правобережным притоком р. Вилюй, расположена в идентичных климатических условиях и полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым к рекам-аналогам в соответствии с СП 33-101-2003.

Формирование ряда с 1963 г. для всех методик основано на приведении стока р. Улахан-Ботуобуйа в створах гидрологических постов в с. Тас-Юрях ($F = 9\,230\text{ км}^2$) и г.п. Захар ($F = 16\,900\text{ км}^2$) ко всей площади частного водосбора между Вилюйскими ГЭС-1,2 и Светлинской ГЭС ($20\,000\text{ км}^2$) через площадные коэффициенты.

ВНИИГ выполнил расчеты годового стока и его внутригодового распределения по обеим методикам с учетом актуализации данных до 2019 г. Для примера в табл. 1 приведены результаты расчета обеспеченных среднегодовых расходов воды по различным методикам.

Таблица 1

Среднегодовой сток р. Вилюй – боковая приточность

Источник данных	Расчетные значения среднегодовых расходов воды различной вероятности превышения						
	период	1	5	10	50	90	95
Актуализированные расчеты на основе проектных данных 1982 г. и данных АО «ЛГП» 2015 г.	1926–2019 гг.	155	114	96,2	53,1	29,1	24,5
Альтернативные расчеты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2021 г.	1936–2019 гг.	161	121	104	58,3	31,6	26,4

Анализ полученных результатов свидетельствует о достаточной близости расчетных значений среднегодового стока различных вероятностей превышения. При этом статистическая обработка ряда, сформированного на основе проектного метода, выявила его неоднородность, в связи с чем для аппроксимации эмпирических значений использовалась составная аналитическая кривая.

В то же время ряд, полученный по расчетам ВНИИГ, хоть и охватывает меньший временной интервал (84 года против 93 лет, что не является определяющим фактором), однако однороден по критерию Фишера, демонстрирует меньшую величину ошибки определения среднесуточного значения и характеризуется достаточной прозрачностью формирования.

Максимальный сток весеннего половодья

Расчет максимального стока весеннего половодья выполнен для максимальных срочных и среднесуточных расходов воды, объемов как всего весеннего половодья, так и его основной волны.

Ряды *максимальных срочных и среднесуточных расходов воды весеннего половодья* были сформированы несколькими альтернативными способами:

аналогично методологии, представленной в составе отчетных материалов Проекта 1982 г. [2], с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г. и с применением различных коэффициентов редукции (по данным проекта и актуализированным данным);

аналогично методологии АО «Ленгидропроект» 2015 г. [3] с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г. и с применением различных коэффициентов редукции (по данным ЛГП и актуализированным данным);

восстановлением с использованием корреляционных зависимостей соответствующих гидрологических характеристик на р. Улахан-Ботуобуйа и р. Чоне без привлечения коэффициента редукции и с его использованием.

Актуализация коэффициента редукции. Для построения редуccionной зависимости с учетом данных последних лет наблюдений привлекались наблюдения за стоком в створах действующих постов Росгидромета района расположения Вилуйского и Светлинского водохранилищ. Для формирования более продолжительных рядов наблюдений на р. Чоне и р. Улахан-Ботуобуйа были также задействованы данные по закрытым постам. Перечень постов, сведения по которым привлекались для построения районной редуccionной зависимости, приводится в табл. 2, а их местоположение показано на рис. 2.

Актуальная районная редуccionная зависимость строилась как для максимальных срочных, так и для максимальных среднесуточных расходов воды весеннего половодья. При использовании величин максимальных срочных расходов воды коэффициент редукции (n) для рассматриваемой территории составляет 0,23; при использовании максимальных среднесуточных расходов воды – 0,21.

На рис. 4 в качестве примера представлена районная редуccionная зависимость для срочных расходов воды.

Таблица 2

**Гидрологические посты для построения районной
редукционной зависимости**

Наименование поста	Площадь водосбора, км ²	Период действия	Количество лет наблюдений
р. Чуркуо – г.п. Лавинда	4 130	1971 г. – действ.	49
р. Улахан-Эдьэк – г.п. Дальний	854	1977 г. – действ.	43
р. Чона – ГМС Чона	21 000	1974 г. – действ.	46
р. Чона – местн. Усть-Мархая	22 600	1965 – 1974 гг.	9
р. Чона – с. Туой-Хая	37 700	1935 – 1967 гг.	29
р. Ичода – г.п. Майский	2 820	1972 г. – действ.	46
р. Дьэкиндэ – г.п. Улар	1 490	1978 г. – действ.	42
р. Ахтаранда – г.п. Сюрях-Хая	11 600	1976 г. – действ.	44
р. Батыр – г.п. Ясный	3 380	1969 г. – действ.	50
р. Улахан-Ботуобуйа – с. Тас-Юрях	9 230	1962 – 1993 гг.	29
р. Улахан-Ботуобуйа – г.п. Захар	16 900	1993 г. – действ.	27

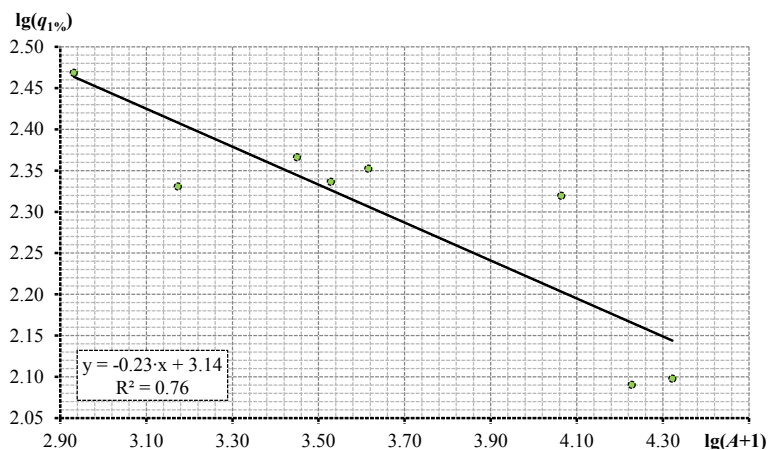


Рис. 4. Районная редукционная зависимость максимального весеннего стока для рек рассматриваемого района (срочные расходы воды)

Метод Проекта. В рамках этого подхода максимальный сток весеннего половодья с частной площади водосбора между гидроузлами Вилюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС определен с привлечением данных по р. Чоне. Вероятностные значения максимальных модулей весеннего половодья на р. Чоне в с. Туой-Хая с учетом редукции модулей приняты для расчета максимальных расходов воды боковой приточности между створами Вилюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС. В проектных данных коэффициент редукции принимался равным 0,17. В Проекте 1982 г. наблюдения на различных гидрологических постах на р. Чоне приведены к одному объединенному ряду в створе с. Туой-Хая (37 700 км²), что связано с наличием

наиболее продолжительного ряда наблюдений в створе этого поста к моменту проведения проектных изысканий.

Метод ЛГП. При реализации этого подхода с учетом данных последних лет наблюдений построены региональные зависимости модулей максимального стока от площади водосбора по данным рек-аналогов, представленным в табл. 2. В качестве примера на рис. 5 представлены региональные зависимости для максимальных срочных расходов воды. Наблюдения на различных гидрологических постах одного водного объекта приводились к единому ряду с применением коэффициентов редукиции (для р. Чоны и р. Улахан-Ботубуйа). В материалах ЛГП коэффициент редукиции принимался равным 0,17.

Метод ВНИИГ. Восстановление значений произведено по кривой связи соответствующих характеристик максимального стока в створах постов р. Улахан-Ботубуйа – г.п. Захар и р. Чона – гидрометеорологическая станция (ГМС) Чона за совместный период наблюдений. Надежность связи подтверждается высокими коэффициентами парной корреляции (0,77 и 0,76 – для рядов максимальных срочных и среднесуточных расходов воды соответственно).

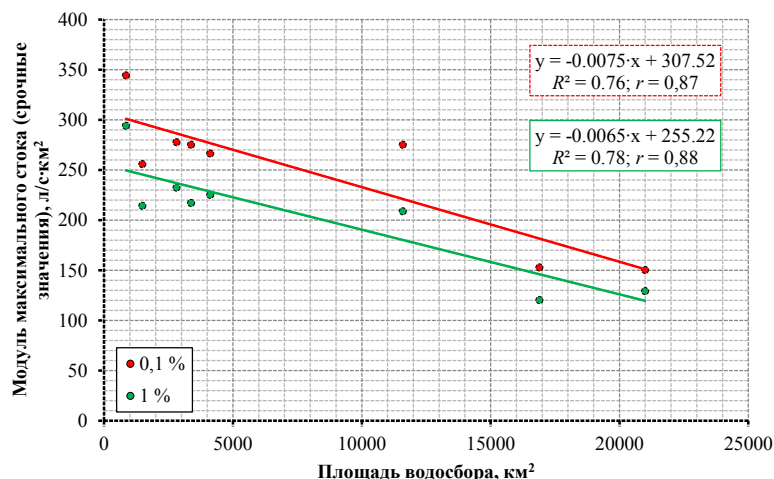


Рис. 5. Региональные зависимости модуля максимального стока от площади водосбора (срочные значения)

В совместный период наблюдений, используемый для построения корреляционной зависимости, не включались данные по гидрологическому посту р. Улахан-Ботубуйа – с. Тас-Юрях, ввиду регулирующего влияния большого количества термокарстовых озер и понижений, занижающих величину максимальных расходов воды, что следует из анализа архивных материалов Росгидромета (гидрологических ежегодников) и материалов Проекта 1982 г.

Расчеты проводились для максимальных срочных и среднесуточных расходов воды весеннего половодья. Для примера в табл. 3 приведены результаты расчета обеспеченных максимальных среднесуточных расходов воды боковой приточности, полученные различными методиками.

В целом анализ полученных результатов свидетельствует о достаточной близости расчетных значений максимального стока весеннего половодья различных вероятностей превышения.

Таблица 3

**Максимальные среднесуточные расходы воды
весеннего половодья р. Виллой – боковая приточность**

Источник данных	Расчетные значения максимальных среднесуточных расходов воды весеннего половодья вероятности превышения			
	0,1	1	5	10
Актуализированные расчеты на основе подхода Проекта 1982 г. ($n = 0,17$)	2960	2540	2170	1990
Актуализированные расчеты на основе подхода Проекта 1982 г. ($n = 0,21$)	2990	2560	2190	2010
Актуализированные расчеты на основе подхода АО «ЛГП» 2015 г. ($n = 0,17$)	3160	2500	×	×
Актуализированные расчеты на основе подхода АО «ЛГП» 2015 г. ($n = 0,21$)	3200	2540	×	×
Альтернативные расчеты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2021 г. (без n)	3370	2660	2110	1850
Альтернативные расчеты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2021 г. ($n = 0,21$)	3370	2660	2120	1860

При этом:

подход Проекта был обоснован в 1982 г., однако на настоящий момент формирование единого ряда для р. Чоны с целью привлечения ее как аналога для восстановления стока с частной площади водосбора между створами плотин Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС (20 000 км²) более корректно проводить для действующего гидрологического поста ГМС Чона (21 000 км²) ввиду большей сопоставимости площадей водосбора и наличия продолжительного ряда наблюдений. Кроме того, применение проектного подхода для определения характеристик максимального стока весеннего половодья боковой приточности ввиду наличия действующего поста на основном притоке р. Улахан-Ботубуйа, охватываемого наблюдениями 82 % водосборной площади между Виллойскими ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС, необоснованно;

подход ЛГП включает в себя привлечение целого ряда аналогов, каждый из которых приносит свою погрешность в итоговые результаты расчетов;

в рамках подхода ВНИИГ наличие тесной корреляционной связи позволяет произвести расчеты максимального стока боковой приточности с достаточной степенью надежности, минимизацией возможных ошибок и привлечением всей доступной информации по основному притоку на рассматриваемом участке р. Виллой. Обеспеченные величины при использовании различных коэффициентов редукции отличаются максимум на 2 %. Однако при альтернативных расчетах ВНИИГ с привлечением коэффициента редукции выявлено, что ряды, полученные с применением актуализированного коэффициента редукции, более однородны (более не прослеживается неоднородность по критерию Стьюдента, отмечавшаяся при статистической обработке ряда, полученного без применения коэффициента редукции), а также для рядов, полученных с привлечением коэффициента

редукции, отсутствует статистическая значимость тренда при анализе хронологического графика.

Расчетные обеспеченные значения *объемов всего половодья и основной волны*, привлекаемые для построения расчетных гидрографов, получены:

аналогично методологии, представленной в составе отчетных материалов Проекта 1982 г. [2], с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г.;

аналогично методологии АО «Ленгидропроект» 2015 г. [3] с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г.;

восстановлением с использованием корреляционных зависимостей соответствующих гидрологических характеристик на р. Улахан-Ботуобуйа и р. Чоне.

Метод Проекта. В рамках этого подхода расчетные обеспеченные значения объемов всего половодья и основной волны для боковой приточности получены по взаимоувязанным региональным связям этих объемов с максимальными расходами.

Региональные связи построены по данным наблюдений за период до 2019 г. включительно на гидрологических постах р. Чоны и р. Улахан-Ботуобуйа (рис. 6).

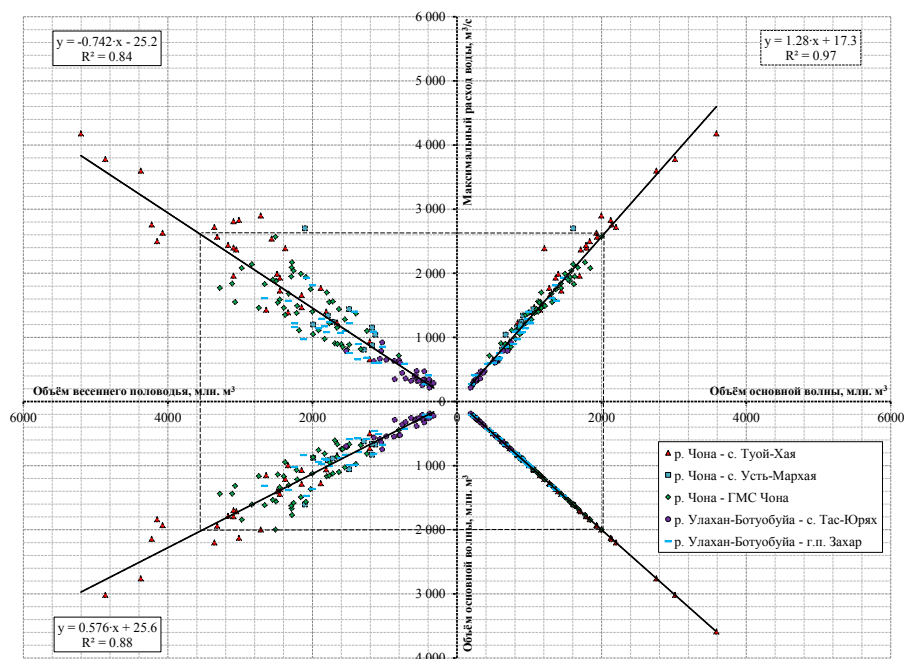


Рис. 6. Региональные связи объемов всего половодья и его основной волны с максимальным среднесуточным расходом воды

Метод ЛГП. В рамках этого подхода объемы всего половодья и основной волны боковой приточности различной обеспеченности получены по объединенным рядам объемов на р. Улахан-Ботуобуйа с привлечением данных наблюдений на гидрологических постах с. Тас-Юрях и г.п. Захар.

Метод ВНИИГ. Восстановление значений объемов весеннего половодья произведено по кривой связи соответствующих характеристик в

створах постов р. Улахан-Ботуобуйа – г.п. Захар и р. Чона – ГМС Чона за совместный период наблюдений. Надежность связи подтверждается достаточно высоким коэффициентом корреляции, равным 0,73.

Максимальный сток дождевых паводков

Расчет максимального стока дождевых паводков выполнен для максимальных срочных и среднесуточных расходов воды, объемов как всего дождевого паводка, так и его основной волны.

Ряды характеристик *максимальных срочных и среднесуточных дождевых паводков* были сформированы несколькими альтернативными способами:

аналогично методологии, представленной в составе отчетных материалов Проекта 1982 г. [2], с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г. и с применением различных коэффициентов редукции (по данным проекта и актуализированным данным);

аналогично методологии АО «Ленгидропроект» 2015 г. [3] с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г. и с применением различных коэффициентов редукции (по данным ЛГП и актуализированным данным);

восстановлением с использованием корреляционных зависимостей соответствующих гидрологических характеристик на р. Улахан-Ботуобуйа и р. Чоне без привлечения коэффициента редукции и с его использованием.

Актуализация коэффициента редукции. На первом этапе расчетов была произведена актуализация коэффициента редукции. Для этого были построены районные редуccionные зависимости по данным рек-аналогов с учетом данных последних лет наблюдений (табл. 2). Актуальная районная редуccionная зависимость строилась как для максимальных срочных, так и для максимальных среднесуточных расходов воды дождевых паводков. При использовании величин максимальных срочных расходов воды дождевых паводков коэффициент редукции (n) для рассматриваемой территории составил 0,36; при использовании максимальных среднесуточных расходов воды – 0,34.

Метод Проекта. В рамках Проекта 1982 г. подходы к определению максимального стока дождевых паводков и весеннего половодья с частной площади водосбора между гидроузлами Вилуйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС идентичны. Расчет проведен по данным наблюдений гидрологических постов на р. Чоне, приведенным к одному объединенному ряду в створе с. Туой-Хая. Расчеты проведены для $n = 0,35$ (проектное значение) и для актуализированных коэффициентов редукции ($n = 0,34$ и $0,36$).

Метод ЛГП. В рамках этого подхода характеристики максимального стока дождевых паводков определены по р. Улахан-Ботуобуйа. Наблюдения в створах гидрологических постов р. Улахан-Ботуобуйа – с. Тас-Юрях и р. Улахан-Ботуобуйа – г.п. Захар приведены к единому ряду наблюдений в г.п. Захар по редуccionной формуле с коэффициентом редукции. Расчеты проведены для $n = 0,15$ (данные ЛГП) и для актуализированных коэффициентов редукции ($n = 0,34$ и $0,36$).

Метод ВНИИГ. Характеристики максимального стока дождевых паводков получены аналогичным образом, как и сток за время весеннего половодья. Ввиду наличия надежных корреляционных связей между характе-

ристиками р. Улахан-Ботубуйа и р. Чоны реализован метод гидрологической аналогии с полным соответствием всем требованиям СП 33-101-2003. Наличие тесной связи подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции (0,76 и 0,77 – для рядов максимальных срочных и среднесуточных расходов воды соответственно).

Расчеты проводились для максимальных срочных и среднесуточных расходов воды дождевых паводков. В табл. 4 в качестве примера приведены полученные различными методами обеспеченные значения максимальных среднесуточных расходов воды дождевых паводков.

Анализ полученных результатов свидетельствует о достаточной близости расчетных значений максимального стока дождевых паводков различных вероятностей превышения (различия полученных данных не превышают 17 %). Обеспеченные величины при использовании различных коэффициентов редукции отличаются максимум на 2 %.

Таблица 4

Максимальные среднесуточные расходы воды дождевых паводков р. Вилюй – боковая приточность

Источник данных	Расчетные значения максимальных среднесуточных расходов воды дождевых паводков вероятности превышения			
	0,1	1	5	10
Актуализированные расчеты на основе подхода Проекта 1982 г. ($n = 0,35$)	1470	861	519	391
Актуализированные расчеты на основе подхода Проекта 1982 г. ($n = 0,34$)	1460	862	518	391
Актуализированные расчеты на основе подхода АО «ЛГП» 2015 г. ($n = 0,15$)	1490	1010	669	523
Актуализированные расчеты на основе подхода АО «ЛГП» 2015 г. ($n = 0,34$)	1310	888	595	467
Альтернативные расчеты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2021 г. (без n)	1730	1040	641	491
Альтернативные расчеты АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2021 г. ($n = 0,34$)	1700	1030	638	491

При альтернативных расчетах статистическая обработка рядов максимальных расходов воды, полученных без применения коэффициента редукции и с ним, не выявила значимых отличий.

Применение проектного подхода ввиду наличия действующего поста на основном притоке необоснованно. В рамках метода ЛГП используются данные о максимальном стоке дождевых паводков на р. Улахан-Ботубуйа в створе гидрологического поста с. Тас-Юрях. Однако, как было замечено ранее, ввиду большого количества термокарстовых озер и понижений, возможно занижение максимальных расходов воды.

Расчетные обеспеченные значения *объемов дождевых паводков и основной волны*, привлекаемые для построения расчетных гидрографов, получены:

аналогично методологии, представленной в составе отчетных материалов Проекта 1982 г. [2], с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г.;

аналогично методологии АО «Ленгидропроект» 2015 г. [3] с учетом данных последних лет наблюдений до 2019 г.

Метод Проекта. Расчетные обеспеченные значения дождевых паводков и основной волны для боковой приточности получены по взаимосвязанным региональным связям этих объемов с максимальными расходами по данным наблюдений за период до 2019 г. включительно на гидрологических постах р. Чоны и р. Улахан-Ботуобуйа.

Метод ЛПП. В рамках этого подхода объемы всего паводка (W) и основной волны (V) различной обеспеченности получены по связям этих объемов с максимальными среднесуточными расходами дождевых паводков на р. Улахан-Ботуобуйа (рис. 7). Связи построены по ежегодным значениям максимумов и объемов наибольшего стока за период наблюдений до 2019 г.

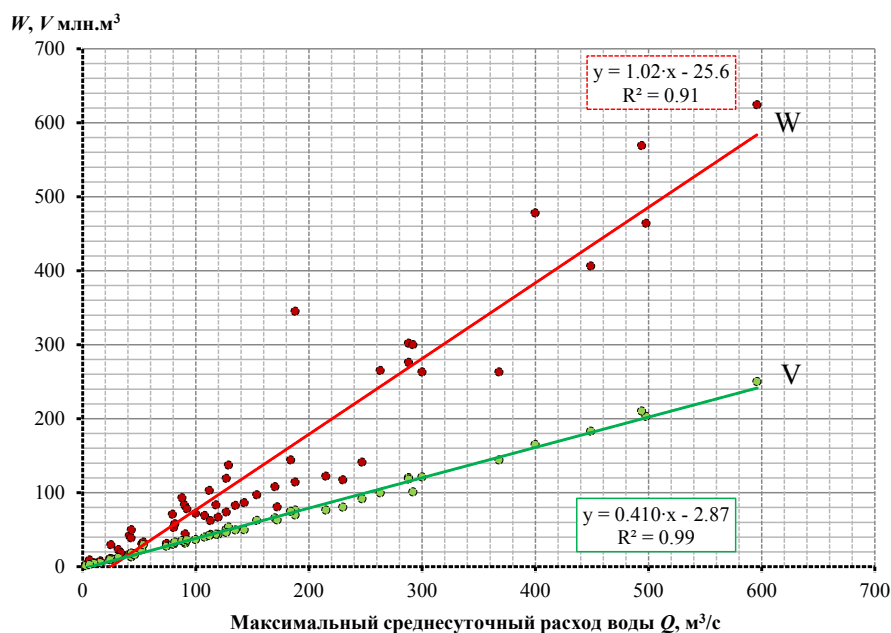


Рис. 7. Зависимости объема всего дождевого паводка и его основной волны от максимальных среднесуточных расходов воды на р. Улахан-Ботуобуйа

Ввиду отсутствия надежных корреляционных связей между объемами дождевых паводков на р. Улахан-Ботуобуйа и р. Чоне, расчет данных характеристик в рамках подхода ВНИИГ не производился. При построении гидрографов в рамках альтернативных расчетов ВНИИГ данные по объему всего паводка принимались по взаимосвязанным региональным связям, построенным по методологии Проекта 1982 г.

Минимальный сток

Рассматривался минимальный среднемесячный сток летне-осенней (с июля по октябрь) и зимней (с ноября по апрель) межени с использованием данных о среднемесячных расходах воды боковой приточности р. Виллой, полученных при проведении расчетов годового стока как на основе сведений Проекта 1982 г. и материалов АО «ЛГП» 2015 г., так и на основе альтернативного подхода ВНИИГ. Полученные результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Минимальный сток р. Виллой – боковая приточность

Река – пост (источник исходной информации)	Обеспеченные значения, P, %						
	10	25	50	75	90	95	99
Минимальные среднемесячные расходы воды летне-осенней межени							
р. Виллой – боковая приточность (Проект 1982 г. и АО «ЛГП» 2015 г.)	25,0	15,1	7,51	3,16	1,15	0,51	0,022
р. Виллой – боковая приточность (ВНИИГ 2021 г.)	22,2	13,9	7,46	3,45	1,47	0,76	0,15
Минимальные среднемесячные расходы воды зимней межени							
р. Виллой – боковая приточность (Проект 1982 г. и АО «ЛГП» 2015 г.)	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
р. Виллой – боковая приточность (ВНИИГ 2021 г.)	0,70	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Заключение

1. Гидрологический режим боковой приточности на участке р. Виллой между створами гидроузлов Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС может быть охарактеризован стоком р. Улахан-Ботубуйа в створе действующего гидрологического поста Захар с привлечением соответствующих виду стока коэффициентов, учитывающих 18 % неохваченной наблюдениями площади водосбора.

2. Альтернативная методика расчета характеристик боковой приточности (методика АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»), основанная на комплексном анализе как гидрологической изученности исследуемого участка р. Виллой, так и результатов предыдущих исследований, соответствует требованиям нормативных документов.

3. Анализ результатов расчета не выявил критичных расхождений с оценками прошлых лет.

4. Результаты расчета ВНИИГ использованы при выполнении исследований по оценке гидравлического режима р. Виллой на участке между створами плотин Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Лысова А.А.** Анализ уровня режима р. Вилой на участке между гидроузлами Вилойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС и выявление факторов его формирования // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 80–90.
2. **Вилойская ГЭС-III** на р. Вилой. Проект. Том II. Природные условия. Книга 1. Гидрологические и климатические условия. № 1328-2т / гл. инж. В.Е. Зискович; Министерство энергетики и электрификации СССР; ГЛАВНИИ-ПРОЕКТ; Всесоюзный ордена Ленина Проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт Гидропроект имени С.Я. Жука, Ленинградское отделение. Ленинград, 1982. 117 с.
3. **Уточнение** отметки наполнения водохранилища Вилойской ГЭС-3 (Светлинской ГЭС), обеспечивающей прочность и устойчивость элементов плотины Каскада Вилойских ГЭС им. Е.Н. Батенчука. Инженерно-гидрологические изыскания. 1329-2-664т-ИЗ / гл. инж. Б.Н. Юркевич; ОАО «Ленгидропроект». СПб., 2015. 75 с.

REFERENCES

1. Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Lysova A.A. Analysis of the level regime of the Vilyuy River in the area between the hydropower installations of the Vilyuy HEP-1, 2 and the Svetlinskaya HEP and identification of the formation factors. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;302:80-90. (In Russ).
2. Vilyuiskaya HPP-III on the Vilyuy river. Project. Volume II. Natural conditions. Book 1. Hydrological and climatic conditions. No. 1328-2t. Leningrad, 1982. 117 p. (In Russ).
3. Clarification of the filling mark of the reservoir of the Vilyuiskaya HPP-3 (Svetlinskaya HPP), which ensures the strength and stability of the elements of the dam of the Cascade of the Vilyuy HPP named after E.N. Batenchuk. Engineering and hydrological surveys. 1329-2-664t-IZ. Saint Petersburg, 2015. 75 p. (In Russ).

Информация об авторах

Н.С. Бакановичус – канд. техн. наук, зав. лабораторией;
А.А. Лялина – руководитель группы;
А.А. Максимова – ведущий инженер
А.В. Пучкарюс – инженер 2 категории.

Information about the authors

N.S. Bakanovichus – Cand. Sci. (Technology), Head of Laboratory;
A.A. Lyalina – Group Leader;
A.A. Maksimova – Lead Engineer;
A.V. Puchkaryus – Engineer, category 2.

Статья поступила в редакцию 11.01.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 11.01.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 624.072.2

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ДВУХПРОЛЕТНОЙ БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Александр Павлович Кузьменко¹, Владимир Сергеевич Сабуров²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены результаты динамических и статических испытаний балочной конструкции в виде двух сопряженных по коротким сторонам типовых панелей перекрытия здания в реальных условиях закрепления. Динамические испытания проведены инженерно-сейсмометрическим методом под воздействием микросейсмического фона. Измеренные в результате динамических испытаний значения собственных частот вертикальных колебаний использованы для решения обратной спектральной задачи и определения упругих характеристик панелей. Значение жесткости поперечного сечения панелей простому изгибу сравнивалось с результатами статических испытаний, которые проведены распределенной нагрузкой, изменяющейся от 0 до 600 кгс/м².

Ключевые слова: сейсмометрическое обследование, частоты и формы собственных колебаний, жесткость поперечного сечения простому изгибу, обратная спектральная задача

Для цитирования: Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Сравнение результатов динамических и статических испытаний двухпролетной балочной конструкции // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 42–51.

Original article

COMPARISON OF THE RESULTS OF DYNAMIC AND STATIC TESTS OF A TWO-SPAN BEAM STRUCTURE

Alexander P. Kuzmenko¹, Vladimir S. Saburov²

^{1, 2} Federal Research Center for Information and Computational Technologies (FRC ICT),
Novosibirsk, Russia

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Abstract. The results of dynamic and static tests of the beam structure in the form of two conjugate on the short sides of the typical floor panels of the building in real conditions of fastening are considered. Dynamic tests were carried out by engineering seismometric method under the influence of microseismic background. The values of the natural frequencies of vertical oscillations obtained as a result of dynamic tests were used to solve the inverse spectral problem and determine the elastic characteristics of the plates. The value of the stiffness of the cross-section of the panels to a simple bend was compared with the results of static tests that were carried out with distributed load varying from 0 to 600 kgf/m².

© Кузьменко А.П., Сабуров В.С., 2023

Keywords: *seismometric monitoring, frequencies and forms of natural vibrations, stiffness of the cross section to a simple bend, inverse spectral problem*

For citation: Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Comparison of the results of dynamic and static tests of a two-span beam structure. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:42-51. (In Russ.).

Динамические испытания строительных конструкций, в том числе и плит перекрытий, производились еще в первой половине прошлого века. В 1941 г. Е.С. Сорокин приводит методику полевых исследований динамической работы плит перекрытий, установленных в зданиях [1]. В работе представлены способы определения жесткости поперечного сечения простому изгибу балок, плит перекрытий по частоте и эпюре первой формы собственных колебаний и показано, что результаты динамических испытаний имеют практическое применение.

Динамические испытания строительных конструкций предусматривают измерение и идентификацию частот собственных форм колебаний, а также решение обратной спектральной задачи по определению упругих характеристик строительной системы.

Одним из методов измерения собственных частот колебаний строительных систем является неразрушающий инженерно-сейсмометрический метод, который предполагает измерение собственных частот колебаний строительной системы под воздействием микросейсмического фона, поэтому некоторые специалисты высказывают сомнения в достоверности получаемых результатов.

Подтверждение достоверности значений упругих характеристик, измеренных авторами при обследовании вновь возводимых зданий, достигалось сравнением расчетных смещений, полученных с помощью программного комплекса SCAD, и смещений замещающей модели, определенных по результатам проведения инженерно-сейсмометрического обследования [2, 3]. Расчет смещений от заданной нагрузки в обоих случаях производился при жестком сопряжении фундаментов с грунтовым основанием.

Статические и динамические стендовые испытания плит перекрытия в заводских условиях, когда одна короткая сторона плиты опирается на металлический уголок, а другая – на металлический каток, также показали хорошее совпадение значений жесткости поперечного сечения плиты простому изгибу. В результате многократно проведенных испытаний различных плит перекрытия также было установлено, что данная конструкция не обеспечивает шарнирное опирание плиты, а наилучшей замещающей моделью плиты перекрытия является модель колебаний прямолинейной балки постоянного сечения и погонной массы, в опорных сечениях опертой жестко относительно поперечных и упруго относительно угловых перемещений [4]. К сожалению, возможности провести динамические испытания мостовых сооружений при проведении статических испытаний у авторов не было, поэтому в качестве объекта испытаний была выбрана двухпролетная балочная конструкция из двух панелей перекрытия, сопряженных по коротким сторонам.

Данная работа была проведена в рамках государственной программы реконструкции и модернизации зданий военных городков в ФРГ, оставленных после вывода западной группы войск СССР. Одной из задач обсле-

дования было определение технического состояния усиленных панелей (плит) перекрытия для установления возможности надстройки одноуровневой или многоуровневой мансарды.

Исследования технического состояния строительных конструкций и зданий производились по заказу фирмы **IEMB** (ФРГ), которая из-за высокой стоимости статических испытаний панелей перекрытий в здании в качестве альтернативного варианта рассматривала возможность проведения динамических испытаний сейсмометрическим методом.

Разрез и план участка обследуемых панелей приведен на рис. 1.

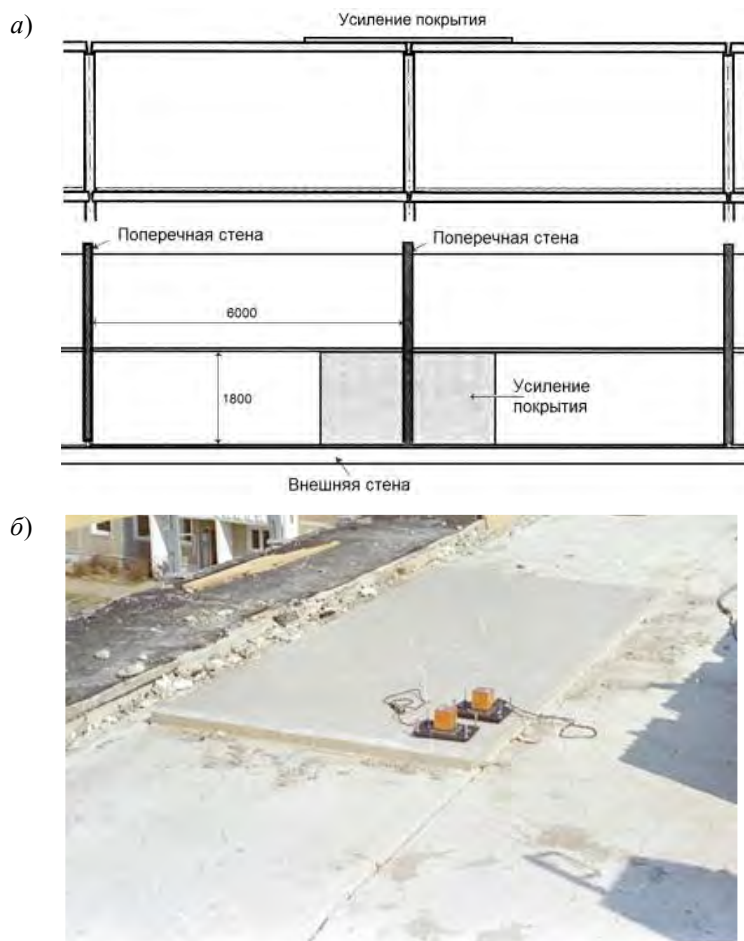


Рис. 1. Объект исследования в г. Шведт (ФРГ):

а – разрез и план участка обследуемых панелей; б – фото усиления покрытия верхнего этажа

Сопряжение двух панелей одинакового размера $6 \times 1,8$ м и толщины 0,14 м осуществлено на длине $1600 + 1600$ мм. Бетон заделки швов примыкания к окружающим элементам перекрытия был удален по всему периметру обследуемых панелей. По всей ширине каждой панели по сетке 150×150 мм сделаны отверстия глубиной 80 мм, в которые установлены анкеры длиной 120 мм с закрепленными на них пластинами. К анкерным пластинам посредством сварки прикреплена стальная ненапряженная ар-

матура $\varnothing 6$ мм поперек панелей и $\varnothing 12$ мм вдоль панелей, а затем уложен дополнительный бетон толщиной 6 см.

Панель перекрытия без предварительного напряжения арматуры имеет следующие характеристики: объемный вес $\rho = 2300$ кгс/м³; погонная масса $m = 59$ кгс·с²/м² (вес панели $Q = 3477$ кгс); высота сечения $h = 0,14$ м; длина плиты $L_{\text{панель}} = 6$ м; длина пролета $L = 5,86$ м; ширина панели $d = 1,8$ м; предполагаемый модуль деформации бетона $E_b = 3,5 \times 10^9$ кгс/м²; предполагаемая нормативная нагрузка на панель $q = 250$ кгс/м².

Параметры регистрации колебаний. Регистрация вертикальных колебаний панелей под воздействием микросейсмического фона произведена при следующих условиях: продолжительность сеанса регистрации $T_{\text{сеанс}} = 128$ с; частота оцифровки (дискретизации) $f_{\text{дискр}} = 256$ Гц; полоса частот фильтра нижних частот $\Delta f_{\text{регистр}} = 0 \div 110$ Гц. Измерения колебаний сопряженных панелей производились под воздействием естественного микросейсмического фона по срединной продольной линии в семнадцати равноудаленных пунктах с одним опорным пунктом (3-й пункт от края панели). Положение опорного пункта позволяет гарантированно определить три частоты собственных форм поперечных (вертикальных) колебаний одной панели.

Обработка данных произведена согласно методике, приведенной в [3, 5].

Спектральные характеристики вертикальных колебаний двух сопряженных панелей. Определение значений резонансных частот вертикальных колебаний двух сопряженных панелей произведено по осредненным по всем пунктам наблюдения амплитудным спектрам ускорения и коэффициенту когерентности колебаний (рис. 2).

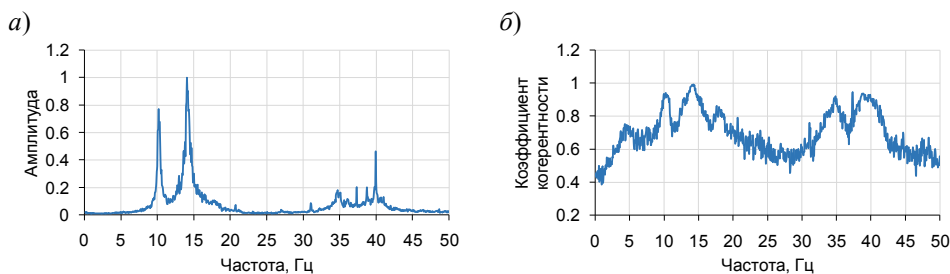


Рис. 2. Спектральные характеристики вертикальных колебаний двух сопряженных панелей: а – амплитудный спектр вертикальных колебаний; б – спектр когерентности

При вычислении спектральных характеристик использовалось преобразование Фурье длиной $L_{\text{БПФ}} = 4k$ (перекрытие окон $L_{\text{SH}} = 2k$), что обеспечивает разрешение по частоте $\Delta f = \pm 0,03125$ Гц (спектральное разрешение).

Центральные частоты спектральных пиков приведенного спектра наиболее ярко выраженных по амплитуде и с максимальным коэффициентом когерентности равны: $p_1 = 10,19$ Гц, $p_2 = 14,06$ Гц, $p_3 = 34,75$ Гц; $p_4 = 39,96$ Гц. Построение эпюр смещений сопряженных панелей перекрытия на частотах резонансных колебаний произведено с помощью комплексного спектра колебаний, приведенных к опорному пункту [5]. Иден-

тификация эпюр форм смещений сопряженных панелей на резонансных частотах произведена путем сравнения измеренных эпюр смещений с эпюрами форм собственных колебаний двухпролетной балки, шарнирно опертой на неподвижные опоры [6]. Диаграммы эпюр форм смещений сопряженных панелей перекрытия на резонансных частотах, эпюр форм собственных колебаний замещающей модели и карты амплитудного и фазового спектров приведенных колебаний двух сопряженных панелей представлены на рис. 3.

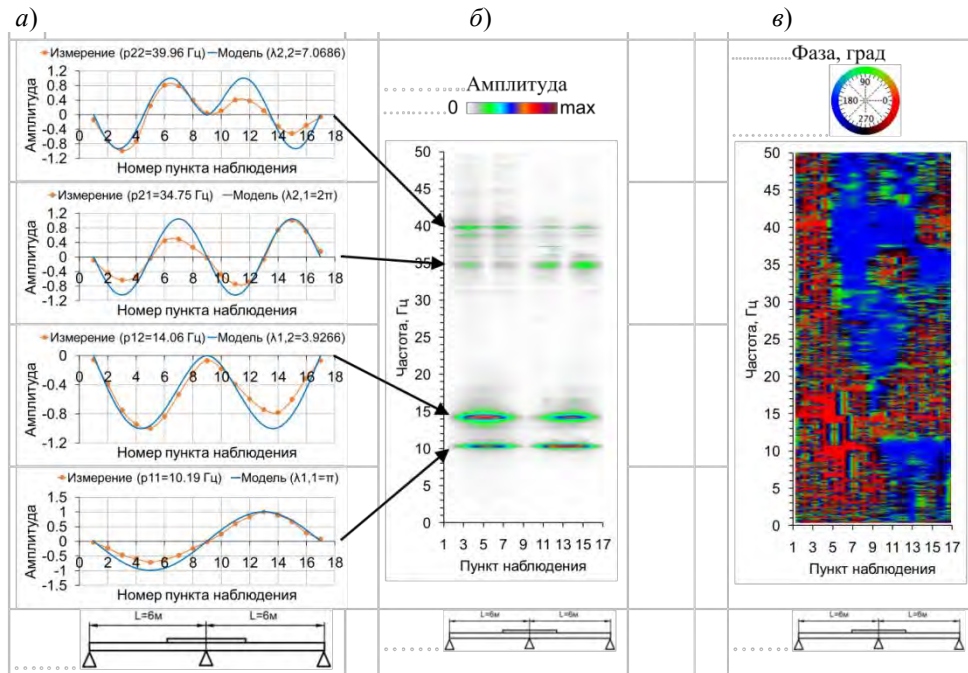


Рис. 3. Диаграммы:

a – эпюры смещений сопряженных панелей перекрытия на частотах резонансных колебаний и эпюры замещающей модели; *b* – карта амплитудного спектра приведенных колебаний; *c* – карта фазового спектра приведенных колебаний

Эпюры смещений сопряженных панелей на резонансных частотах соответствуют эпюрам собственных колебаний предварительно выбранной замещающей модели, поэтому частоты резонансных колебаний являются собственными частотами колебаний сопряженных панелей и могут использоваться для решения обратной спектральной задачи по оценке жесткости поперечного сечения панели простому изгибу.

Расчет упругих характеристик сопряженных панелей по спектру собственных частот. Согласно теореме о единственности решения обратной спектральной задачи [7], для определения в опорных сечениях неизвестных коэффициентов жесткости относительно поперечных и угловых перемещений, а также жесткости поперечных сечений шестиметровых панелей перекрытия простому изгибу (всего 8 неизвестных) необходимо знание не менее восьми частот собственных колебаний.

Учитывая, что сопряжены две одинаковые панели, которые опираются на жесткие опоры, в качестве расчетной замещающей модели была

выбрана модель изгибных колебаний прямолинейной двухпролетной балки, в опорных сечениях закрепленной жестко относительно поперечных (вертикальных) перемещений и упруго относительно угловых перемещений (жесткость относительно угловых перемещений K_φ в опорных сечениях принята одинаковой).

В рамках данной замещающей модели можно определить значения двух упругих характеристик – жесткость угловым перемещениям в опорных сечениях и жесткость поперечного сечения панели простому изгибу, при этом для решения обратной спектральной задачи требуется знание только двух частот собственных колебаний сопряженных панелей.

Учитывая, что в результате проведенного обследования измерено четыре частоты собственных колебаний, но частоты измерены с некоторой ошибкой, требуемые упругие характеристики определялись в результате аппроксимации спектра собственных частот колебаний сопряженных панелей спектром собственных частот замещающей модели.

В общем виде частоты собственных форм поперечных колебаний многопролетной балки определяются выражением [6]:

$$p_{k1,k2} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_{Ln,k1,k2}^2}{L_n^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (1)$$

где EI – жесткость поперечного сечения панели простому изгибу; m – погонная масса; $k1$ – номер группы; $k2$ – номер частоты в группе; $\lambda_{Ln,k1,k2}$ – корни частотного уравнения, отнесенные к пролету с длиной L_n .

Частотное уравнение двухпролетной балки с равными пролетами ($L_1 = L_2 = L$, $(EI)_1 = (EI)_2 = EI$), в опорных сечениях опертый жестко относительно поперечных и упруго относительно угловых перемещений, определяется выражением ($K_{\varphi i} = K_\varphi$):

$$(\Phi_1 + \tilde{\mu}_0 D_1)[2(\tilde{\mu}_0 \Phi_1 + Z_1) + \tilde{\mu}_0(\Phi_1 + \tilde{\mu}_0 D_1)] = 0, \quad (2)$$

где $\Phi_1 = 0,5[ch(\lambda_{L,j})\sin(\lambda_{L,j}) - sh(\lambda_{L,j})\cos(\lambda_{L,j})] = U_{L,j}T_{L,j} - S_{L,j}V_{L,j}$;

$$Z_1 = T_{L,j}^2 - V_{L,j}^2 = sh(\lambda_{L,j}) \sin(\lambda_{L,j});$$

$$D_1 = 0,5[1 - ch(\lambda_{L,j})\cos(\lambda_{L,j})] = U_{L,j}^2 - V_{L,j}T_{L,j};$$

$$S(\lambda_{Ln,j}) = S_{Ln,j} = \frac{ch(\lambda_{Ln,j}) + \cos(\lambda_{Ln,j})}{2}, \quad T(\lambda_{Ln,j}) = T_{Ln,j} = \frac{sh(\lambda_{Ln,j}) + \sin(\lambda_{Ln,j})}{2},$$

$$U(\lambda_{Ln,j}) = U_{Ln,j} = \frac{ch(\lambda_{Ln,j}) - \cos(\lambda_{Ln,j})}{2}, \quad V(\lambda_{Ln,j}) = V_{Ln,j} = \frac{sh(\lambda_{Ln,j}) - \sin(\lambda_{Ln,j})}{2} -$$

функции Крылова, записанные для n -го пролета; $j = N(k1 - 1) + k2$ – сквозной индекс номера форм; N – количество пролетов; $k1$ – номер группы (зоны); $k2$ – номер частоты в группе (зоне); $\tilde{\mu}_0 = \frac{K_\varphi L}{\lambda_1 EI}$ и $K_{\varphi i} = K_\varphi$ – жесткость в опорных сечениях относительно угловых перемещений панели; i – номер опоры; $\lambda_{L,j}$ – корни частотного уравнения относительно пролета длиной L .

Решение обратной спектральной задачи по нахождению неизвестных параметров $\lambda_{l,j}$ и μ производилось следующим образом:

при заданных в виде ряда значениях коэффициента μ находились значения первых четырех корней частотного уравнения (2);

определялись отношения собственных частот замещающей модели к частоте первой формы (безразмерные частоты): $\frac{p_{k1,k2}}{p_{1,1}} = \frac{\lambda_{l,k1,k2}^2}{\lambda_{l,1,2}^2}$,

определялись частоты замещающей модели: $p_{k1,k2} = p_{и,1,1} \frac{\lambda_{l,k1,k2}^2}{\lambda_{l,1,2}^2}$,

где $p_{и,1,1}$ – измеренное значение первой частоты первой группы собственных колебаний сопряженных панелей;

определялась ошибка аппроксимации: $err = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{и,i} - p_{и,i})^2}{n}}$, $n = 4$ – количество измеренных частот собственных колебаний;

определялись коэффициент μ и значение $\lambda_{l,1,1}$: $\mu, \lambda_{l,1,1} = \min_{\mu} err$.

На рис. 4 приведена диаграмма изменения ошибки err при аппроксимации спектра собственных частот сопряженных панелей спектром (рядом) частот собственных колебаний замещающей модели от коэффициента μ .

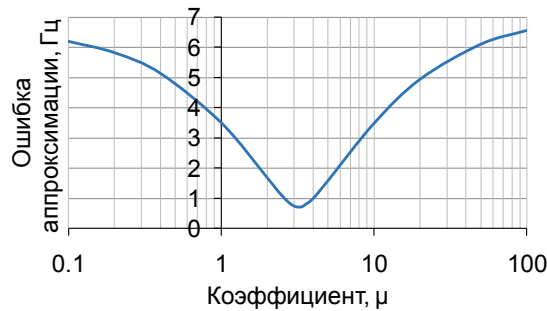


Рис. 4. Диаграмма изменения ошибки err от коэффициента μ

Минимальное значение ошибки $err = 0,7$ Гц достигается при $\mu \approx 3,35$. Данному значению μ соответствует значение $\lambda_{l,1,1} \approx 3,638$.

Частоты собственных колебаний замещающей модели: $p_{11} = 10,19$ Гц и $p_{12} = 13,67$ Гц – 1-я группа; $p_{21} = 33,45$ Гц и $p_{22} = 40,43$ Гц – 2-я группа. Максимальная абсолютная ошибка достигается для частоты $p_{21} = 34,75$ Гц и составляет 1,25 Гц (3,6 %).

Среднее значение жесткости поперечного сечения панелей простому изгибу определяется согласно выражению:

$$EI = \frac{(2\pi p_{11})^2 ml^4}{\lambda_{l,11}^4} \approx (1,62 \div 1,78) \cdot 10^6 \text{ кгс} \cdot \text{м}^2, \quad (3)$$

где $l = 5,86 \div 6,0$ м, $m = 59$ кгс·с²/м².

По окончании проведения динамического тестового испытания сопряженных панелей были проведены тестовые статические испытания панелей перекрытия методом нагружения по схеме, которая обеспечивала примерно равномерно распределенную по площади панели нагрузку. Схема нагружения панелей и эпюры прогибов первой панели при четырех значениях равномерно распределенной нагрузки приведены на рис. 5.

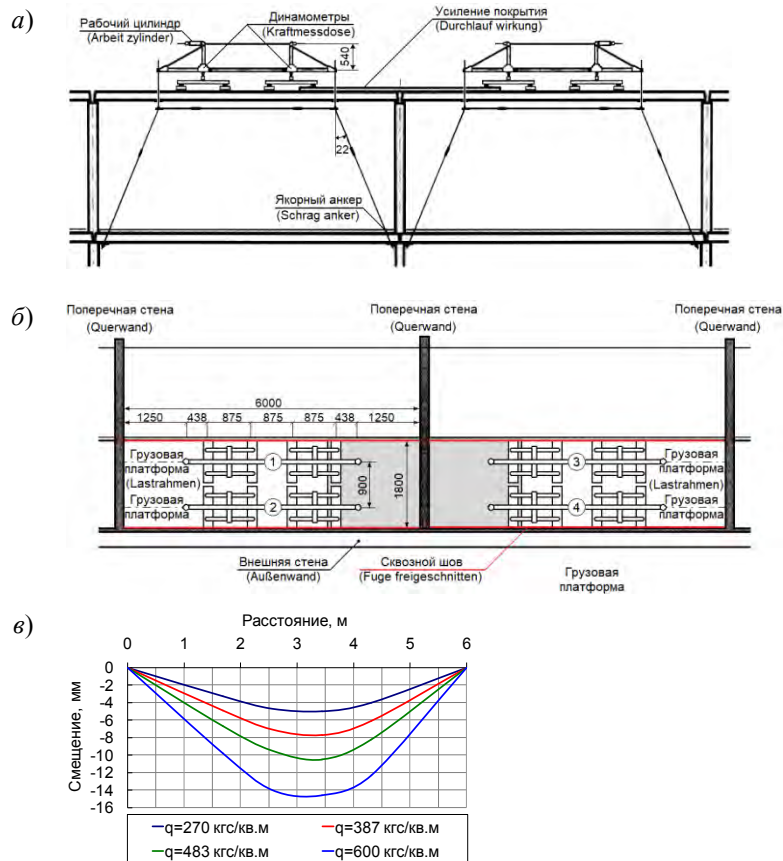


Рис. 5. Реализация статических испытаний сопряженных панелей.
 а – разрез; б – в плане; в – эпюры прогибов при статическом испытании первой панели

Уравнение прогиба однопролетной балки постоянного сечения, закрепленной жестко на опорах относительно вертикального сдвига и упруго относительно угловых перемещений, при равномерно распределенной нагрузке q определяется выражением:

$$y(x) = \frac{ql^4}{12EI} \left[\left(\frac{x}{l}\right)^3 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l}\right)^4 - \frac{\mu}{2(\mu+2)} \left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{1}{(\mu+2)} \left(\frac{x}{l}\right) \right], \quad (4)$$

где μ – коэффициент жесткости в опорных сечениях относительно угловых перемещений; l – длина панели; $0 \leq x \leq l$ – расстояние от края панели.

Выражение (4) позволяет определить среднее значение жесткости поперечного сечения панелей простому изгибу с учетом перемещений в точках приложения нагрузки. Учитывая большие значения стрелы прогиба панелей, достигнутых при статических испытаниях, оценка жесткости поперечного сечения панелей простому изгибу произведена согласно выражению стрелы прогиба для шарнирно опертой балки равного сечения ($\mu = 0$) при равномерно распределенной погонной нагрузке q_{Π} :

$$y_{\max} = y(0,5l) = -\frac{5q_{\Pi}l^4}{384EI}, \quad (5)$$

где $q_{\Pi} = dq_{\text{кв.м}}$ – погонная нагрузка; $q_{\text{кв.м}}$ – нагрузка на 1 м^2 ; $d = 1,8 \text{ м}$ – ширина панели.

Результаты расчета жесткости поперечного сечения панели перекрытия простому изгибу по результатам статических испытаний приведены в таблице. В графе «Стрела прогиба» приведены результаты, полученные согласно выражению (5), в графе «Среднее» приведены результаты, полученные согласно выражению (4) при $\mu = 0$.

Таблица

Результаты статических испытаний первой панели

$q_{кв.м^2}$ кгс/м ²	Смещения панели № 1 в контрольных пунктах, м				EI , кгс·м ²	
	$y(x = 1,687)$	$y(x = 2,562)$	$y(x = 3,437)$	$y(x = 4,312)$	Стрела прогиба	Среднее
270	-0,0033	-0,0047	-0,005	-0,004	$1,69 \cdot 10^6$	$1,53 \cdot 10^6$
387	-0,0049	-0,0071	-0,0077	-0,0061	$1,59 \cdot 10^6$	$2,11 \cdot 10^6$
483	-0,0067	-0,0095	-0,0105	-0,0082	$1,47 \cdot 10^6$	$1,68 \cdot 10^6$
600	-0,0098	-0,014	-0,0156	-0,0123	$0,865 \cdot 10^6$	$0,983 \cdot 10^6$

Примечание. Наблюдаемое уменьшение EI при увеличении нагрузки связано с уменьшением модуля деформации (упругости) бетона при напряжениях превышающих нормативное значение.

В результате проведенных работ было установлено, что при нормативной нагрузке $q = 250$ кгс/м² значение жесткости поперечного сечения панелей простому изгибу EI , полученное в процессе динамических испытаний сопряженных панелей, совпадает с результатами статических испытаний. Таким образом, даже при использовании простой замещающей модели неразрушающий инженерно-сейсмометрический метод может успешно использоваться при динамических испытаниях различных многопролетных балочных конструкций, например, таких как мостовые сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Сорокин Е.С.** Динамика междуэтажных перекрытий. М.: Госстройиздат, 1941. 240 с.
2. **Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Короленко Д.Б., Короленко Л.А.** Расчетно-экспериментальная оценка жесткости несущих каркасов зданий повышенной этажности // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 305. С. 51–68.
3. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Обследование зданий повышенной этажности. Инженерно-сейсмометрический метод. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 184 с.
4. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Теория колебаний балки: [Электронный ресурс]. Муром: Учебно-методический центр МИ (фил.) ВлГУ, 2015. 179 с.
5. **Кузьменко А.П., Сабуров В.С.** Обследование плотин гидроэлектростанций. Инженерно-сейсмометрический метод (часть 1): [Электронный ресурс]. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. 206 с.
6. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Частоты и формы собственных колебаний многопролетной балки: [Электронный ресурс]. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. 140 с.
7. **Ахтямов А.М.** К единственности решения одной спектральной задачи // Дифференциальные уравнения. 2003. Т. 39. № 8. С. 1011–1015.

REFERENCES

1. Sorokin E.S. Dynamics of floor-to-floor overlappings. Moscow: Gosstroyizdat; 1941. 240 p. (In Russ.).
2. Kuzmenko A.P., Saburov V.S., Korolenko D.B., Korolenko L.A. Calculation and experimental assessment of the rigidity of the load-bearing frames of buildings of high-rise buildings. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;305:51-68. (In Russ.).
3. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Survey of high-rise buildings. Engineering seismometric method. Saarbrücken: LAMBERT Acad. Publ.; 2013, 184 p. (In Russ.).
4. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Theory of beam vibrations: [Electronic resource]. Murom: Educational and Methodological Center of MI VSU; 2015. 179 p. (In Russ.).
5. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Inspection of hydroelectric dams. Engineering seismometric method (Part 1): [Electronic resource]. Novosibirsk: ICT SB RAS; 2017. 206 p. (In Russ.).
6. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Frequencies and forms of natural oscillations of a multi-span beam: [Electronic resource]. Novosibirsk: ICT SB RAS; 2019. 140 p. (In Russ.).
7. Akhtyamov A.M. To the uniqueness of the solution of one spectral problem. *Differential Equations*. 2003;39(8):1061-1066. (In Russ.).

Информация об авторах

А.П. Кузьменко – канд. техн. наук, старший научный сотрудник;
В.С. Сабуров – научный сотрудник.

Information about the authors

A.P. Kuzmenko – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher;
V.S. Saburov – Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 624.139:626/627

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ

Олег Константинович Воронков¹, Павел Владимирович
Кондратенко², Лариса Федоровна Ушакова³

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

^{1, 3} UshakovaLF@vniig.ru

² KondratenkoPV@vniig.ru

Аннотация. Выполнено обобщение результатов экспериментальных работ, связанных с изучением деформационных (коэффициент оттаивания A_{th} , коэффициент сжимаемости m_{th}) и прочностных (угол внутреннего трения φ , сцепление C) свойств оттаивающих скальных, полускальных и крупнообломочных грунтов, а также песков, супесей, суглинков и глин.

Ключевые слова: *оттаивающие скальные, полускальные, крупнообломочные грунты, расчетные характеристики, прочностные и деформационные свойства, система «сооружение – оттаивающее основание»*

Для цитирования: Воронков О.К., Кондратенко П.В., Ушакова Л.Ф. Геомеханические свойства оттаивающих грунтов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 52–66.

Original article

GEOMECHANICAL PROPERTIES OF THAWING SOILS

Oleg K. Voronkov¹, Pavel V. Kondratenko², Larisa F. Ushakova³

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

^{1, 3} UshakovaLF@vniig.ru

² KondratenkoPV@vniig.ru

Abstract. The results of experimental work related to the study of deformation (thawing coefficient A_{th} , compressibility coefficient m_{th}) and strength (angle of internal friction φ , traction C) properties of thawing rock, semi-rock and very coarse soils, as well as sands, sandy loams, loams and clays are generalized.

Keywords: *thawing rocky, semi-rocky, very coarse soils, calculated characteristics, strength and deformation properties, the system «construction – thawing base»*

For citation: Voronkov O.K., Kondratenko P.V., Ushakova L.F. Geomechanical properties of thawing soils. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:52-66. (In Russ.).

Введение

Актуальность изучения и оценки геомеханических свойств оттаивающих грунтов обусловлена следующими факторами:

1) хозяйственным освоением районов островной мерзлоты и южных районов многолетнемерзлых пород, где необходимо обеспечить устойчивость сооружений на оттаивающих основаниях при строительстве по II принципу, допускающему оттаивание грунтов основания в процессе эксплуатации;

© Воронков О.К., Кондратенко П.В., Ушакова Л.Ф., 2023

2) глобальными климатическими изменениями, в том числе ростом значений среднегодовой температуры воздуха и грунтов, затронувшим практически всю территорию России;

3) использованием в строительстве на слабых грунтах их замораживания, причем последующее оттаивание приводит к изменению характера взаимодействия сооружения и основания.

Исследованию механических свойств оттаивающих грунтов (преимущественно песчаных и глинистых) посвящено много публикаций [1–10 и др.], тем не менее остается еще много неизученных вопросов. Это связано с разнообразием состава и свойств грунтов, а также большим количеством (около 100) видов и разновидностей криогенных текстур. Поэтому в настоящее время существует единственно надежный путь обоснования проектных решений – экспериментальное определение характеристик применительно к грунтам конкретного оттаивающего основания, что естественно требует временных и материальных затрат.

В статье сделана попытка обобщить имеющиеся в настоящее время результаты экспериментальных работ, связанных с изучением свойств оттаивающих грунтов: скальных и полускальных, крупнообломочных, песчаных и глинистых. Такое обобщение может быть полезно как справочный материал применительно к основаниям-аналогам для специалистов, занимающихся предварительными расчетами НДС и устойчивости системы «сооружение – оттаивающее основание».

Специфические особенности оттаивающих грунтов

В механике мерзлых грунтов оттаивающие породы занимают особое место в силу ряда специфических особенностей, а именно:

1. Наличие осадки при оттаивании без нагрузки и дальнейшее уплотнение оттаявшего грунта под влиянием внешней нагрузки (рис. 1). Общая осадка S оттаивающего грунта под сооружением вычисляется по формуле [1, 3, 8]:

$$S = S_{th} + S_{\sigma, k}, \quad (1)$$

где S_{th} – осадка оттаивания и уплотнения *собственным* весом грунта; $S_{\sigma, k}$ – осадка, обусловленная давлением от веса сооружения, зависящая от размера фундамента и др. и определяемая расчетом по известной методике [3, 8].

В настоящей статье предметом рассмотрения является первое слагаемое – осадка S_{th} . Если в оттаявшем (однородном по составу) слое мощностью h произошла осадка S_{th} , то относительная осадка оттаивания A_{th} (коэффициент оттаивания) составит

$$A_{th} = S_{th} / h. \quad (2)$$

В условиях литостатического давления σ от собственного веса оттаивающего грунта слой продолжает уплотняться. Поэтому суммарная относительная осадка δ равна

$$\delta = A_{th} + m_{th} \sigma, \quad (3)$$

где m_{th} – коэффициент сжимаемости (МПа^{-1}), равный угловому коэффициенту графика $\delta = f(\sigma)$: $m_{th} = \Delta\delta / \Delta\sigma$; в дисперсных грунтах при $\sigma = 0-0,1$ МПа значение m_{th} больше, чем m_{th} при $\sigma = 0-0,3$ МПа.

Линейная связь вида (3) выполняется в глинистых грунтах в диапазоне давлений $\sigma = 0-0,3$ МПа, а в крупнообломочных и песчаных – при $\sigma = 0-0,5$ МПа [1].

Таким образом, основными характеристиками деформируемости оттаивающих грунтов являются коэффициент оттаивания A_{th} и коэффициент сжимаемости m_{th} .

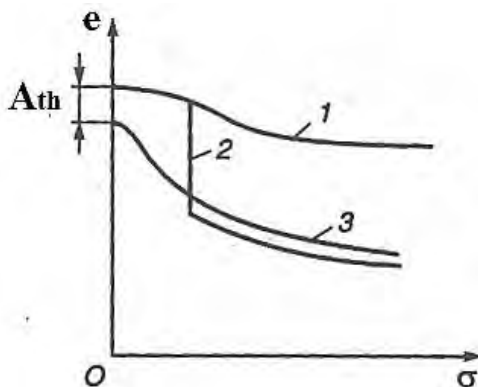


Рис. 1. Компрессионные кривые уплотнения мерзлого (1), оттаивающего (2), оттаявшего (3) грунта [7]

Значения A_{th} и m_{th} определяют экспериментально в лабораторных или полевых условиях, согласно СП 25.13330.2020 [8]. Для предварительных оценок значений A_{th} предложен ряд эмпирических формул [3], использующих основные физические характеристики грунтов (влажность, плотность и др.). Возможность оценки A_{th} по нескольким (n) формулам повышает точность среднего в \sqrt{n} раз.

2. Нарушение цементационных связей частиц грунта и его разуплотнение («разрыхление») в процессе оттаивания, освобождение части гравитационной воды, отжатие ее из трещинно-порового пространства, постепенное уплотнение грунта, повышение порового давления, миграция влаги к контакту мерзлого и талого грунта, повышение влажности и водопроницаемости в приконтактной зоне [9].

3. Отличие характеристик деформируемости и прочности в зоне контакта мерзлого и талого грунта от характеристик оттаявшей породы вне фронта оттаивания. Причем это отличие может быть как в большую, так и в меньшую сторону не только для различных грунтов, но и для одной разновидности, но при разных криогенных текстурах мерзлого грунта [10].

4. Сопротивление сдвигу оттаивающих грунтов, квазиоднородных по составу, льдистости и криотекстуре, характеризуется в большинстве случаев более низкими значениями вблизи границы раздела мерзлого и талого грунта и в начальный период оттаивания. Для грунтов с массивной криотекстурой и отсутствием включений льда допустимо считать примерно одинаковым сопротивление сдвигу на границе оттаивания и в оттаявшем грунте. При наличии льда-включений отличие может быть значительным.

5. Большое количество разновидностей природных и техногенных грунтов с их структурно-текстурными особенностями в сочетании с разнообразием криогенной текстуры требует экспериментального определения

механических характеристик оттаивающих грунтов применительно к конкретному основанию. Это не исключает для предварительных оценок использования уже накопленного опыта экспериментального определения деформационных и прочностных свойств грунтов оснований-аналогов. Подбор аналогов оттаивающих грунтов предполагает знание следующих основных характеристик: вид (разновидность) грунта по ГОСТ 25100, его влажность, плотность, а для глинистых грунтов – показатель текучести I_L .

Скальные и полускальные оттаивающие грунты

Скальные и полускальные грунты априори считались достаточно надежными основаниями сооружений, в том числе в криолитозоне. Однако практика строительства по II принципу (допускающему оттаивание грунтов) показала, что при сохранении в основании верхнего выветрелого слоя возможны непроектные ситуации. Так, в пос. Тикси из 16 крупноблочных зданий 5 находились в аварийном состоянии. В пос. Диксон два кирпичных здания, основанием которых служила верхняя выветрелая зона диабазов, разрушились в течение одного года [6].

Массивы скальных и полускальных пород практически всегда имеют в верхней части разреза (ВЧР) зону выветривания, где горные породы сильно трещиноваты, иногда дезинтегрированы до состояния мелких блоков, обломков и щебня. Чаще всего мощность зоны выветривания составляет до 5–7 м, причем в районах ледниковой экзарации она может быть менее 1 м, а в условиях сохранившейся древней коры выветривания она может иметь мощность 10 м и более.

Массивы скальных пород криолитозоны в ВЧР имеют, как правило, наибольшую льдистость и характеризуются следующими основными типами криогенных текстур: трещинной, пластово-трещинно-поровой, пластово-трещинно-карстовой.

Верхняя часть разреза наиболее подвержена морозному выветриванию, главным фактором которого является циклический процесс замораживания-оттаивания, приводящий к развитию напряжений кристаллизации $\sigma_{\text{л}}$ льда в трещинах и порах пород, причем величина $\sigma_{\text{л}}$ растет линейно с понижением температуры t , °С. Согласно Б. Халлету [11]:

$$\sigma_{\text{л}} \approx 1,14 |t| \text{ МПа.} \quad (4)$$

Этот процесс обуславливает рост трещин в верхней зоне скальных пород, их общую дезинтеграцию и возможную распученность ВЧР. Отсюда неизбежны осадки при оттаивании.

Характеристики деформируемости. Численные оценки коэффициента оттаивания A_{th} (относительной осадки оттаивания) скальных и полускальных пород приведены в табл. 1. В сильно разрушенных (до состояния элювиальных обломков) скальных породах A_{th} может иметь широкий диапазон значений, равный 0,01–0,27 (рис. 2). При оценке суммарной относительной осадки по формуле (3) может быть принято значение m_{th} оттаявшего грунта.

Характеристики прочности. Обобщение имеющихся экспериментальных данных о параметрах уравнения Кулона ϕ и C в мерзлых и талых скальных и полускальных породах позволяет сделать следующие выводы [13]:

1. Значения $\varphi_{\text{тал}} \approx \varphi_{\text{мерзл}}$; $C_{\text{тал}} \approx (0,2 \dots 0,6)C_{\text{мерзл}}$.
2. Для случая плоскопараллельного оттаивания поверхности ледистой трещины в граните для диапазона $t = -10 \dots +2$ °C во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева получены следующие консервативные значения [14]: $\varphi_{\text{оттаив}} \approx 0,67\varphi_{\text{мерзл}}$; $C_{\text{оттаив}} \approx (0,14 \dots 0,20)C_{\text{мерзл}}$, причем прогрессирующее нарастание смещений происходило при температуре близкой к 0 °C на контакте лед – гранит.

Таблица 1

Значения коэффициента оттаивания A_{th} полускальных и скальных пород

Породы	Глубина, м	Суммарная влажность W_c , %	A_{th} , д.ед.	Автор
Дезинтегрированные доломито-мергелистые, полускальные, нижний ордовик (г. Мирный, Якутия)	5–8	8–10	0,02–0,05	И.Н. Вотяков [4]
Доломиты, скальные, нижний ордовик (г. Мирный, Якутия)	4–5	5	0,007	То же
Известняки, песчаники, скальные, нижний ордовик (г. Мирный, Якутия)	3–4	2–5	0,003	То же
Песчаники, сланцы скальные, средняя юра (пос. Депутатский, Якутия)	0–2	6	0,002	Р.В. Казанцев [6]
То же	5–6	2	0,005	То же
Песчаники и сланцы, скальные (Магаданская обл.)	15	< 1?	0,00	И.Н. Тайбашев [12]

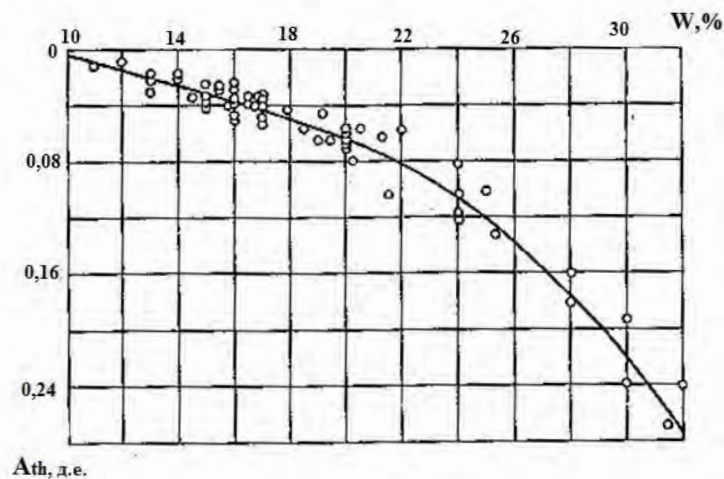


Рис. 2. Зависимость относительных осадков оттаивающих многолетнемерзлых разрушенных скальных и полускальных коренных пород от их влажности W при нагрузке 0,1 МПа [4]

Крупнообломочные оттаивающие грунты

Эти грунты в мерзлом состоянии характеризуются преимущественно массивной криотекстурой (в том числе ее разновидностями – корковой и базальной).

Характеристики деформируемости. Осадки при оттаивании крупнообломочных грунтов (аллювиальных и моренных) изучались И.Н. Вотяковым [4] в натуральных условиях. Их основные результаты показаны в табл. 2. По мнению И.Н. Вотякова, строительство сооружений на мерзлых крупнообломочных грунтах можно производить по II принципу (с их постепенным оттаиванием в процессе эксплуатации сооружения) только в тех случаях, когда общая влажность грунтов W_{tot} не превышает 10 %. При большей льдистости грунтов строительство сооружений, особенно крупных, следует производить по I принципу – сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии.

Таблица 2

Относительная осадка A_{th} при свободном оттаивании крупнообломочных, аллювиальных, гравийно-галечниковых и моренных валунно-галечниковых грунтов (по И.Н. Вотякову [4])

Диапазон влажности грунтов W , %	Средняя влажность W_{cp} , %	A_{th} , д.ед.
0–5	2,5	0
5–10	7,5	0,004
10–15	12,5	0,011
15–20	17,5	0,025
20–25	22,5	0,047
25–30	27,5	0,073

По данным авторов справочника [15], наиболее часто встречающиеся значения относительной осадки при оттаивании мерзлых крупнообломочных грунтов массивной криотекстуры находятся в диапазоне $A_{th} = 0,003–0,05$.

Значения m_{th} оттаивающих крупнообломочных грунтов допустимо принимать равными m_{ht} в талом состоянии.

По мнению И.Н. Вотякова [4, с. 155], выполнявшего натурные и лабораторные исследования деформируемой зоны выветривания скальных пород, а также крупнообломочных грунтов различного генезиса, коэффициент сжимаемости этих пород «ничтожно мал по сравнению с коэффициентом оттаивания A_{th} и поэтому при расчетах его можно не учитывать». На наш взгляд, с этим можно согласиться лишь при небольших значениях σ .

Характеристики прочности на сдвиг. В известных нам публикациях сведения о значениях φ и C отсутствуют. Основываясь на опытах В.Д. Карлова с крупнозернистыми песками, можно полагать, что в оттаивающем состоянии значение φ будет на 10–15 % ниже, чем φ в талых крупнообломочных грунтах, а значение $C = 0$.

Песчаные оттаивающие грунты

Песчаные мерзлые грунты, как правило, характеризуются массивной криогенной текстурой. Их оттаивание сопровождается уменьшением объема, поэтому неизбежно возникают осадки, которые в значительной степени зависят от льдонасыщенности грунта. Естественному процессу оттаивания верхней части разреза с послойным уплотнением слоев под действием природного давления наиболее соответствует одностороннее (плоскопараллельное) оттаивание.

Характеристики деформируемости. Приведенные ниже характеристики песков получены компрессионным методом в условиях одностороннего оттаивания. Следует отметить, что отличие этих характеристик от полученных при всестороннем оттаивании не превышает 16–19 % [16] (табл. 3).

Деформационные характеристики оттаивающих песков по данным П.И. Котова [18] приведены в табл. 4.

Таблица 3

Деформационные характеристики оттаивающих мерзлых песков с массивной криотекстурой (по данным компрессионных методов)

Грунт	W , %	Нагрузка при оттаивании, МПа	A_{th} , д.ед.	m_{th} , МПа ⁻¹	Автор
Песок пылеватый	18	0,2	0,075	0,032	П.И. Котов, Л.Т. Роман, М.Н.Царапов [16]
		0,025	0,062	0,047	
	25	0,2	0,105	0,038	
		0,025	0,083	0,051	
Песок мелкий	23,5	–	0,015	0,021	И.С. Вахрин, Г.П. Кузьмин [17]
Песок мелкозернистый	22,5	0	0,011	–	И.Н. Вотяков [4]
		0,1	0,023	0,1	
		0,3	0,034	0,07	
То же	27,5	0	0,014	–	И.Н. Вотяков [4]
		0,1	0,028	0,13	
		0,3	0,038	0,08	

Таблица 4

Нормативные характеристики деформируемости оттаивающих песков (данные П.И. Котова [18])

Грунт	W_{tot} , д.е.	ρ , г/см ³	A_{th} , д.ед.	m_{th} , МПа ⁻¹
Песок пылеватый	0,21	1,97	0,08	0,03
Песок мелкий	0,19	1,98	0,04	0,014
Песок пылеватый	0,22	1,69	0,12	0,06
То же	0,24	1,91	0,06	0,04

Нормативные документы рекомендуют использовать в расчетах данные полевых штамповых опытов – $A_{th(шт)}$ и $m_{th(шт)}$, которые отличаются от характеристик, полученных в компрессионных приборах, $A_{th(к)}$ и $m_{th(к)}$. По данным обобщения в работе [19] средние значения для оттаивающих песков

$$A_{th(к)} / A_{th(шт)} = 2,16, m_{th(к)} / m_{th(шт)} = 1,4.$$

По данным справочника [15], наиболее часто встречающиеся значения относительной осадки при оттаивании мерзлых песков массивной криотекстуры находятся в диапазоне $A_{th} = 0,005–0,04$.

Прочностные характеристики песка на границе оттаивания и в оттаявшем состоянии по данным Л.Т. Роман и др. [19] приведены в табл. 5. Из нее следует, что на границе оттаивания значение ϕ уменьшается на 4–13 %, а величина C уменьшается в 5 и более раз.

Таблица 5

Прочностные характеристики (C , ϕ) оттаявших песков и на границе оттаивания [19]

Грунт	Начальная влажность W_{tot}	Степень водонасыщения S_r , д.е.	Оттаявший грунт		На границе оттаивания	
			C , МПа	ϕ , град.	C , МПа	ϕ , град.
Песок	8	0,48	0,010	34	0,002	30
	17	0,75	0,008	32	0,001	28
	32	0,99	0,004	23	0,000	22

Характеристики прочности талых и оттаивающих песков по данным В.Д. Карлова и С.В. Арефьева [20] приведены в табл. 6. Одной из основных причин уменьшения сопротивления сдвигу оттаивающих грунтов по сравнению с талыми является снижение внутреннего трения вследствие образования специфической посткриогенной структуры грунта. Оттаивающий слой подстилается слоем мерзлого грунта, практически водонепроницаемого и малосжимаемого. На самой границе находится переувлажненный слой, в котором уплотнение еще не произошло, и частицы тоже находятся во взвешенном состоянии. Наличие практически несжимаемого и водонепроницаемого мерзлого слоя под оттаивающим грунтом приводит к повышению порового давления. Максимальное значение порового давления равно внешнему давлению, приложенному к оттаивающему основанию. Со временем поровое давление снижается, а прочность оттаивающего грунта увеличивается, оставаясь минимальной на границе оттаивания. С течением времени происходит стабилизация прочностных свойств грунта до некоторого постоянного значения.

Таким образом, в песках их несущая способность при оттаивании понижается, а давление оттаивающего грунта на ограждение (подпорная стенка) повышается, что необходимо учитывать при проектировании зданий и сооружений на оттаивающих грунтах.

Глинистые оттаивающие грунты

Мерзлые глинистые грунты (супеси, суглинки, глины) в зависимости от состава, влажности, условий промерзания характеризуются большим

разнообразием криогенных текстур, относящихся как к классу массивных, так и шлировых. Более детальная классификация насчитывает свыше 100 видов и разновидностей криотекстур. Такое разнообразие геокриологических условий еще раз свидетельствует о необходимости определения механических характеристик оттаивающих грунтов на стадиях проектирования и рабочих чертежей путем лабораторных и полевых экспериментов.

Таблица 6

Прочностные характеристики водонасыщенных талых и льдонасыщенных оттаивающих песков (по В.Д. Карлову, С.В. Арефьеву [20])

Грунт	Вертикальное статическое давление, МПа	$\tau_{пр(тал)}$, МПа	$\tau_{пр(отт)}$, МПа	$\varphi_{(тал)}$, град.	$\varphi_{(отт)}$, град.	$C_{(тал)}$, МПа	$C_{(отт)}$, МПа
Песок средне-зернистый	0,1	0,062	0,048	29,7	27,5	–	–
То же	0,1	0,048	0,038	–	–	–	–
Песок крупно-зернистый	0,1	0,065	0,053	–	–	–	–
То же	0,1	0,061	0,050	–	–	–	–
Песок средне-зернистый	0,2	0,121	0,094	30,1	27,5	–	–
То же	0,3	0,168	0,140	30,5	27,9	–	–
Песок пылеватый	–	–	–	28	24	0,012	0,004

Результаты приведенного ниже обобщения работ по определению деформационных и прочностных характеристик оттаивающих глинистых грунтов могут использоваться, во-первых, для предварительных оценок осадок и устойчивости проектируемой системы «сооружение – основание», во-вторых, с целью сравнения значений характеристик, полученных в процессе изысканий, с ранее опубликованными данными испытаний грунтов-аналогов.

Характеристики деформируемости оттаивающих глинистых грунтов приведены в табл. 7 и 8.

По данным авторов справочника [15], наиболее часто встречающиеся значения относительной осадки A_{th} мерзлых глинистых грунтов при оттаивании следующие:

в супесях слоистой криотекстуры $A_{th} = 0,03–0,1$;

в суглинках $A_{th} = 0,04–0,15$ (слоистая криотекстура) и $A_{th} = 0,06–0,2$ (сетчатая криотекстура);

в глинах $A_{th} = 0,06–0,2$ (слоистая криотекстура) и $A_{th} = 0,08–0,25$ (сетчатая криотекстура).

Нормативные документы рекомендуют использовать в расчетах данные полевых опытов $A_{th(шт)}$ и $m_{th(шт)}$, которые отличаются от характеристик, полученных в компрессионных приборах $A_{th(к)}$, $m_{th(к)}$. По данным обобщения в работе [19, табл. 11] средние значения для оттаивающих глинистых грунтов следующие:

$$A_{th(к)} / A_{th(шт)} = 1,4; \quad m_{th(к)} / m_{th(шт)} = 1,7.$$

Таблица 7

**Нормативные характеристики деформируемости оттаивающих
глинистых грунтов (данные П.И. Котова [18])**

Грунт	W_{tot} , д.е.	ρ , г/см ³	A_{th} , д.ед.	m_{th} , МПа ⁻¹
Супесь	0,27	1,88	0,14	0,10
	0,30	1,83	0,08	0,07
	0,24	1,80	0,02	0,08
	0,29	1,83	0,05	0,13
	0,51	1,66	0,22	0,10
	0,25	1,69	0,10	0,12
	0,21	1,97	0,05	0,08
	0,49	1,60	0,26	0,11
Суглинок	0,39	1,74	0,16	0,16
	0,54	1,59	0,21	0,36
	0,34	1,70	0,09	0,12
	0,37	1,74	0,08	0,23
	0,72	1,50	0,27	0,20
	0,42	1,51	0,18	0,15
	0,29	1,82	0,12	0,22
	0,46	1,69	0,19	0,14
Глина	0,41	1,71	0,09	0,37

Характеристики прочности на сдвиг оттаивающих глинистых грунтов зависят от характера поверхности, отделяющей мерзлую породу от талой. В случаях сетчатой и слоистой криотекстуры, если граница оттаивания будет расположена под углом к ледяным включениям, сопротивление сдвигу может оказаться выше, чем в случае сдвига грунта с массивной криотекстурой. В случае высокой льдистости за счет шлировых криотекстур прочность оттаивающих глинистых пород может оказаться много ниже прочности талых грунтов даже при одинаковых значениях влажности. Оттаивание льда в грунте происходит не одновременно: вначале оттаивает лед-цемент, затем лед-включения. Значение φ оттаивающего грунта близко или меньше (до 20–30 %) значения φ немерзлого грунта. Значение C значительно уменьшается: в мягкопластичных и текучепластичных грунтах в 3–5 раз. Данные табл. 9 иллюстрируют значения прочностных характеристик глинистых грунтов при оттаивании в зависимости от показателя текучести I_L .

Прочностные характеристики глинистых оттаявших грунтов и на границе оттаивания приведены в табл. 10.

Таблица 8

**Нормативные характеристики деформируемости оттаивающих
глинистых грунтов (данные И.Н. Вотякова [4])**

Грунт	W_{tot} , %	Нагрузка при оттаивании σ , МПа	A_{th} , д.ед.	m_{th} , МПа ⁻¹
Супеси, суглинки аллювиальные	22,5	0	0,009	–
	22,5	0,1	0,03	0,21
	22,5	0,3	0,065	0,18
	27,5	0	0,014	–
	27,5	0,1	0,040	0,27
	27,5	0,3	0,086	0,24
	32,5	0	0,023	–
	32,5	0,1	0,062	0,38
	32,5	0,3	0,115	0,33
	37,5	0	0,036	–
	37,5	0,1	0,08	0,45
	37,5	0,3	0,15	0,39
	45	0	0,05	–
	45	0,1	0,115	0,6
	45	0,3	0,22	0,55
	55	0	0,10	–
	55	0,1	0,18	0,81
	55	0,3	0,33	0,74
Глина юрская каоли- нитовая	22,5	0	0,012	–
	22,5	0,1	0,042	0,30
	22,5	0,3	0,077	0,22
	27,5	0	0,028	–
	27,5	0,1	0,07	0,40
	27,5	0,3	0,116	0,27
	32,5	0	0,051	–
	32,5	0,1	0,11	0,58
	32,5	0,3	0,16	0,36
	37,5	0	0,08	–
	37,5	0,1	0,16	0,79
	37,5	0,3	0,22	0,46
	45	0	0,13	–
	45	0,1	0,26	1,3
	45	0,3	0,32	0,64

Таблица 9

**Нормативные значения удельного сцепления C
и угла внутреннего трения φ оттаивающего глинистого грунта
при показателе текучести I_L [8]**

Характеристика	Прочностные характеристики при I_L , д.ед.					
	0,25	0,35	0,50	0,625	0,75	1,00
C , МПа	0,021	0,019	0,017	0,015	0,013	0,009
φ , град.	32	28	12	19	14	5

Таблица 10

**Прочностные характеристики (C , φ) оттаявших глинистых грунтов
и на границе оттаивания [19]**

Грунт	Начальная влажность W_{tot}	Степень водонасыщения S_r , д.е.	Оттаявший грунт		На границе оттаивания	
			C , МПа	φ , град.	C , МПа	φ , град.
Супесь	15	0,58	0,021	19	0,016	17
	17	0,62	0,014	17	0,008	15
	23	0,70	0,007	16	0,005	11
Суглинок	15	0,75	0,020	24	0,016	22
	20	0,78	0,017	21	0,012	18
	28	0,81	0,008	17	0,004	12
Глина	20	0,68	0,030	15	0,022	16
	29	0,79	0,020	13	0,014	12
	44	0,80	0,011	12	0,006	10

Заключение

Выполнено обобщение результатов экспериментальных работ, связанных с изучением деформационных (коэффициент оттаивания A_{th} , коэффициент сжимаемости m_{th}) и прочностных (угол внутреннего трения φ , сцепление C) свойств оттаивающих скальных, полускальных и крупнообломочных грунтов, а также песков, супесей, суглинков и глин. Обобщение может быть использовано как справочный материал применительно к основаниям-аналогам при предварительных расчетах напряженно-деформированного состояния и устойчивости системы «сооружение – оттаивающее основание».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Цыгович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
2. **Цыгович Н.А., Зарецкий Ю.К. и др.** О консолидации оттаивающих грунтов // Сб. НИИ оснований. 1966. № 56. С. 32–41.
3. **Роман Л.Т.** Механика мерзлых грунтов. М.: Наука / Интерпериодика, 2002. 426 с.
4. **Вотяков И.Н.** Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
5. **Шушерина Е.П., Мартынова Г.П.** Изучение механических свойств оттаивающих пород // Лабораторные методы исследования мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 279–294.
6. **Каган А.А., Кривоногова Н.Ф.** Многолетнемерзлые скальные основания сооружений. Л.: Стройиздат, 1978. 208 с.
7. **Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др.** Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1023 с.
8. **СП 25.13330.2012.** Основания, фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095519>.
9. **Калабина М.В., Царапов М.Н.** Определение параметров прочности оттаивающих грунтов в испытаниях на трехосное сжатие // IV международно-практическая молодежная конференция по геотехнике: сб. материалов. Тюмень: ТИУ, 2018. С. 28–34.
10. **Царапов М.Н.** Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2008. 21 с.
11. **Hallet V.** The breakdown of rock due to freezing a theoretical model // Proceeding 4th International Conference Permafrost. Washington, 1983. P. 433–438.
12. **Ведерников Л.Е.** К инженерно-геологической характеристике мерзлых коренных пород Северо-Востока СССР // Труды ВНИИ золота и ред. металлов. 1969. № 29. С. 293–314.
13. **Воронков О.К., Ушакова Л.Ф.** Характеристики геомеханических свойств мерзлых и талых скальных оснований // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 3–15.
14. **Гуреев А.М., Воронков О.К., Федоренко А.И., Сапегин Д.Д.** Инженерно-геологические исследования для гидроузлов на мерзлых скальных основаниях // Труды Гидропроекта. 1978. Вып. 65. С. 53–65.
15. **Пашкин Е.М., Каган А.А., Кривоногова Н.Ф.** Терминологический справочник по инженерной геологии. М.: КДУ, 2011. 952 с.
16. **Котов П.И., Роман Л.Т., Царапов М.Н.** Влияние условий оттаивания и уплотнения на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2017. № 1. С. 58–63.
17. **Вахрин И.С., Кузьмин Г.П.** Деформационные характеристики искусственно приготовленных образцов мерзлых грунтов при оттаивании // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 70–76.
18. **Котов П.И.** Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (Европейский Север, Западная Сибирь): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2014. 23 с.
19. **Роман Л.Т., Царапов М.Н. и др.** Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: КДУ, 2018. 188 с.
20. **Карлов В.Д., Арефьев С.В.** Формирование прочностных свойств оттаивающих песков // Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промер-

зающих и протаивающих песчаных и крупнообломочных грунтов: сб. науч. трудов. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. С. 31–34.

REFERENCES

1. Tsytoich N.A. Mechanics of frozen soils. Moscow: Vysshaya shkola; 1973. 446 p. (In Russ.).
2. Tsytoich N.A., Zaretsky Yu.K. et al. On the consolidation of thawing soils. *Sbornik NII osnovaniy – Collection of the Research Institute of Foundations*. 1966;56:32-41. (In Russ.).
3. Roman L.T. Mechanics of frozen soils. Moscow: Nauka / Interperiodika; 2002. 426 p. (In Russ.).
4. Votyakov I.N. Physical and mechanical properties of frozen and thawing soils of Yakutia. Novosibirsk: Nauka; 1975. 176 p. (In Russ.).
5. Shusherina E.P., Martynova G.P. The study of the mechanical properties of thawing rocks. *Laboratory methods for the study of frozen rocks*. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1985. P. 279-294. (In Russ.).
6. Kagan A.A., Krivonogova N.F. Permafrost rock foundations of structures. Leningrad: Stroyizdat; 1978. 208 p. (In Russ.).
7. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesensky E.A. et al. Soil science. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2005. 1023 p. (In Russ.).
8. SP 25.13330.2012. Soil bases and foundations on permafrost soils. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095519>. (In Russ.).
9. Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Determination of strength parameters of thawing soils in triaxial compression tests. *IV International practical youth conference on geotechnics: collection of materials*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2018. P. 28-34. (In Russ.).
10. Tsarapov M.N. Regularities of the formation of strength characteristics of thawing soils during shear: dissertation abstract for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow; 2008. 21 p.
11. Hallet B. The breakdown of rock due to freezing a theoretical model. *Proceeding 4th International Conference Permafrost*. Washington; 1983. P. 433-438.
12. Vedernikov L.E. To the engineering-geological characteristics of frozen bedrock of the North-East of the USSR. *Trudy VNII zolota i redkikh metallov. – Proceedings of the Research Institute of Gold and Rare Metals*. 1969;29:293-314. (In Russ.).
13. Voronkov O.K., Ushakova L.F. Characteristics of geomechanical properties of frozen and thawed rock bases. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;302:3-15. (In Russ.).
14. Gureev A.M., Voronkov O.K., Fedorenko A.I., Sapegin D.D. Engineering-geological studies for hydraulic units on frozen rock bases. *Trudy Gidroprojekta – Proceedings of the Hydroproject*. 1978;65: 53-65. (In Russ.).
15. Pashkin E.M., Kagan A.A., Krivonogova N.F. Terminological handbook of engineering geology. Moscow: KDU; 2011. 952 p. (In Russ.).
16. Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. Impact of compaction and thaw conditions on deformation characteristics of thawing soils. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2017;1:58-63. (In Russ.).
17. Vakhnin I.S., Kuzmin G.P. Thaw deformation characteristics of artificially prepared frozen soil samples. *Advances in current natural sciences*. 2020;7:70-76. (In Russ.).
18. Kotov P.I. Compression deformation of coastal-marine frozen soils during thawing (European North, Western Siberia): dissertation abstract for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow; 2014. 23 p. (In Russ.).

19. Roman L.T., Tsarapov M.N. et al. Manual for determining the physical and mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils. Moscow: KDU; 2018. 188 p. (In Russ.).

20. Karlov V.D., Arefyev S.V. Formation of strength properties of thawing sands. *Engineering-geological study and assessment of frozen, freezing and thawing sandy and large-block soils*: collection of scientific works. L.: Vedeneev VNIIG; 1990. P. 31-34. (In Russ.).

Информация об авторах

О.К. Воронков – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник – консультант;

П.В. Кондратенко – зав. лабораторией «Инженерная геология»;

Л.Ф. Ушакова – научный сотрудник.

Information about the authors

O.K. Voronkov – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Chief Researcher – Consultant;

P.V. Kondratenko – Head of Laboratory «Engineering Geology»;

L.F. Ushakova – Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023; одобрена после рецензирования 08.04.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 20.03.2023; approved after reviewing 08.04.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 627.132:532.55

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК НА ГЛАДКОМ И ШЕРОХОВАТОМ ДНЕ

Ахмед Ширинович Мамедов

ООО «Hidroloq», Баку, Азербайджанская Республика, Ahmad.m@hidroloq.az

Аннотация. Статья посвящена изучению структуры потока в гидравлическом прыжке. Рассматриваются вопросы потерь энергии в гидравлическом прыжке с учетом переменности массы и определения его длины в гладком и шероховатом русле. Полученные расчетные зависимости проверены с многочисленными экспериментальными данными.

Ключевые слова: *расход, гидравлический прыжок, переменная масса, потери энергии, гладкое и шероховатое русло*

Для цитирования: Мамедов А.Ш. Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 67–82.

Original article

HYDRAULIC JUMP ON A SMOOTH AND ROUGH BOTTOM

Ahmed Sh. Mamedov

«Hidroloq» LTD, Baku, Republic of Azerbaijan, Ahmad.m@hidroloq.az

Abstract. The article is devoted to the study of the flow structure in a hydraulic jump. The issues of energy losses in a hydraulic jump are considered, taking into account the variability of mass and the determination of its length in a smooth and rough channel. The calculated dependences obtained have been verified with numerous experimental data.

Keywords: *flow rate, hydraulic jump, variable mass, energy loss, smooth and rough river bed*

For citation: Mamedov A.Sh. Hydraulic jump on a smooth and rough bottom. *Proceedings of the VNIIG. 2023;308:67-82. (In Russ.).*

Наблюдаемые сложные гидравлические явления, возможность появления сбойных течений и размывов русел, резкое изменение процессов формирования русел не могут не оказать существенного влияния на выбор типов и размеров строящихся гидротехнических сооружений. На участке сопряжения бьефов происходит гашение избыточной энергии потока, которое осуществляется как в гидравлическом прыжке, так и при помощи разнообразных гасителей энергии.

Явление гидравлического прыжка характеризуется большой неравномерностью скорости по вертикальным сечениям и длине прыжка, что связано с образованием замкнутых областей интенсивной циркуляции воды на поверхности потока. Наличие в зонах раздела между транзитной струей и вальцем больших градиентов скоростей обуславливает возникновение турбулентного перемешивания жидкости и связанного с этим явления макропульсации.

Это является причиной интенсивного гашения избыточной энергии, поэтому гидравлический прыжок можно рассматривать как простой гаситель энергии. Гидравлический прыжок на гладком водобое часто бывает недостаточен для эффективного гашения избыточной кинетической энергии. В конце прыжка еще имеет место значительная величина пульсаций скорости, а также неравномерность распределения скоростей потока по глубине. В условиях неравномерного распределения расхода по ширине водосброса гидравлический прыжок на гладком водобое практически не устраняет сбойности течения в нижнем бьефе, за исключением некоторых случаев сильно затопленных прыжков.

В результате многочисленных экспериментальных исследований установлено, что потери энергии в зоне самого прыжка весьма значительны. Выявление истинной причины гашения энергии и макротурбулентного характера движения в зоне прыжка, очевидно, возможно только на основании изучения механизма и структуры гидравлического прыжка. В работе Б.А. Бахметьева были проведены подробные теоретические исследования, подкрепленные исследованиями, позволяющими отвечать на вопрос о возможных формах свободной поверхности потока при неравномерном движении и условиях образования прыжка.

Изучение потерь энергии в зоне прыжка имеет важное значение при анализе структуры потока. Данному вопросу посвящены многочисленные работы [1–11, 14–23]. Результаты этих работ свидетельствуют о том, что на участке гидравлического прыжка происходит интенсивное турбулентное перемешивание, которое вызывает проникновение из турбулентной (бурной) зоны в транзитную (спокойную) крупных вихревых образований в виде добавочных дискретных масс жидкости.

Проведенный анализ существующих работ по данному вопросу выявил, что большинство из них посвящены потоку с постоянной массой. В настоящее время в практике для определения длины гидравлического прыжка используют ряд эмпирических формул [1, 5]:

а) формула Н.Н. Павловского:

$$l_{\text{пр}} = 2,5 (1,9 \cdot h_2 - h_1);$$

б) формула М.Д. Чертоусова:

$$l = 10,3 h_1 (\sqrt{Fr} - 1)^{0,81}.$$

Предложенная модель. В отличие от существующих работ, нами рассматривается гидравлический прыжок, в котором движение жидкости происходит с переменной массой с уменьшением количества движений. При резком переходе потока из бурного состояния в спокойное между сечениями I–I и II–II образуется гидравлический прыжок, внутри которого происходит весьма сложный гидродинамический процесс (рис. 1). В пределах гидравлического прыжка происходит как присоединение (между сечениями I–I и К–К) к основному потоку, так и отделение добавочного расхода (между сечениями К–К и II–II) от него. При этом удельный расход воды в створе I–I будет q_0 , в створе К–К увеличиваться и станет $(q_0 + q_d)$, где q_d – удельный расход присоединенного потока. На участке между ство-

рами К–К и II–II происходит отделение присоединенного расхода q_d от основного потока.

В результате в сечениях I–I и II–II удельные расходы основного потока одинаковы и равны q_0 .

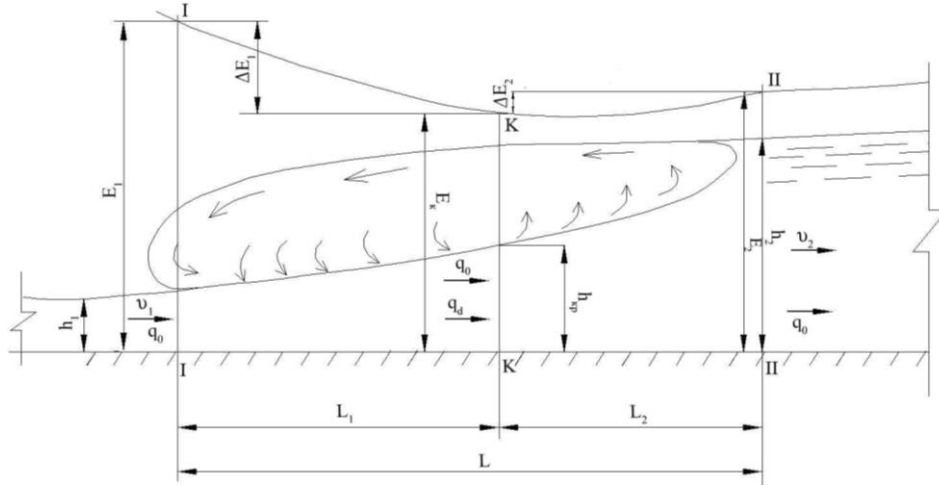


Рис. 1. Расчетная схема

По данным существующих исследований установлено, что энергия потока в пределах гидравлического прыжка уменьшается. Однако по результатам проведенных нами исследований следует, что характер изменения энергии потока между сечениями I–I и II–II в некоторой степени отличается от существующих подобных работ. При обработке данных многочисленных исследований подтверждается, что по длине гидравлического прыжка удельная энергия потока уменьшается до минимума – E_k в створе К–К, а затем за счет восстановления напора несколько увеличивается и равняется E_2 в створе II–II.

Для изучения потери напора в гидравлическом прыжке нами рассматривалось уравнение Г.А. Петрова в следующем виде [10–14]:

$$d\left(\frac{\alpha_0 v^2}{2g}\right) + \frac{dP}{\gamma} + dz + i_f dx + \frac{\alpha_0(v-\theta)}{g} \frac{v dQ}{Q} = 0, \quad (1)$$

где Q – расход по течению потока; v – средняя по сечению скорость потока; P – гидродинамическое давление; i_f – гидравлический уклон трения; θ – проекция скоростей присоединяемых частиц на направление скорости основного потока.

Принимая дно русла горизонтальным и интегрируя уравнение (1) между сечениями I–I и II–II по длине потока, после несложных преобразований получаем:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 + \int_1^2 i_f dx + \int_1^2 \frac{\alpha_0(v-\theta)}{g} \frac{v}{Q} dQ \quad (2)$$

Полагая, что потеря энергии при прыжке равна разности удельной энергии E_1 и E_2 в сечениях I–I и II–II, вместо (2) находим:

$$E_1 - E_2 = \left(\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 \right) = \int_1^2 i_f dx + \frac{\alpha_0}{g} \int_1^2 \frac{v(v-\theta)}{Q} dQ. \quad (3)$$

Уравнение (3) напоминает уравнение Бернулли, но с новым членом в правой части. При движении потока с переменным расходом вдоль пути потери напора на трение о дно и боковые стенки ложа русла определяем по формуле того же вида, что и с постоянным расходом:

$$h_f = \int_1^2 i_f dx = \frac{v_{cp}^2}{C_{cp}^2 R_{cp}}, \quad (4)$$

где C_{cp} – среднее значение коэффициента Шези между створами; R_{cp} – среднее значение гидравлических радиусов между створами.

Другой интеграл в (3) выражает в основном потери напора, обусловленные переменностью расхода потока:

$$h_{смеш.} = \frac{\alpha_0}{g} \int_1^2 \frac{v(v-\theta)}{Q} dQ, \quad (5)$$

где θ – отношение проекции скорости присоединяемого потока к основному.

В дальнейших исследованиях будем принимать, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ и $\theta = 0$ (встреча двух потоков происходит под углом 90°).

Принимая во внимание вышеуказанные допущения и учитывая, что $b = 1$ м, $dQ = q_x dx$, определяем значение потери напора по формуле (5) следующим образом:

$$h_{смеш.} = \frac{\alpha}{g} \int_1^2 \frac{v(v-\theta)}{Q} dQ = \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{v^2 q_x}{bhv} dx = \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\tilde{v}_x q_x}{\tilde{h}_x} dx. \quad (6)$$

В выражении (6) \tilde{v}_x и \tilde{h}_x являются переменными величинами и зависят от длины прыжка.

Определяем величину q_x для погонного значения отделяемого или присоединяемого потока из выражения

$$q_x = \frac{q_{доб}}{l_x}, \quad (7)$$

где l_x – длина участка присоединения и отделения; $q_{доб}$ – добавочный расход.

Интегрируя зависимость (6) в пределах сечений I–I и K–K, определяем потери напора на смешение добавочного расхода с основным:

$$\Delta h_{смеш.} = \frac{1}{g} \int_1^K \frac{\tilde{v}_{x_1}}{\tilde{h}_{x_1}} \frac{q_{доб}}{l_1} dx. \quad (8)$$

Принимаем изменение v_x и h_x на этом участке по прямолинейному закону:

$$\tilde{v}_{x_1} = v_1 - (v_1 - v_k) \frac{x}{l_1}, \quad (9)$$

$$\tilde{h}_{x_1} = h_1 + (h_k - h_1) \frac{x}{l_1}. \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) уравнение (8) принимает следующий вид:

$$\Delta h_{\text{смеш.}} = \int_0^{l_1} \frac{v_1 - (v_1 - v_k) \frac{x}{l_1}}{h_1 + (h_k - h_1) \frac{x}{l_1}} \left(\frac{q_{\text{доб}}}{gl_1} \right) dx. \quad (11)$$

Для участка гидравлического прыжка между сечениями I-I и K-K с глубинами воды h_1 и h_k выражение (11) после небольших преобразований может быть представлено в виде:

$$dh_{\text{смеш.}} = \frac{\alpha q_{\text{доб}}}{gl} \int_0^l \frac{v_1 - \frac{v_1 - v_k}{l} x}{h_1 + \frac{h_k - h_1}{l} x} dx. \quad (12)$$

Интегрируя выражение (12) и преобразуя, находим зависимость потери напора на смешение добавочного расхода с основным при прыжке:

$$\Delta h_{\text{смеш.}} = \frac{\alpha q_{\text{доб}}}{g(h_{\text{кр}} - h_1)} \left[\frac{(v_1 h_{\text{кр}} - v_{\text{кр}} h_1)}{h_{\text{кр}} - h_1} \ln \frac{h_{\text{кр}}}{h_1} + (v_{\text{кр}} - v_1) \right]. \quad (13)$$

Интегрируя зависимость (8) в пределах сечений K-K и II-II, определяем потери напора на отделение добавочного расхода из основного:

$$\Delta h_{\text{отд.}} = \frac{1}{g} \int_K^{\text{II}} \frac{\tilde{v}_{x_2}}{\tilde{h}_{x_2}} \frac{q_{\text{доб}}}{l_{x_2}} dx. \quad (14)$$

Принимаем изменение \tilde{v}_x и \tilde{h}_x по прямолинейному закону в следующем виде:

$$\tilde{v}_{x_2} = v_{\text{кр}} - (v_{\text{кр}} - v_2) \frac{x}{l_2}, \quad (15)$$

$$\tilde{h}_{x_2} = h_{\text{кр}} + (h_2 - h_{\text{кр}}) \frac{x}{l_2}. \quad (16)$$

С учетом (15) и (16) уравнение (14) принимает вид;

$$\Delta h_{\text{отд.}} = \int_0^{l_2} \frac{v_{\text{кр}} - (v_{\text{кр}} - v_2) \frac{x}{l_2}}{h_{\text{кр}} + (h_2 - h_{\text{кр}}) \frac{x}{l_2}} \left(\frac{q_{\text{доб}}}{gl_2} \right) dx, \quad (17)$$

Раскрывая интеграл в выражении (17) и производя некоторые преобразования, получим формулу для определения потери напора на отделение добавочного расхода при прыжке:

$$\Delta h_{\text{отд.}} = \frac{\alpha q_{\text{доб}}}{g(h_2 - h_{\text{кр}})} \left[\frac{(v_{\text{кр}} h_2 - v_2 h_{\text{кр}})}{h_2 - h_{\text{кр}}} \ln \frac{h_2}{h_{\text{кр}}} + (v_2 - v_{\text{кр}}) \right]. \quad (18)$$

Таким образом, получены два выражения (13) и (18) для определения потери напора при гидравлическом прыжке на соединение и отделение добавочного расхода.

Надо отметить, что по принятой схеме до критического сечения происходит уменьшение энергии потока. Доходя до минимума в критическом сечении, далее за счет отделения добавочного расхода поток частично восстанавливает энергию. Это условие показывает, что на участке К-К – П-П происходит восстановление напора. Значение восстановленного напора определится по выражению (18).

При известных величинах гидравлических параметров прыжка значения $q_{\text{доб}}$ и $h_{\text{кр}}$ можно определить из следующих выражений [13]:

$$h_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{1}{3} [h_2 (h_1 + h_2) + h_1^2]}, \quad (19)$$

$$q_{\text{доб}} = \sqrt{g} \left[\sqrt{\frac{h_{\text{кр}}^3}{\alpha_0}} - \sqrt{\frac{h_1 h_2}{2\alpha_0} (h_1 + h_2)} \right]. \quad (20)$$

Зная параметры гидравлических элементов прыжка, с большой точностью можно определить по формулам (13) и (18) потери напора за счет соединения и отделения добавочного расхода по длине прыжка.

Предлагаемые зависимости (13) и (18) дают возможность определения потери энергии в гидравлическом прыжке. Эти потери энергии образуются под влиянием поверхностного вальца. С другой стороны, часть энергии потока расходуется на преодоление сопротивления дна русла. Использование гидравлических параметров потока определяют удельные энергии E_1 , E_2 и E_k в створах I-I, П-П и К-К гидравлического прыжка. При этом потери энергии между сечениями I-I и К-К составляют $\Delta E_1 = E_1 - E_k$, а между сечениями К-К и П-П $\Delta E_2 = E_k - E_2$. Во всех случаях удовлетворяются условия $E_k < E_2$ и $\Delta E_2 < 0$. Отсюда видно, что при движении потока в пределах участка между сечениями К-К и П-П удельная энергия потока дополнительно увеличивается от минимума (сечение К-К) до E_2 (сечение П-П) на величину ΔE_2 . При подсчетах по (13) и (18) значений Δh_1 и Δh_2 можно определить потери энергии на преодоление сопротивления вдоль участка длиной L_1 из выражения $\Delta H_1 = \Delta E_2 - \Delta h_1$ и участка длиной L_2 из выражения $\Delta H_2 = \Delta h_2 + \Delta E_2$. Из приведенных данных следует, что в гидравлическом прыжке потеря энергии, необходимая для преодоления сопротивления дна русла, будет равна $\Delta H_1 + \Delta H_2 = \Delta E$.

Для определения гидравлических параметров потока и нахождения величины значения потери напора в гидравлическом прыжке по (13), (18) и другим рекомендуемым нами выражениям проведена обработка данных лабораторных исследований Д.А. Ахутина [2], результаты которых представлены в табл. 1. Из этой таблицы видно, что опыты проводились при величинах сопряженных глубин $h_1 = 1,30-7,35$ см и $h_2 = 10,60-32,80$ см, а длина гидравлического прыжка колебалась в пределах 35–185 см. Потери напора в гидравлическом прыжке, подсчитанные по (13) и (18), составляют соответственно $\Delta h_1 = 1,01-36,0$ см и $\Delta h_2 = 0,85-3,87$ см. Суммарная потеря напора по длине гидравлического прыжка изменялась от 0,15 до 11,81 см. Кроме того, по данным приведенной таблицы видно, что для всех опытов ΔE_2 отрицательное и удовлетворяются условия $\Delta E_1 > \Delta h_1$ и $\Delta E_2 < \Delta h_2$. Это положение полностью подтверждают представленные нами рекомендации по оценке гидравлического прыжка.

Для определения величины потери напора на преодоление сопротивления дна русла, минуя формулы (13) и (18), нами после обработки многочисленных данных (коэффициент регрессии $R = 1$), получена зависимость:

$$\Delta E = E_1 \left[0,78 - 0,89 \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{0,15} \right], \quad (21)$$

где h_1, h_2 – первая и вторая сопряженные глубины в прыжке; E_1 – удельная энергия потока на начальном участке прыжка.

Таким образом, потеря энергии в гидравлических прыжках будет:

$$E_1 - E_2 = \Delta h_f + \Delta h_{\text{смеш.}} + \Delta h_{\text{отд.}} \quad (22)$$

Из уравнения (22) видно, что для гидравлических прыжков должно в обязательном порядке выполняться следующее условие:

$$\Delta E = E_1 - E_2 - (\Delta h_{\text{смеш.}} - \Delta h_{\text{отд.}}). \quad (23)$$

Надо отметить, что результаты расчетов по формулам (21) и (22) полностью идентичны.

Для определения длины гидравлического прыжка воспользуемся формулой Дарси – Вейсбаха для критического сечения:

$$\Delta E = (\lambda_p + \lambda_f) \frac{L_{\text{пр}}}{h_{\text{кр}}} \frac{v_{\text{кр}}^2}{2g}, \quad (24)$$

где ΔE – энергия для преодоления сопротивления трения; λ_p – коэффициент гидравлического трения от уклона градиента давления $\left(\frac{d}{dl} \left(\frac{P}{\gamma} \right) = i_p; [9] \right)$; λ_f – коэффициент гидравлического трения от уклона трения [2, 9, 16]; $L_{\text{пр}}$ – длина прыжка; $v_{\text{кр}}$ – критическая скорость потока; $h_{\text{кр}}$ – критическая глубина потока.

Из (24) для длины гидравлического прыжка находим:

$$L_{\text{пр}} = \frac{2g}{v_{\text{кр}}^2} \frac{\Delta E h_{\text{кр}}}{\lambda_p + \lambda_f}. \quad (25)$$

Для определения λ_p и λ_f нами обработаны данные лабораторных исследований ряда авторов [2, 3, 6, 8, 9, 14–17, 20–23]. По результатам работ [14–16, 22, 23] получено выражение для определения λ_p в виде:

$$\lambda_p = 0,0021 F r^{0,84}. \quad (26)$$

При этом значение λ_f определяется как для гладких, так и для шероховатых русел в отдельности. Коэффициент гидравлического трения λ_f для гладкого дна определяется по формуле:

$$\lambda_{f.\text{гл.}} = 0,08 \lambda_0^{0,42} \left(\frac{h_{\text{кр}}}{h_1} \right)^{1,6}. \quad (27)$$

Элементы гидравлического прыжка и потери энергии в нем

Глубина воды в створе I-1, h_1 , см	Глубина воды в створе II-2, h_2 , см	Длина гидравлического прыжка, L_n , см	Число Фруда	Скорость потока в створе I-1, v_1 , см/с	Скорость потока в створе II-2, v_2 , см/с	Энергия потока в створе I-1, E_1 , см	Энергия потока в створе II-2, E_2 , см	Критическая глубина, $h_{кр}$, см	Добавочной расход воды, $h_{доб}$, см ² /с	Критическая скорость, $v_{кр}$, см/с	Критическая энергия потока, $E_{кр}$, см	$\Delta E_1 = E_1 - E_{кр}$	$\Delta E_2 = E_{кр} - E_2$	Δh_1 по [2], см	Δh_2 по [2], см	$\Delta H_1 = \Delta E_1 - \Delta h_1$, см	$\Delta H_2 = \Delta E_2 + \Delta h_2$, см	$\Delta E = \Delta H_1 + \Delta H_2$, см
1,3	10,9	55	39,3	224	26,7	26,9	11,26	6,7	251,99	81,07	10,05	16,82	-1,21	13,36	1,3	3,47	0,08	3,55
1,3	16,0	82	81,9	323,2	26,3	54,5	16,35	9,63	516,58	97,22	14,45	40,08	-1,90	31,08	2,07	9,0	0,17	9,17
1,9	8,80	35	13,0	155,9	33,7	14,3	9,38	5,71	130,99	74,84	8,56	5,73	-0,81	4,73	0,85	1,0	0,03	1,03
1,9	14,7	72	33,8	251,0	32,4	34,0	15,24	9,09	380,84	94,41	13,63	20,38	-1,61	16,26	1,71	4,12	0,10	4,22
1,9	21,0	107	66,6	352,3	31,9	65,2	21,52	12,71	749,50	111,66	19,06	46,11	-2,46	36,00	2,67	10,1	0,21	10,31
2,52	6,20	15	4,30	102,6	41,7	7,9	7,090	4,49	39,240	66,35	6,730	1,15	-0,35	1,01	0,36	0,14	0,00	0,15
2,52	13,7	63	17,5	208,0	38,3	24,6	14,45	8,73	283,61	92,54	13,09	11,47	-1,35	9,37	1,42	2,11	0,06	2,17
2,52	19,1	104	32,5	283,5	37,4	43,5	19,81	11,82	558,72	107,69	17,73	25,75	-2,08	20,57	2,21	5,18	0,13	5,31
2,52	24,4	127	51,7	357,6	36,9	67,7	25,10	14,87	894,61	120,77	22,30	45,38	-2,79	35,72	3,01	9,66	0,22	9,88
3,11	12,6	48	10,2	176,7	43,6	19,0	13,57	8,32	202,02	90,34	12,48	6,54	-1,09	5,46	1,13	1,08	0,03	1,11
3,08	18,5	90	21,0	252,1	42,0	35,5	19,4	11,7	472,40	107,0	17,5	18,0	-1,89	14,58	1,99	3,40	0,10	3,50
3,06	23,0	120	32,0	310,0	41,2	52,0	23,9	14,2	735,40	118,2	21,4	30,7	-2,50	24,51	2,66	6,15	0,16	6,31
3,07	29,5	160	51,0	391,8	40,8	81,3	30,3	18,0	1185,6	132,8	27,0	54,3	-3,37	42,79	3,63	11,6	0,26	11,86

3,72	16,0	65	11,4	204,0	47,4	24,9	17,1	10,5	303,50	101,4	15,7	9,2	-1,43	7,65	1,48	1,56	0,05	1,61
3,68	23,1	123	22,8	287,1	45,7	45,7	24,2	14,5	675,6	119,3	21,8	23,9	-2,39	19,35	2,52	4,58	0,13	4,71
3,70	26,7	140	29,6	328,0	45,5	58,5	27,8	16,6	902,1	127,6	24,9	33,7	-2,87	26,98	3,05	6,69	0,18	6,86
3,72	32,2	170	41,8	390,5	45,1	81,5	33,2	19,8	1296,8	139,2	29,6	51,8	-3,61	41,06	3,87	10,76	0,26	11,02
4,42	15,4	48	7,8	184,0	52,8	21,7	16,8	10,4	237,7	101,0	15,6	6,1	-1,22	5,14	1,25	0,93	0,03	0,96
4,40	20,1	95	12,7	234,3	51,3	32,4	21,4	13,1	447,6	113,2	19,6	12,8	-1,85	10,58	1,92	2,21	0,07	2,28
4,40	24,2	128	17,9	277,8	50,5	43,7	25,5	15,4	670,7	122,9	23,1	20,6	-2,40	16,83	2,51	3,80	0,11	3,91
4,42	30,5	160	27,3	343,8	49,8	64,7	31,8	19,0	1077,3	136,6	28,5	36,1	-3,24	29,04	3,43	7,10	0,19	7,29
4,40	33,7	185	33,2	378,3	49,4	77,4	34,9	20,8	1315,8	143,0	31,3	46,1	-3,68	36,80	3,92	9,29	0,24	9,53
4,93	12,8	30	4,7	150,3	57,9	16,4	14,5	9,2	126,3	94,8	13,7	2,7	-0,78	2,36	0,79	0,35	0,01	0,36
4,93	18,0	70	8,5	202,6	55,5	25,9	19,6	12,1	314,3	108,8	18,1	7,8	-1,47	6,54	1,51	1,22	0,04	1,26
4,94	23,2	110	13,4	254,6	54,2	38,0	24,7	15,0	566,4	121,4	22,5	15,4	-2,16	12,74	2,24	2,70	0,08	2,78
4,97	27,4	135	18,0	295,9	53,7	49,6	28,9	17,4	809,2	130,8	26,1	23,4	-2,72	19,12	2,85	4,32	0,13	4,45
4,97	31,6	160	23,4	337,7	53,1	63,1	33,0	19,8	1088,5	139,5	29,8	33,3	-3,29	26,94	3,46	6,41	0,18	6,59
5,62	16,5	65	5,8	178,5	60,8	21,9	18,4	11,5	218,0	106,2	17,2	4,6	-1,14	3,97	1,16	0,64	0,02	0,66
5,67	21,5	100	9,1	224,8	59,3	31,4	23,3	14,3	425,0	118,6	21,5	9,9	-1,79	8,34	1,84	1,59	0,05	1,64
5,65	25,8	130	12,7	265,4	58,1	41,6	27,5	16,8	650,7	128,2	25,1	16,4	-2,37	13,57	2,46	2,84	0,09	2,93
5,65	31,2	190	18,0	315,9	57,2	56,5	32,9	19,8	984,2	139,5	29,8	26,8	-3,10	21,82	3,24	4,93	0,15	5,08
6,27	15,0	35	4,1	158,0	66,0	19,0	17,2	10,9	141,1	103,5	16,4	2,6	-0,83	2,29	0,84	0,31	0,01	0,32
6,27	19,8	80	6,6	201,0	63,6	26,9	21,9	13,6	312,2	115,5	20,4	6,4	-1,45	5,50	1,48	0,94	0,03	0,97
6,27	23,9	115	9,2	237,5	62,3	35,0	25,9	15,9	500,4	125,0	23,9	11,1	-2,00	9,35	2,06	1,79	0,06	1,85
6,27	28,9	150	12,9	282,0	61,2	46,8	30,8	18,8	776,8	135,7	28,1	18,7	-2,67	15,42	2,77	3,24	0,10	3,34
6,25	32,6	185	16,2	315,3	60,4	56,9	34,5	20,9	1013,9	143,1	31,3	25,6	-3,17	20,98	3,31	4,64	0,14	4,78
7,35	16,5	30	3,6	162,1	72,2	20,7	19,2	12,2	145,9	109,5	18,3	2,4	-0,83	2,14	0,84	0,27	0,01	0,28
7,25	21,5	70	5,9	204,5	69,0	28,6	23,9	15,0	328,2	121,1	22,4	6,1	-1,50	5,28	1,52	0,86	0,03	0,89

В зависимости (27) λ_0 определяется по формуле [15]

$$\lambda_0 = \frac{0,035}{\text{Re}^{0,25}},$$

где Re – число Рейнольдса, определяемое по формуле:

$$\text{Re} = \frac{v_1 h_1}{\nu}. \quad (28)$$

Для шероховатого русла коэффициент гидравлического трения определяется из выражения:

$$\lambda_{f(\text{шер.})} = 0,033 \lambda_f^{0,34} \left(\frac{h_{\text{кр}}}{h_1} \right)^{1,6} \quad (29)$$

В зависимости (29) величина значения λ_f определяется из (30).

$$\lambda_f = \frac{1}{\left(3,91g \frac{h}{k} + 4 \right)^2}, \quad (30)$$

где k определяется по методике А.П. Зегжды [1, 5, 16].

Проведено сопоставление указанных зависимостей с данными экспериментальных исследований М.Д. Чертоусова (табл. 2). С использованием приведенных данных длина гидравлического прыжка подсчитана как по предлагаемым нами зависимостям, так и по рекомендациям Н.Н. Павловского и М.Д. Чертоусова, которые приводятся в табл. 2. Сопоставление полученных зависимостей с результатами экспериментальных данных М.Д. Чертоусова показало удовлетворительную их сходимость [16]. При этом расхождение между опытными и рассчитанными длинами гидравлического прыжка изменялось: по рекомендуемым нами зависимостям $\pm 0,4$ – 22 %, по формуле Н.Н. Павловского $\pm 1,0$ – $36,0$ %, по выражению М.Д. Чертоусова $\pm 2,1$ – 29 %.

При сопоставлении параметров гидравлического прыжка по разработанным нами рекомендациям для шероховатого дна были использованы данные М.С. Вызго [4] и Ю.М. Кузьмина, результаты которых представлены на рис. 2. По данным этого рисунка гидравлические параметры прыжка, определяемые по нашей рекомендации, а также по выражению М.С. Вызго $l_{\text{пр.ш.}} = l_0$, почти совпадают, что подтверждается графиками $\frac{l}{l_0} = f\left(\frac{\Delta}{h_2}\right)$ (где по оси ординат отложена относительная длина прыжка – отношение длины прыжка l на шероховатом дне к длине прыжка l_0 на гладком дне, а по оси абсцисс – относительная шероховатость, отношение высоты выступа Δ песчинок, наклеенных на дне, ко второй сопряженной глубине h_2).

Кроме того, по предлагаемой нами рекомендации составлен график изменения $\frac{l}{l(h_2 - h_1)} = f\left(\frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}\right)$ для гидравлического прыжка (где по оси ординат отложена относительная длина прыжка – отношение среднего значения длины прыжка l к его высоте $(h_2 - h_1)$, а по оси абсцисс – число

Таблица 2

Результаты сопоставления длины гидравлического прыжка с опытными данными М.Д. Чергусова

Первая сопряженная глубина, см	Вторая сопряженная глубина, см	Удельный расход, см ² /с	Опытная длина прыжка, L_0 , см	Длина прыжка по расчетам автора, $L_{ас}$, см	Расхождение между L_0 и $L_{ас}$, %	Длина прыжка по Н.Н. Павловскому, $L_{пс}$, см	Расхождение между L_0 и $L_{пс}$, %	Длина прыжка по М.Д. Чергусову, $L_{чс}$, см	Расхождение между L_0 и $L_{чс}$, %
0,24	2,92	33,0	11,5	11,6	-0,4	13	-15	13	-16,9
3,75	33,8	1527,9	180,0	178,9	0,6	151	16	161	10,4
2,20	15,5	544,1	70,0	74,7	-6,7	68	3	77	-10,1
1,95	15,02	493,8	60,0	73,2	-22,0	66	-11	73	-21,0
1,96	14,93	492,4	67,0	72,6	-8,2	66	1	73	-9,0
2,25	17,64	622,3	87,0	87,7	-0,9	78	10	85	2,1
1,94	15,85	518,0	70,0	78,1	-11,5	70	-1	76	-8,9
0,34	2,980	40,6	13,0	12,2	6,1	13	-2	14	-10,1
1,01	9,22	216,2	41,5	42,6	-2,6	41	1	44	-6,5
0,24	2,54	28,8	10,5	10,1	3,8	11	-9	12	-13,1
0,22	2,67	28,9	11,5	10,5	9,1	12	-6	12	-7,0
0,24	2,92	33,0	11,5	11,6	-0,4	13	-15	13	-16,9
0,17	2,18	20,7	10,0	8,3	17,1	10	1	10	0,8
0,35	4,5	61,2	19,0	18,4	3,0	21	-8	21	-9,0
0,21	2,72	28,7	12,0	10,5	12,2	12	-3	12	-3,9
0,25	3,55	40,7	14,0	13,8	1,1	16	-16	16	-15,9
0,21	3,11	32,6	12,0	11,9	1,1	14	-19	14	-17,3

Продолжение таблицы 2

Первая сопряженная глубина, см	Вторая сопряженная глубина, см	Удельный расход, см ² /с на 1 пот.см	Опытная длина гидравлического прыжка, L ₀ , см	Длина прыжка по расчетам автора, L _{ав} , см	Расхождение между L ₀ и L _{ав} , %	Длина прыжка по Н.Н. Павловскому, L _п , см	Расхождение между L ₀ и L _п , %	Длина прыжка по М.Д. Чертовскому, L _ч , см	Расхождение между L ₀ и L _ч , %
0,23	3,79	41,5	17,0	14,6	14,4	17	-3	17	2,0
0,18	3,34	32,2	13,0	12,1	7,1	15	-19	15	-14,4
0,11	2,45	18,4	10,0	8,3	17,0	11	-14	10	-2,9
0,19	4,16	41,1	19,0	14,9	21,6	19	-2	18	6,4
0,18	4,10	39,40	14,0	14,2	-1,3	19	-36	18	-29,0
0,10	2,63	18,80	9,0	8,5	5,8	12	-36	11	-22,0
3,35	13,64	617,1	61,5	54,9	10,8	56	8	65	-5,6
3,23	13,88	613,4	59,0	56,9	3,5	58	2	69	-16,6
3,29	14,42	642,0	62,0	60,3	2,7	60	3	71	-14,5
3,14	15,27	658,0	79,5	68,7	13,5	65	19	73	7,9
3,03	14,60	618,5	65,0	64,2	1,3	62	5	72	-10,9
2,68	15,5	608,6	65,0	72,4	-11,4	67	-3	78	-19,4
2,68	15,89	622,8	78,0	75,1	3,7	69	12	79	-1,3
2,16	14,35	501,0	67,0	69,4	-3,6	63	6	69	-3,5
2,50	16,62	624,2	98,5	81,3	17,5	73	26	81	17,9
0,40	2,750	41,20	14,0	11,2	20,2	12	14	13	5,3
2,10	14,51	498,3	66,0	70,4	-6,6	64	4	70	-6,6
0,51	3,68	62,1	16,5	15,5	5,9	16	2	18	-7,0

Фруда) (рис. 3). Он дан совместно с подобными графиками Бюро мелиорации США, Н.Н. Павловского и М.Д. Чертоусова [14, 15]. Анализ материалов рис. 3 показывает, что график изменения длины гидравлического прыжка, составленный по предлагаемой нами методике, удовлетворительно согласуется с графиком Бюро мелиорации США [18, 19] и хорошо подтверждается опытными данными А.Н. Ахутина и А.Н. Рахманова. При определении длины гидравлического прыжка по графикам Бюро мелиорации США расхождение не превышает $\pm 9,5-15,6\%$. Однако при $\frac{U_1}{\sqrt{gh_1}} < 4$ эти графики существенно отличаются от графиков Н.Н. Павловского и М.Д. Чертоусова. Значительные отклонения всех этих графиков происходят от опытных данных Пистровского и Бредли. Необходимо отметить, что при величине $\frac{U_1}{\sqrt{gh_1}} > 4$ сходимость длин гидравлического прыжка определяемых по разным (в том числе нашим) рекомендуемым зависимостям, удовлетворительная.

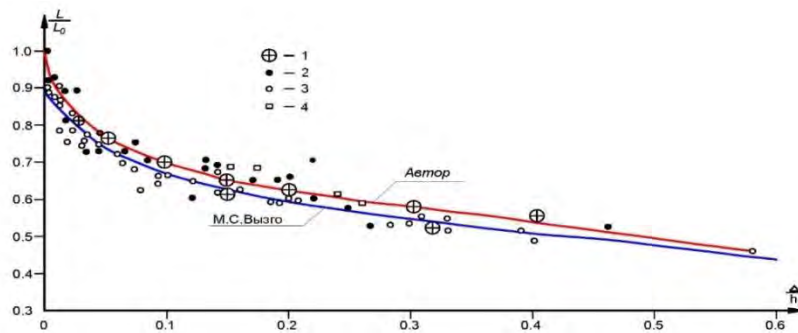


Рис. 2. График $\frac{l}{l_0} = f\left(\frac{\Delta}{h_2}\right)$:

1 – по данным К.А. Сулейманова; 2, 3, 4 – по данным Ю.М. Кузьмина

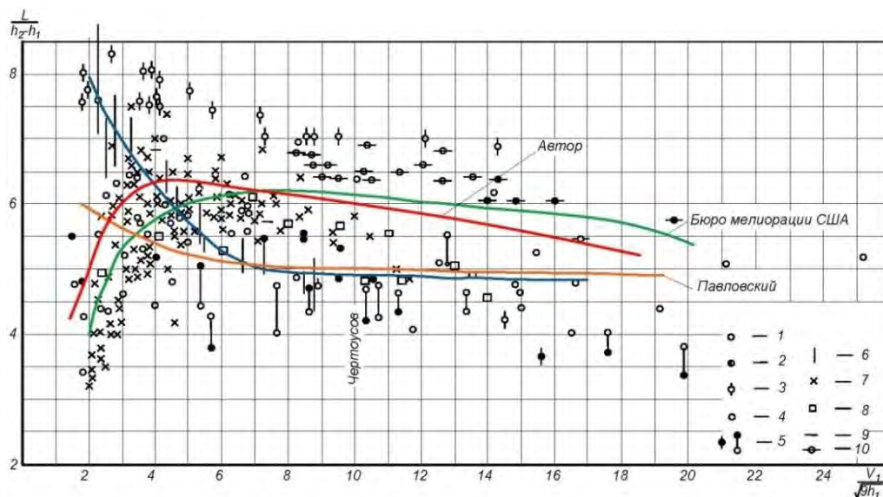


Рис. 3. Длина прыжка по опытам:

1 – по опытам Сафранца; 2 – по опытам Эйнвахтера; 3 – по опытам Войциски; 4 – по опытам Сметаны; 5 – по опытам Пистровского; 6 – по опытам Бахметьева и Мацко; 7 – по опытам Ахутина; 8 – по опытам Рахманова; 9 – по опытам Мура; 10 – по опытам Бредли и Петерки

Заключение

1. На основании результатов теоретических исследований были предложены расчетные зависимости для определения потери напора в вальце при гидравлическом прыжке как при соединении (13), так и при отделении (18) добавочного расхода.

2. После обработки многочисленных данных определить величину потерь напора потока на преодоление сопротивления дна русла, была получена зависимость (21).

3. Для определения длины гидравлического прыжка были выведены теоретические формулы (25), (26), (27) и (29) для гладких и шероховатых русел.

4. Проведено сравнение полученных зависимостей с экспериментальными данными других авторов. Параметры прыжка, определенные по формулам (25), (26), (27) и (29), более соответствуют экспериментальным данным, чем существующие аналогичные формулы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И.** Гидравлика. М.: Л.: Энергия, 1964. 351 с.
2. **Ахутин Д.А.** Об определении некоторых параметров совершенного гидравлического прыжка // Труды Гидропроекта. 1963. № 10. С. 323–327.
3. **Беляшевский Н.Н., Пивовар Н.Г., Калантыренко И.И.** Расчет нижнего бьефа за водосбросными сооружениями на нескальных основаниях. Киев: Наукова думка, 1973. 290 с.
4. **Вызго М.С.** Эксплуатационные мероприятия, прогнозы и способы уменьшения местных размывов за гидротехническими сооружениями. Ташкент: Наука, 1966. 257 с.
5. **Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений:** справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
6. **Грацианский М.Н.** Применение законов изменения количества движения и живых сил при сопряжении потока с нижним бьефом // Строительство и архитектура. 1959. № 10. С. 44–58.
7. **Грицук А.В.** Механизм и теория прыжка потока жидкости. М.: Сельхозгиз, 1932. 38 с.
8. **Дмитриев А.Ф., Хлапук Н.Н.** Исследование режимов незатопленного и затопленного донного гидравлического прыжка // Гидравлика и гидротехника. 1975. № 2. С. 8–15.
9. **Кузнецов С.К.** Теория и гидравлические расчеты нижнего бьефа. Львов: Вища школа, 1983. 172 с.
10. **Мамедов А.Ш.** Потеря энергии открытого потока в зоне прыжка // Сборник научных трудов по механике АзИСУ. 1999. № 9. С. 237–245.
11. **Мамедов А.Ш.** Гидравлический прыжок // Аграрная наука Азербайджана. 2007. № 1–3. С. 191–192.
12. **Мамедов А.Ш.** Потеря напора в гидравлическом прыжке // Водоснабжение, водоотведение, гидротехника, инженерная гидрогеоэкология: сборник тезисов докладов. М., 2004. С. 167–168.
13. **Петров Г.А.** Гидравлика переменной массы. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1964. 224 с.
14. **Руссо Г.А.** О вихревых движениях в жидкости // Труды Гидропроекта. 1966. № 13. С. 218–303.

15. **Руссо Г.А., Лятхер В.М.** Гидродинамические нагрузки на элементы гидротехнических конструкций // Труды координационных совещаний по гидротехнике. 1966. Вып. 28. С. 5–23.
16. **Хапаева А.К.** Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне как пристенная струя // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1970. Т. 92. С. 234–245.
17. **Чертоусов М.Д.** Гидравлика: специальный курс. Л.: М.: Госэнергоиздат, 1949. 407 с.
18. **Razvan E.** Studii asupra disiparii energiei cu aplicare la baraje. Bucuresti: Institutul de Studii si Cercetari Hidrotehnice, 1969. 412 p.
19. **Cruise J.F., Sherif M.M., Singh V.P.** Elementary hydraulics. Toronto: Thomson, 2007. 560 p.
20. **Novak P., Moffat A.I.B., Nalluri C., Narayanan R.** Hydraulic structures. London: Ciria, 1992. 532 p.
21. **Resh F.J., Leutheusser H.J.** Mesures des tensions de reynolds dans le ressaut hydraulique // Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques. 1972. Vol. 10. № 4. P. 409–429.
22. **Resh F.J., Leutheusser H.J., Coantic M.** Etude de la structure cinematique et dynamique du ressaut hydraulique // Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques. 1976. Vol. 14. № 4. P. 293–319.
23. **Vischer D.L., Hager W.H.** Energy dissipators. Rotterdam, 1995. 181 p.
24. **Hager W.H., Bremen R.** Classical hydraulic jump: sequent depths. Le ressaut hydraulique classique: etude des hauteurs conjuguees // Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques. 1989. Vol. 27. № 5. P. 565–586.

REFERENCES

1. Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I. Hydraulics. Moscow: Leningrad: Energiya; 1964. 351 p. (In Russ).
2. Akhutin D.A. On determining some parameters of a perfect hydraulic jump. *Trudy Gidroproyekt – Works of the Hydroproject*. 1963;10:323-327. (In Russ).
3. Belyashevsky N.N., Pivovarov N.G., Kalantyrenko I.I. Calculation of the downstream for spillway structures on non-rock bases. Kiev: Naukova dumka; 1973. 290 p. (In Russ).
4. Vyzgo M.S. Operational measures, forecasts and ways to reduce local wash-outs behind hydraulic structures. Tashkent: Nauka; 1966. 257 p. (In Russ).
5. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures: reference manual. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 624 p. (In Russ).
6. Gratsiansky M.N. Application of the laws of change in the amount of motion and living forces when the flow is coupled with the downstream. *Stroitel'stvo i arkhitektura – Construction and architecture*. 1959;10:44-58. (In Russ).
7. Gritsuk A.V. Mechanism and theory of fluid flow jump. Moscow: Selkolkhozgiz; 1932. 38 p. (In Russ).
8. Dmitriev A.F., Khlapak N.N. Investigation of the modes of non-flooded and submerged bottom hydraulic jump. *Gidravlika i gidrotehnika – Hydraulics and hydraulic engineering*. 1975;2: 8-15. (In Russ).
9. Kuznetsov S.K. Theory and hydraulic calculations of the downstream. Lviv: Vishcha shkola; 1983. 172 p. (In Russ).
10. Mamedov A.Sh. Loss of open flow energy in the jump zone. *Sbornik nauchnykh trudov po mekhanike AzISU – Collection of scientific papers on mechanics of AzISU*. 1999;9:237-245. (In Russ).
11. Mamedov A.Sh. Hydraulic jump. *Agrarnaya nauka Azerbaydzhan – Agrarian science of Azerbaijan*. 2007;1-3: 191-192. (In Russ).

12. Mamedov A.Sh. Loss of pressure in a hydraulic jump. *Water supply, drainage, hydraulic engineering, engineering hydrogeology*: collection of abstracts. Moscow, 2004. P. 167-168. (In Russ).
13. Petrov G.A. Hydraulics of variable mass. Kharkiv: Publishing House of Kharkiv University; 1964. 224 p. (In Russ).
14. Russo G.A. On vortex motions in a liquid. *Trudy Gidroyekta – Works of the Hydroproject*. 1966;13:218-303. (In Russ).
15. Russo G.A., Lyather V.M. Hydrodynamic loads on elements of hydraulic structures. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike – Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering*. 1966;28:5-23. (In Russ).
16. Hapaeva A.K. Hydraulic jump on a smooth and rough bottom as a wall jet. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 1970; 92:234-245. (In Russ).
17. Chertousov M.D. Hydraulics: special course. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat; 1949. 407 p. (In Russ).
18. Razvan E. Studii asupra dispararii energiei cu aplicare la baraje. Bucuresti: Institutul de Studii si Cercetari Hidrotehnice; 1969. 412 p.
19. Cruise J.F., Sherif M.M., Singh V.P. Elementary hydraulics. Toronto: Thomson; 2007. 560 p.
20. Novak P., Moffat A.I.B., Nalluri C., Narayanan R. Hydraulic structures. London: Ciria; 1992. 532 p.
21. Resh F.J., Leutheusser H.J. Mesures des tensions de Reynolds dans le ressaut hydraulique. *Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques*. 1972;10(4):409-429.
22. Resh F.J., Leutheusser H.J., Coantic M. Etude de la structure cinématique et dynamique du ressaut hydraulique. *Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques*. 1976;14(4):293-319.
23. Vischer D.L., Hager W.H. Energy dissipators. Rotterdam; 1995. 181 p.
24. Hager W.H., Bremen R. Classical hydraulic jump: sequent depths. Le ressaut hydraulique classique: étude des hauteurs conjuguées. *Journal of hydraulic research de recherches hydrauliques*. 1989;27(5):565-586.

Информация об авторе

А.Ш. Мамедов – доктор техн. наук, заслуженный инженер Азербайджана.

Information about the authors

A.Sh. Mamedov – Dr. Sci. (Techn.), Honored Engineer of Azerbaijan.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 16.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 16.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 622.235:626/627

ВОЗДЕЙСТВИЕ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА РАСПОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Дмитрий Вадимович Григорьев¹, Павел Андреевич Гарибин²

¹ АО «Объединенная энергостроительная корпорация», Красноярск, Россия, grigdima@mail.ru

² Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия, Garibin@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена наиболее распространенная конструкция распорного гидротехнического сооружения. Указаны проблемы динамического воздействия на распорные сооружения и определены наиболее уязвимые элементы конструкции. Проанализированы примеры разрушения распорных гидротехнических сооружений при обрыве анкерных тяг с публикацией фотоснимков. Приведено описание работ по анализу динамического воздействия на трубошпунтовую стену котлована при проведении буровзрывных работ.

Ключевые слова: буровзрывные работы, тонкая подпорная стенка, динамическое воздействие, натурные испытания

Для цитирования: Григорьев Д.В., Гарибин П.А. Воздействие буровзрывных работ на распорные сооружения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 83–91.

Original article

IMPACT OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS ON SPACER STRUCTURES

Dmitriy V. Grigoriev¹, Pavel A. Garibin²

¹ JSC «United Energy Corporation», Krasnoyarsk, Russia, grigdima@mail.ru

² Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet, Saint Petersburg, Russia, Garibin@mail.ru

Abstract. The most common design of a spacer hydraulic structure is considered. The problems of dynamic impact on spacer structures and the most vulnerable structural elements are identified. Examples of the destruction of spacer hydraulic structures in case of breakage of anchor rods with the publication of photographs are analyzed. The description of the work on the analysis of the dynamic impact on the pipe-pile wall of the pit during drilling and blasting operations is given.

Keywords: drilling and blasting operations, thin retaining wall, dynamic impact, field tests

For citation: Grigoriev D.V., Garibin P.A. Impact of drilling and blasting operations on spacer structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:83-91. (In Russ.).

Распорные сооружения, или тонкие подпорные стенки (больверки), – один из самых распространенных видов оградительных сооружений в Российской Федерации [1]. Чаще всего они выполнены из металлического шпунта с анкерным исполнением. Основной задачей таких сооружений является восприятие давления грунта засыпки, а также нагрузок на территории. Схемы типовых распорных оградительных сооружений приведены на рис. 1.

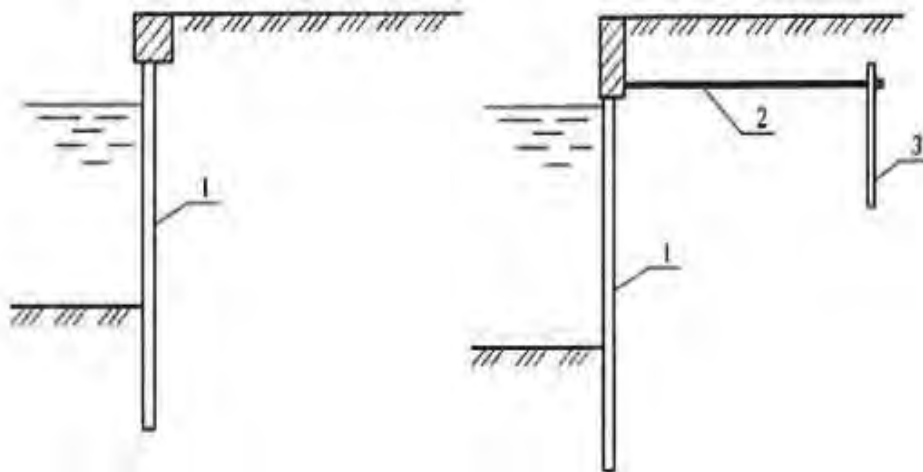


Рис. 1. Типовая схема распорного сооружения:
1 – шпунтовая стенка; 2 – анкерная тяга; 3 – анкерная стенка

В современном мире распорные сооружения получили широчайшее распространение. Наиболее часто их применяют при строительстве причальных, берегоукрепительных морских или речных сооружений.

Так, причальные сооружения на территории основных грузовых терминалов и портов в Российской Федерации как раз выполнены в виде тонких подпорных стен.

В то же время развитие судостроительной отрасли и последовавшее за ним увеличение габаритов и осадок морских грузовых судов привело к необходимости реконструкции существующих распорных портовых сооружений, а также к необходимости проведения дополнительных дноуглубительных работ в акваториях и подходных каналах к ним.

Зачастую выполнение дноуглубительных работ осложняется наличием коренных монолитных скальных пород выше проектных отметок дна. В качестве примеров подобных ситуаций можно привести реконструкцию причалов в порту Высоцк и работы по строительству сухих доков в п. Белокаменка Мурманской области, где для проведения дноуглубления необходимо было применять буровзрывные работы по рыхлению скального грунта.

При проведении подобных буровзрывных работ особое внимание стоит уделить динамическому воздействию на находящиеся в непосредственной близости распорные гидротехнические сооружения. Несмотря на высокие прочностные характеристики анкерных тяг и пластичность стальных шпунтовых стенок, распорные сооружения в полной мере воспринимают динамическое боковое давление грунта. В результате динамического воздействия при достаточных запасах несущей способности распорные сооружения терпят несущественные повреждения. Однако в случае недостатка несущей способности повреждения могут быть значительны, вплоть до полного разрушения конструкции (рис. 2).

Вопрос влияния динамического воздействия на завершённые и строящиеся сооружения регулярно рассматривается инженерами-строителями и специалистами-взрывотехниками. Так, анализ воздействия буровзрыв-

ных работ на окружающую застройку был приведен в научной статье П.В. Меньшикова, С.С. Таранжина, А.С. Флягина [2].

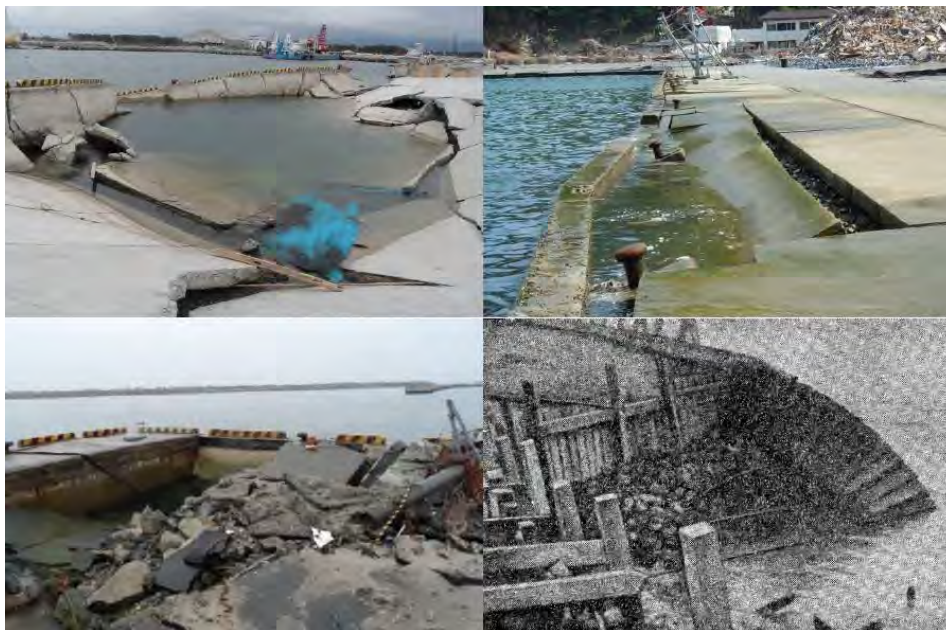


Рис. 2. Примеры разрушения распорных портовых гидротехнических сооружений

В 2017 г. был опубликован научный доклад Н.Т. Ниязова и Б.Х. Рахаткулова [3] о сейсмическом воздействии на здания и сооружения при ведении взрывных работ.

В части гидротехнического строительства особое внимание стоит уделить докладу В.А. Седнева и П.А. Аляева [4] на тему технологии производства взрывных работ при заторах льда вблизи крупных речных инженерных сооружений, а также статье Н.Л. Рогалевой и Н.В. Волчковой [5] о проблемах дноуглубления и развития портовой инфраструктуры Камчатского края.

Принимая во внимание необходимость масштабных работ по реконструкции портовых мощностей Российской Федерации, а также стесненность акваторий существующих морских портов, вопрос динамического воздействия буровзрывных работ на располагающиеся в непосредственной близости распорные гидротехнические сооружения в настоящее время как нельзя актуален.

В качестве детального примера динамического воздействия буровзрывных работ на распорное гидротехническое сооружение рассмотрим строительство подпорной стены из трубошпунтовых свай с многоярусной анкерровкой грунтовыми анкерами.

Отметка верха: +4,00 м в БС-77. Отметка дна: -16,20 м в БС-77.

Трубошпунтовые сваи представлены в виде трубы $\text{Ø } 1020 \times 16$ мм с замком, класс стали С345, марка 09Г2С. Устойчивость подпорной стенки обеспечивается защемлением нижнего конца трубошпунта в скальный массив на глубину не менее 3,0 м от отметки -16,20 м в БС-77.

Многоярусная анкеровка представлена грунтовыми анкерами на отметках (БС-77): 0,00 м; -2,00 м; -4,00 м; -6,00 м; -8,00 м; -10,00 м; -12,5 м; -15,00 м. Всего установлено 8 ярусов. Грунтовые анкера объединены между собой горизонтальными распределительными поясами из сдвоенных швеллеров № 40П, класс стали С345, марка 09Г2С.

Схема сооружения представлена на рис. 3.

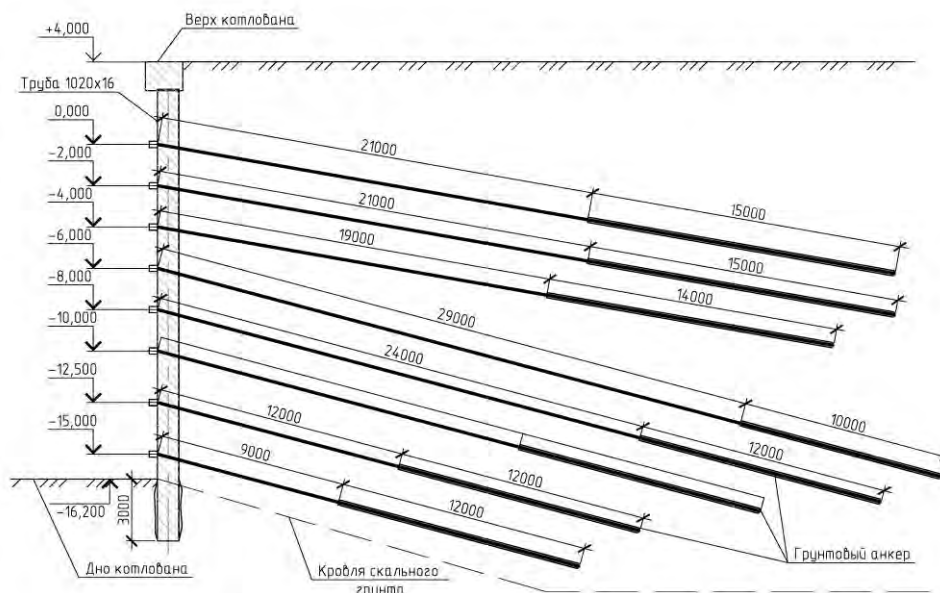


Рис. 3. Схема распорного сооружения с многоярусной анкеровкой

В процессе строительно-монтажных работ, проводимых на прилегающей к сооружению территории, были проведены два взрыва: на расстоянии 120 м (15.02.2021) и 870 м (19.02.2021).

Для оценки динамического воздействия техногенного характера применялась методика в соответствии с ГОСТ [6].

С целью определения частот и форм собственных колебаний трубошпунтовой стены были установлены (рис. 4) восемь высокочувствительных акселерометров ВС 130 с номинальным диапазоном рабочих частот от 0,1 до 100 Гц и чувствительностью 30 мВ/г. Частота дискретизации составляла не менее 5000 Гц.

Благодаря акселерометрам можно определить основные динамические свойства конструкции и понять, как она будет реагировать на динамическое воздействие.

Установка производилась в соответствии с требованиями ГОСТ [7]. Крепление акселерометров к трубошпунту выполнено жестким и не допускает угловых колебаний. Акселерометры объединены между собой в единую сеть.

До начала измерений определяется фоновый шум, под которым понимают показания акселерометра в момент отсутствия исследуемого динамического воздействия. Если уровень измеряемой вибрации превышает

фоновый шум менее чем на 5 дБ, оценка воздействия вибрации на конструкцию здания может быть осуществлена только после соответствующей коррекции результатов измерений.



Рис. 4. Установка сети акселерометров

После завершения работ по установке и наладке сети был произведен тест-удар – однократное импульсное воздействие. Тест-удар производился при помощи ручного молота со встроенным динамометром. При этом температура воздуха $t = -13\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность $\varphi = 85\%$, атмосферное давление $p = 740\text{ мм рт. ст.}$

В данном случае в теле конструкции наблюдались собственные (свободные) затухающие колебания (моды).

На рис. 5 представлены значения силы удара молотом непосредственно по трубошпунту для точки № 1 от начала времени записи и отклик конструкции – ускорения колебаний от начала времени записи. Аналогичные измерения были проведены для всех точек. Общее количество измерений – 124.

Анализ этих колебаний проводился на основании автоспектральной функции входного воздействия (приложенной силы) и спектрального анализа отклика конструкции (зарегистрированных ускорений).

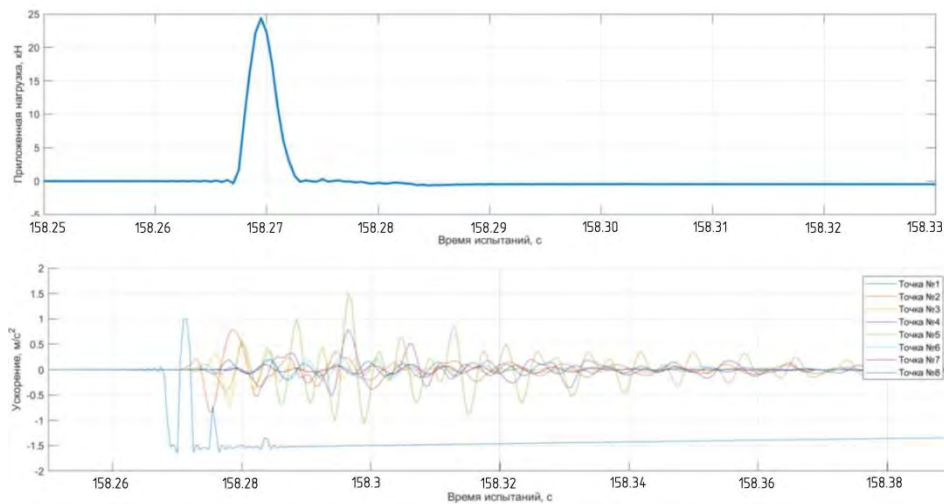


Рис. 5. Сила удара и анализ колебаний точек 1–8

Одновременно с испытанием элементов стены сооружения для измерения вибрации на дневной поверхности грунта, на территории в непосредственной близости от распорного сооружения были установлены высокочувствительные сейсмические регистраторы с номинальным диапазоном рабочих частот от 1 до 400 Гц и чувствительностью 250 В/(м/с). Частота дискретизации составляла не менее 1000 Гц. Установка датчиков производилась в соответствии с требованиями ГОСТ [7]. При этом в момент измерения температура воздуха $t = -13$ °С, относительная влажность $\varphi = 85$ %, атмосферное давление $p = 740$ мм рт. ст.

Во время измерений в режиме реального времени для анализа частотного состава сигнала скорости реализуется преобразование Фурье [8]. Полученный спектр сравнивается с допуском по ГОСТ [6] в зависимости от категории здания.

По результатам анализа делается вывод о допустимости имеющихся вибраций для безопасной эксплуатации сооружения. При наличии превышающих требования ГОСТ [6] вибрацией, возникающих вследствие проведения буровзрывных работ, выдается рекомендация о прекращении выполнения данных работ или об изменении режима их проведения.

Измерения, проведенные во время проводимых буровзрывных работ, показали:

на расстоянии 120 м (15.02.2021) пиковые значения виброскорости колебаний составляют 0,695 мм/с (по оси X); 0,608 мм/с (по оси Y); 0,112 мм/с (по оси Z).

На расстоянии 870 м (19.02.2021) пиковые значения виброскорости колебаний составляют 0,034 мм/с (по оси X); 0,069 мм/с (по оси Y); 0,019 мм/с (по оси Z).

По результатам выполненных измерений пиковые значения виброскорости не превышают требований ГОСТ [6].

Однако для наиболее полной оценки опасности вибрационного воздействия на здания необходимо знать частоту доминирующей составляющей исследуемой вибрации.

Частоту доминирующей составляющей определяют в соответствии с требованиями ГОСТ [6]. На графике зависимости сигнала скорости от времени (рис. 6) выделяют область подъема вибрации, где скорость имеет максимальное значение (если сигнал вибрации не имеет ярко выраженного импульсного характера, т.е. на всем периоде измерений уровень вибрации изменяется незначительно, то весь период измерений рассматривают как одну область). Применяя преобразование Фурье, определяют частотный состав вибрации для сигнала в выделенной области и находят доминирующие частотные составляющие этого сигнала (одну или несколько). Полученные значения составляющих доминирующих частот используют при оценке степени вибрации [6].

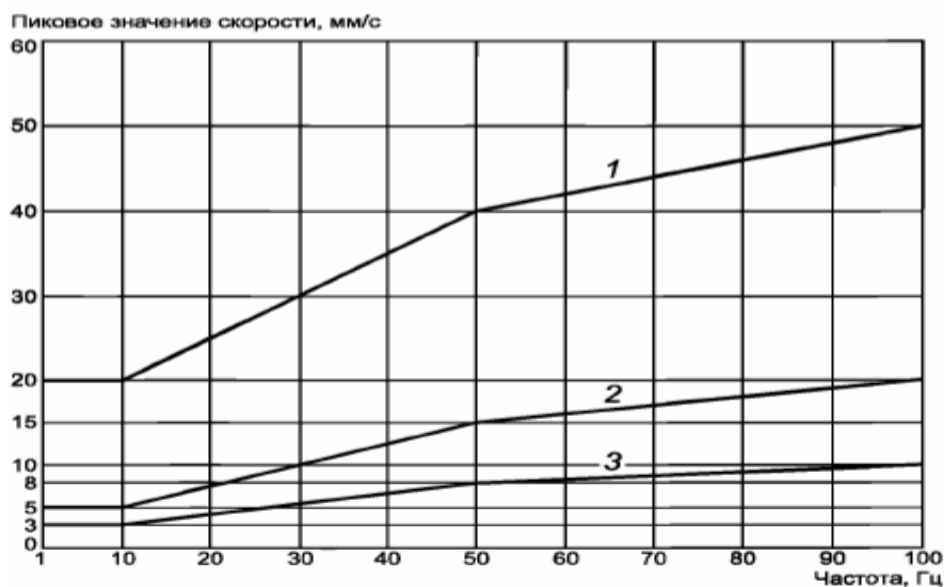


Рис. 6. Предельное значение скорости, измеренной в основании сооружения:
1 – здания категории 1; 2 – здания категории 2; 3 – здания категории 3

Заключение

Распорные гидротехнические сооружения и их элементы имеют существенные риски повреждения и полного разрушения при проведении прилегающих буровзрывных работ.

На примере вертикальной трубошпунтовой стены выполнено измерение (возбуждение и регистрация колебаний) динамических характеристик конструкции трубошпунтовой стены сооружения.

Произведен анализ собственных (свободных) затухающих колебаний трубошпунтовых элементов.

Проведены натурные измерения спектров отклика грунта в точках измерений при проведении прилегающих буровзрывных работ.

Результаты натурных испытаний в случае превышения допустимых значений позволяют выполнить корректировку (верификацию) численной расчетной модели сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кульмач П.П., Трутаев А.Н., Хаперский В.В.** Морские гидротехнические сооружения. Ч. 2: Причальные и берегоукрепительные сооружения. Л.: ЛВВИСКУ, 1975. 478 с.
2. **Меньшиков П.В., Таранжин С.С., Флягин А.С.** Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на Карагайском карьере в стесненных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 383–398. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398.
3. **Ниязов Н.Т., Рахаткулов Б.Х.** Сейсмическое воздействие на здания, сооружения и радиус влияния при ведении взрывных работ // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей XV международной научно-практической конференции. Ч. 1. СПб., 2017. С. 63–65.
4. **Седнев В.А., Аляев П.А.** Технологии производства взрывных работ при заторах льда вблизи крупных речных инженерных сооружений // Материалы 5-й международной научно-практической конференции. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. С. 168–169.
5. **Рогалева Н.Л., Волчкова Н.В.,** Проблемы развития портовой инфраструктуры Камчатского края // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами: материалы 7-й международной научно-практической конференции. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. С. 113–115.
6. **ГОСТ Р 52892-2007.** Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064161>.
7. **ГОСТ ИСО 5348-2002.** Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200054032>.
8. **Зорич В.А.** Математический анализ. М.: Наука, 1984. 544 с.

REFERENCES

1. Kulmach P.P., Tutaev A.N., Khapersky V.V. Marine hydraulic structures. Part 2: Berthing and shore protection structures. Leningrad: LVVISKU; 1975. 478 p. (In Russ.).
2. Menshikov P.V., Taranzhin S.S., Flyagin A.S. Research of seismic influence on buildings and structures of Satka town while exploding explosive works on the Karagayskiy career in constrained conditions. *MIAB. Mining information and analytical bulletin*. 2020;(3-1):383-398. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398. (In Russ.).
3. Niyazov N.T., Rakhatkulov B.Kh. Seismic effect on the building, construction and the radius of influence of blasting works. *WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS*: collection of articles of the XV International scientific conference. Part 1. Saint Petersburg; 2017. P. 63-65. (In Russ.).
4. Sednev V.A., Aleev P.A. Technologies of production of blasting operations at ice jams near large river engineering structures. *Proceedings of the 5th International Scientific and practical conference*. Moscow: Institute of Control Sciences RAS; 2011. P. 168–169. (In Russ.).
5. Rogaleva N.L., Volchkova N.V., Problems of development of the port infrastructure of the Kamchatka Territory. *Development of theory and practice of management of social and economic systems*: proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatSTU; 2018. P. 113–115. (In Russ.).

6. GOST R 52892-2007. Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its effects on structure URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064161>. (In Russ.).
7. GOST ISO 5348-2002. Vibration and shock. Mechanical mounting of accelerometers. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200054032>. (In Russ.).
8. Zorich V.A. Mathematical analysis. Moscow: Nauka; 1984. 544 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Д.В. Григорьев – аспирант, заместитель руководителя филиала АО «ОЭК»;
П.А. Гарибин – доктор техн. наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений.

Information about the authors

D.V. Grigoriev – postgraduate student, Deputy Head of the branch of JSC «United Power Company»;

P.A. Garibin – Dr. Sci. (Techn.), Professor of the Department of Hydraulic Structures.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; одобрена после рецензирования 18.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 11.04.2023; approved after reviewing 18.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 624.138.23:626/627

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНОЦЕМЕНТОБЕТОНА

Алексей Сергеевич Величко

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

Аннотация. Выполнен комплексный анализ существующих методов определения прочностных и деформационных характеристик глиноцементобетона, используемого в качестве материала противифльтрационного устройства гидротехнических сооружений. На основании сопоставления результатов численного моделирования с полученными экспериментальными данными выбрана методика, дающая наиболее корректный результат.

Ключевые слова: *глиноцементобетон, упругость, пластичность, лабораторный эксперимент, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование*

Для цитирования: Величко А.С. Анализ методов лабораторных определений прочностных и деформационных характеристик глиноцементобетона // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 92–102.

Original article

ANALYSIS OF METHODS FOR LABORATORY DETERMINATION OF STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CLAY CEMENT CONCRETE

Aleksey S. Velichko

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

Abstract. A comprehensive analysis of existing methods for determination of the strength and deformation characteristics of clay cement concrete was performed. This concrete used as a material for the anti-filtration system of hydraulic constructions. The method that gives the most correct result was chosen based on the comparison of the results of numerical modeling with the experimental data obtained.

Keywords: *clay cement concrete, elasticity, plasticity, laboratory experiment, stress-strain state, finite element modeling*

For citation: Velichko A.S. Analysis of methods for laboratory determination of strength and deformation characteristics of clay cement concrete. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:92-102. (In Russ.).

В настоящее время в качестве материала для создания противифльтрационных устройств находят применение глиноцементобетона [1–3]. Глиноцементобетон (ГЦБ) хорошо зарекомендовал себя при создании противифльтрационных устройств различного назначения, возводимых способом «стена в грунте», которые сильно различаются по условиям работы.

В основании сооружений. Условия работы противифльтрационных устройств в основании сооружений заключаются в восприятии давления

фильтрационных вод, собственного веса, веса расположенного на основании сооружения.

При ремонтах гидротехнических сооружений. В таких условиях особенностью работы противофильтрационной «стены в грунте» является то, что стена не воспринимает нагрузки от веса плотины, при создании стены в действующем гидротехническом сооружении (ГТС) происходит перераспределение сил давления верхнего бьефа.

Как основное противофильтрационное устройство гидротехнического сооружения. Такие «стены в грунте» могут возводиться сразу на всю высоту или в несколько ярусов по мере возведения тела плотины. В этом случае «стена в грунте» воспринимает гидростатическое давление верхнего бьефа и собственный вес, на нее может передаваться вес плотины.

Рецептура глиноцементобетона включает следующие основные компоненты: цемент, бентонитовую глину, воду, песок, щебень. Для улучшения прочностных и деформационных характеристик ГЦБ в основную рецептуру включают полипропиленовую фибру и пластификаторы (например, лигносульфонат). Применение пластификаторов позволяет управлять сроками схватывания глиноцементобетонной смеси для обеспечения ее удобоукладываемости. Отличительной особенностью глиноцементобетона от обычных бетонов является наличие в составе бентонитовой глины, которая существенно влияет как на сроки и характер твердения смеси, так и на свойства, характеризующие материал.

Несмотря на то, что в течение длительного времени из глиноцементобетона возводят противофильтрационные устройства, работающие в разных условиях, в настоящее время отсутствует общепринятая методика оценки прочностных и деформационных характеристик ГЦБ, что влияет на достоверность прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «противофильтрационное устройство – ГТС» [3]. Вопросы идентификации прочностных и деформационных характеристик ГЦБ возникали не раз, например, при проектировании противофильтрационных устройств Гоцатлинской (2011 г.) и Нижне-Бурейской ГЭС (2015–2017 г.); перемычек сухого дока Центра строительства крупнотоннажных морских сооружений (2018 г.); противофильтрационного устройства первичной дамбы горно-металлургического комбината «Удокан» (2021 г.).

На практике проектировщик выбирает ту методику определения характеристик, которая является удобной для конкретных условий возведения сооружения. большей частью параметры прочности и деформирования глиноцементобетона принимаются по справочным данным, без их определения путем лабораторных и полевых испытаний.

Следует отметить, что в справочных и иных открытых источниках, представлен значительный разброс публикуемых данных о характеристиках глиноцементобетона [4]. Например, по одним данным модуль деформации находится в диапазоне от 700 до 5000 МПа, в то время как по другим его значение находится в пределах от 63 до 88 МПа. Как видно, данные значительно отличаются.

Решение данного вопроса заключается в проведении прямых лабораторных испытаний образцов глиноцементобетона одного компонентного состава по используемым в настоящее время методикам, с их верификацией в сопоставлении с численными методами.

Преимуществом глиноцементобетона является его пластичность (выраженно проявляются нелинейные свойства материала, физическая нелинейность) по сравнению с обычными бетонами. При этом прочностные и деформационные свойства глиноцементобетонов являются сложными и до конца не изученными [5–7].

В мировой инженерно-научной практике при изучении поведения бетонных конструкций и других каменных материалов в первую очередь опираются на работы, основанные на теориях Д.Ч. Друкера, В. Прагера, Ш. Кулона, К. Мора [8]. Преимуществом этих теорий прочности является то, что они позволяют отразить свойства хрупкопластичных материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию. Помимо несущей способности практически всегда важно знать напряженно-деформированное состояние конструкции в стадии эксплуатации. Как правило, существующие методики определения напряжений и деформаций опираются на теорию сопротивления материалов и классическую теорию упругости. В связи с этим для определения деформационных характеристик глиноцементобетона становится необходимым использование методики, которая сможет учитывать его характерные особенности как физически нелинейного материала [8].

Целью исследования являлось сравнение используемых в настоящее время лабораторных методик по определению деформационных характеристик глиноцементобетона и выбор методики, по которой полученные результаты дают наилучшее совпадение с данными, полученными при численном моделировании. Для достижения заявленной цели решались следующие задачи:

- а) обзор имеющихся методик испытаний глиноцементобетона;
- б) испытания образцов глиноцементобетона согласно выбранным методикам по разработанному плану эксперимента;
- в) обработка и анализ результатов лабораторных испытаний;
- г) выполнение численного моделирования, повторяющего условия лабораторных экспериментов;
- д) сопоставление результатов расчетов с результатами лабораторных экспериментов.

Лабораторные испытания по определению деформационных свойств были выполнены по двум государственным стандартам Российской Федерации:

ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»;

ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

Используемые методики имеют следующие отличия:

испытания проводятся в разных напряженных состояниях (ГОСТ 24452-80 – одноосное сжатие; ГОСТ 12248-2010 – неравномерное трехосное сжатие);

разное расположение датчиков по измерению вертикальных деформаций (ГОСТ 24452-80 – деформации определяются только в центральной части испытуемого образца, исключая участки смятия сверху и снизу; ГОСТ 12248-2010 – определяются деформации всего образца);

разные режимы приложения нагрузки на испытываемые образцы (ГОСТ 24452-80 – статическое нагружение; ГОСТ 12248-2010 – кинематическое нагружение).

На рис. 1 представлен внешний вид образцов, которые использовались в исследованиях по определению деформационных характеристик.

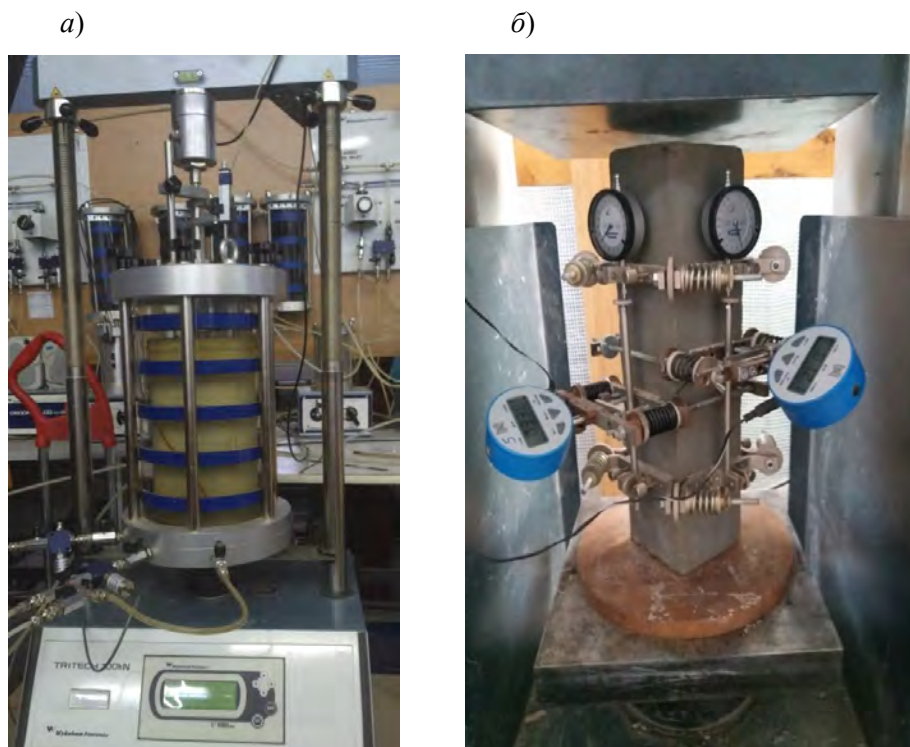


Рис. 1. Внешний вид образцов в приборах по определению деформационных характеристик:
a – образец в камере трехосного сжатия WF – 150 с датчиками поперечных деформаций, индикатором перемещений; *б* – образец с приспособлениями и индикаторами, используемыми для измерения продольных и поперечных деформаций

Образцы глиноцементобетона были изготовлены в соответствии с рекомендациями, которые приведены в соответствующих государственных стандартах (ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 24452-80, ГОСТ 12248-2010).

В испытаниях использованы три типа образцов:

кубики $100 \times 100 \times 100$ мм – для определения прочности бетона по ГОСТ 10180-2012 в условиях одноосного сжатия;

призмы $100 \times 100 \times 400$ мм – для определения деформационных характеристик бетона по ГОСТ 24452-80 в условиях одноосного сжатия;

цилиндры диаметром 150 мм и высотой 300 мм – для определения деформационных характеристик грунтов по ГОСТ 12248-2010 в условиях трехосного сжатия.

Все образцы глиноцементобетона имеют конкретный компонентный состав, соответствующий тому, который применялся для создания противофильтрационного устройства – перемычки сухого дока на специализированной верфи Центра строительства крупнотоннажных морских сооруже-

ний (ЦСКМС) у села Белокаменка Мурманской области. Противофильтрационное устройство имеет следующие конструктивные особенности: длина – около 315 м; глубина – от 21,0 до 33,0 м, обусловлена отметкой залегания скальных пород с заглублением 1,0 м; противофильтрационное устройство выполнено способом «стена в грунте» из буросекущихся свай Ø 1500 и 1200 мм с шагом 1100 и 800 мм соответственно.

Образцы изготовлены в количестве 6 штук для каждого типа. Испытания проведены по прошествии 28 суток твердения в водонасыщенном песке, соленость воды – 20,0 промилле (табл. 1).

Таблица 1

Перечень проведенных испытаний

Тип образца	Срок твердения	Количество изготовленных образцов	Условия твердения	Назначение
Кубики 100×100×100 мм	28	6	Водонасыщенный песок (соленость воды – 20 промилле)	Прочность по ГОСТ 10180-2012
Призмы 100×100×400 мм	28	6		Деформационные характеристики по ГОСТ 24452-80
Цилиндры диаметром 150 мм и высотой 300 мм	28	6		Деформационные характеристики по ГОСТ 12248-2010
Общее количество образцов		18		

В настоящее время многие инженерные задачи по расчетному обоснованию противофильтрационных диафрагм связаны с численным моделированием, которое позволяет выполнять более точный анализ пространственного напряженно-деформированного состояния противофильтрационных устройств даже в условиях экстремальных нагрузок [9–13]. При выполнении данной работы численное моделирование использовалось для более полного понимания основных закономерностей поведения глиноцементобетона и того, каким образом задаются и на что влияют характеристики моделей, как изменяется напряженно-деформированное состояние конструкции из глиноцементобетона при использовании в численной модели результатов определения деформационных характеристик, полученных по разным методикам.

Для выполнения сравнительного анализа по оценке применимости методик, используемых для определения деформационных характеристик глиноцементобетона, были выполнены виртуальные испытания материала.

Объект моделирования представляет собой цилиндр, имеющий характеристики прочности и деформируемости глиноцементобетона, со следующими размерами: диаметр – 150 мм, высота – 300 мм.

Численные эксперименты проводились с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS 19.2. В качестве модели ма-

териалов принята модель Drucker-Prager Concrete. Для моделирования цилиндра были выбраны объемные элементы SOLID185. Конечно-элементная модель показана на рис. 2.

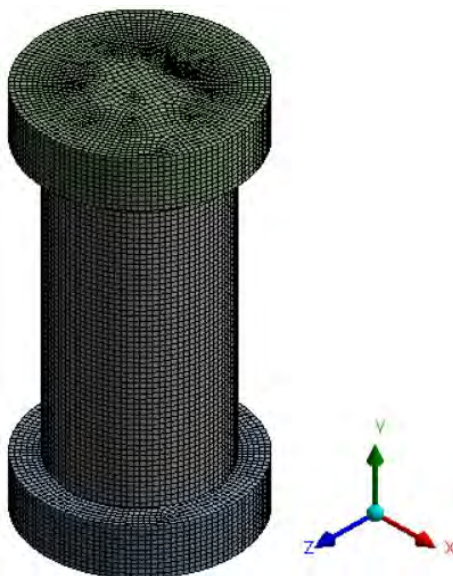


Рис. 2. Конечно-элементная модель

Для максимального воспроизведения реальных условий испытаний в расчетную модель снизу и сверху добавлены пластины с характеристиками металла, аналогично используемым в лабораторных экспериментах. В качестве граничных условий у нижней пластины стоит запрет перемещений по всем направлениям. На верхнюю пластину прикладывается монотонно возрастающая нагрузка до момента разрушения, согласно данным лабораторных исследований. В рамках виртуальных испытаний, повторяющих испытания трехосного сжатия, в качестве нагрузки на цилиндр было добавлено боковое давление аналогично тому, как это происходит при проведении испытаний в лабораторных условиях. Критерием начала разрушения в модели Drucker-Prager Concrete является появление пластических деформаций глиноцементобетонного цилиндра. Критерием окончания расчета для математического аппарата является достижение заданного значения прикладываемой нагрузки.

Согласно методикам (ГОСТ), изготовлены образцы и проведены лабораторные испытания глиноцементобетона одного и того же компонентного состава. Выполнен анализ полученных данных.

Проведенные лабораторные эксперименты выявили следующее: ГЦБ одного и того же компонентного состава характеризуется разными деформационными характеристиками (отличаются на 1 порядок), полученными по разным методикам (ГОСТ 12248-2010, ГОСТ 24452-80). Такое значительное отличие полученных результатов неправдоподобно.

На рис. 3 представлен внешний вид образцов глиноцементобетона после определения деформационных характеристик.

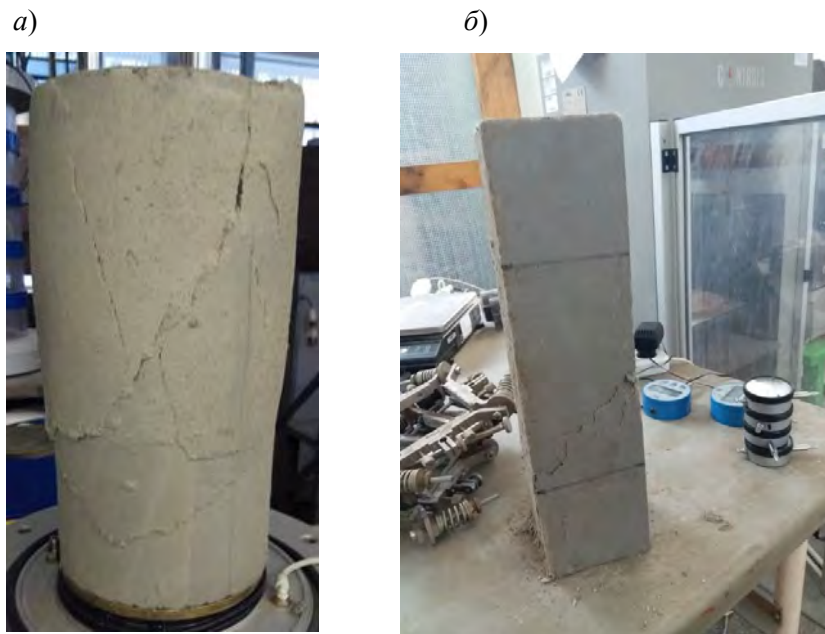


Рис. 3. Внешний вид образцов глиноцементобетона после определения деформационных характеристик:
a – образец после испытаний по ГОСТ 12248-2010;
б – образец после испытаний по ГОСТ 24452-80

Видимо, наибольший вклад в различие результатов определения деформационных характеристик глиноцементобетона при испытаниях по разным методикам вносит режим нагружения образцов. При статическом режиме нагружения материал не успевает проявить свои пластические свойства (деформируется упруго). По результатам лабораторных испытаний, различие относительных продольных деформаций глиноцементобетона при использовании указанных методик составляет один порядок. В случае применения ГОСТ 12248-2010 значения регистрируемых относительных деформаций имеет большие значения, чем в случае применения ГОСТ 24452-80.

После проведения лабораторных исследований было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния образца глиноцементобетона с достижением нагрузки, при которой происходит его разрушение.

При моделировании в качестве деформационных характеристик глиноцементобетона применялись значения модуля деформации, как полученные по ГОСТ 12248-2010 (расчетные случаи 1, 2), так и по ГОСТ 24452-80 (расчетные случаи 3, 4). В табл. 2 представлен перечень исходных данных и расчетных случаев, используемых при моделировании.

По результатам моделирования были получены диаграммы сжатия глиноцементобетона, зависимости сжимающих напряжений от относительных деформаций ($\sigma - \epsilon$), которые сравнивались с диаграммами, полученными по результатам лабораторных испытаний.

В табл. 3 приведены параметры разрушения образцов для всех расчетных случаев.

Таблица 2

Перечень исходных данных и список расчетных случаев

Название расчетного случая	Характеристики глиноцементобетона				
	плотность, кг/м ³	модуль деформации, МПа	коэффициент Пуассона	прочность на одноосное сжатие, МПа	прочность на одноосное растяжение, МПа
Расчетный случай 1: модуль деформации 240 МПа; условия испытаний – одноосное сжатие	2070	240	0,3	1,9	0,3
Расчетный случай 2: модуль деформации 240 МПа; условия испытаний – трехосное сжатие					
Расчетный случай 3: модуль деформации 2400 МПа; условия испытаний – одноосное сжатие		2400			
Расчетный случай 4: модуль деформации 2400 МПа; условия испытаний – трехосное сжатие					

Таблица 3

Параметры разрушения образцов глиноцементобетона

Название расчетного случая	Параметры разрушения	
	значение главных напряжений в момент разрушения, МПа	относительные продольные деформации
Расчетный случай 1: модуль деформации 240 МПа; условия испытаний – одноосное сжатие	1,81	0,008
Расчетный случай 2: модуль деформации 240 МПа; условия испытаний – трехосное сжатие	1,90	0,022
Расчетный случай 3: модуль деформации 2400 МПа; условия испытаний – одноосное сжатие	1,77	0,0007
Расчетный случай 4: модуль деформации 2400 МПа; условия испытаний – трехосное сжатие	1,87	0,0015

Результаты при принятом в моделировании значении модуля деформации, равном 240 МПа, согласуются с результатами лабораторных испытаний в условиях трехосного сжатия. Относительная погрешность резуль-

татов расчетов по сравнению с данными лабораторных испытаний составляет 14 %. Следует отметить, что зависимость, соответствующая расчетному случаю 4 (модуль деформации 2400 МПа), не показала совпадения с результатами лабораторных испытаний.

Результаты моделирования разрушения образцов глиноцементобетона в условиях одноосного сжатия также продемонстрировали хорошую повторяемость данных лабораторных испытаний при модуле деформации, равном 240 МПа. Относительная погрешность результатов в этом случае составляет 9 %.

По результатам выполненных испытаний установлено, что в случае всестороннего неравномерного сжатия у глиноцементобетона возникает способность претерпевать значительные пластические деформации. Если же сжатие происходит в одном направлении, то разрушение возникает при малых деформациях. При наличии в глиноцементобетоне больших деформаций наблюдается явление дилатансии – увеличение видимого объема материала, что также характерно и для обычных бетонов.

Таким образом, установлено, что результаты моделирования разрушения глиноцементобетона как в условиях одноосного, так и в условиях трехосного сжатия при деформационных характеристиках, определенных по ГОСТ 12248-2010 (240 МПа), хорошо согласуются с данными лабораторных испытаний.

Использование значения модуля деформации 2400 МПа приведет к существенному занижению прогнозируемых деформаций конструкций противодиффузионных устройств из глиноцементобетона,

Результат выполненных исследований показал, что использование деформационных характеристик, определенных по ГОСТ 12248-2010, дает приемлемое для практики согласование результатов лабораторных и численных экспериментов при прогнозировании напряженно-деформированного состояния конструкций противодиффузионных элементов гидротехнических сооружений.

Заключение

1. Выполнено комплексное исследование по сравнению разных методов лабораторных испытаний по определению прочностных и деформационных характеристик глиноцементобетона, включая использование численного моделирования.

2. Рекомендуется проводить идентификацию деформационных характеристик по ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

3. Использование ГОСТ 24452-80 для определения деформационных характеристик глиноцементобетона является некорректным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глаговский В.Б., Радченко В.Г. Новые тенденции в строительстве грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 2013. № 1. С. 2–8.

2. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>.
3. Орищук Р.Н. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации глиноцементобетонных диафрагм грунтовых плотин, возводимых методом буросекущихся свай // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 287. С. 3–13.
4. Сольский С.В., Легина Е.Е., Орищук Р.Н., Васильева З.Г., Величко А.С. Анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики // Вестник МГСУ. 2016. Т. 10. С. 80–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.80-93.
5. Аргал Э.С., Королев В.М. О некоторых свойствах глиноцементобетона и особенностях работы стены в грунте в теле плотины // Гидротехническое строительство. 2019. № 5. С. 10–19.
6. Hinchberger S., Weck J., Newson T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls // Canadian Geotechnical Journal. 2010. Т. 47. № 4. С. 461–471.
7. Mahboubi A., Ajourloo A. Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression // Cement and concrete research. 2005. Т. 35. № 2. С. 412–419.
8. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974.
9. Сольский С.В., Лопатина М.Г., Орищук Р.Н., Фролова Л.А., Савельева Ю.Ю. Анализ структуры фильтрационного потока в глиноцементобетонной диафрагме плотины Гоцатлинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 14–21.
10. Прокопович В.С., Величко А.С., Орищук Р.Н. Напряженно-деформированное состояние земляной плотины с глиноцементобетонной диафрагмой (на примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С. 87–98.
11. Саинов М.П. Особенности численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с тонкими противофильтрационными элементами // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 102–108. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.102-108.
12. Глаговский В.Б., Радченко В.Г., Курнева Е.В. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с негрунтовыми противофильтрационными устройствами // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 256. С. 60–71.
13. Orishchuk R.N. Clay-cement-concrete diaphragm – justifying calculation for new-built constructions // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 89(5). P. 16–25. DOI: 10.18720/MCE.89.2.

REFERENCES

1. Glagovsky V.B., Radchenko V.G. New trends in the construction of ground dams. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2013;1: 2-8. (In Russ.).
2. SP 39.13330.2012. Rock fill dams. Updated version of the SNiP 2.06.05-84*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>. (In Russ.).
3. Orishchuk R.N. Design, construction and operation problems of clay-cement-concrete diaphragms of soil dams mounted by means of bored-secant piles. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2018;287:3-13. (In Russ.).
4. Sol'skiy S.V., Legina E.E., Orishchuk R.N., Vasil'eva Z.G., Velichko A.S. Analysis of the Influence of Clay Cement Concrete Components on Its Characteristics. *Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2016;10:80-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.80-93. (In Russ.).

5. Argal E.S., Korolev V.M. Some properties of clay-cement concrete and performance characteristics of a diaphragm wall in a dam body. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2019;5:10-19. (In Russ.).
6. Hinchberger S., Weck J., Newson T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010; 47(4):461-471.
7. Mahboubi A., Ajourloo A. Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression. *Cement and concrete research*. 2005;35(2):412-419.
8. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tupin G.A. Theory of plasticity concrete and reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat; 1974. (In Russ.).
9. Solsky S.V., Lopatina M.G., Orishchuk R.N., Frolova L.A., Savelyeva Yu.Yu. Analysis of the structure of the filtration flow in the clay-cement-concrete diaphragm of the Gotsatlinskaya HPP. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2017;7:14-21. (In Russ.).
10. Prokopovich V.S., Velichko A.S., Orishchuk R.N. Stress-strain state of an earth dam with clay-cement-concrete core wall using the example of an earth dam of Gotsatlinskaya HPP. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2016;282:87-98. (In Russ.).
11. Sainov M.P. Numerical Modeling of the Stress-Strain State of Earth Dams That Have Thin Rigid Seepage Control Elements. *Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2012; 10:102-108. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.102-108. (In Russ.).
12. Glagovsky V.B., Radchenko V.G., Kurneva E.V. Study of stressed-strained state of embankment dams with non-soil antiseepage facilities. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2009;256:60-71. (In Russ.).
13. Orishchuk R.N. Clay-cement-concrete diaphragm – justifying calculation for new-built constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;89(5):16-25. DOI: 10.18720/MCE.89.2.

Информация об авторе

А.С. Величко – научный сотрудник лаборатории «Фильтрационные исследования» им. акад. Н.Н. Павловского.

Information about the author

A.S. Velichko – Research Fellow at the Laboratory «Filtration Studies» named after Academician N.N. Pavlovsky.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 10.05.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 10.05.2023; accepted for publication 20.06.2023.

Научная статья
УДК 627.863.461

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО РЕМОНТУ ТРЕЩИН В БЕТОНЕ МАССИВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Ольга Евгеньевна Бибина¹, Георгий Владимирович Охалкин²

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

¹ bibinaoe@vniig.ru

² okhapkingv@vniig.ru, georgii@okhapkin.net

Аннотация. Рассмотрены подходы к ремонту трещин в бетоне ГТС. Выделены основные типы трещин и причины их образования. Установлены значения допускаемой ширины раскрытия трещин для массивных ГТС в зависимости от регламентирующих параметров. Выделены основные последовательные операции при ремонте трещин в бетонных и железобетонных конструкциях и обозначен рациональный способ подготовки устья трещины. Проанализированы технические решения и инъекционные материалы, используемые при ремонте трещин. Предложены типовые технические решения по ремонту трещин, в том числе с признаками коррозии бетона и арматуры. В результате выполненных исследований предложен метод выбора технических решений по ремонту трещин в бетоне ГТС.

Ключевые слова: ремонт трещин, ширина раскрытия трещины, гидротехнические сооружения, инъекционные материалы, технические решения, метод выбора

Для цитирования: Бибина О.Е., Охалкин Г.В. Обзор технических решений по ремонту трещин в бетоне массивных гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 103–115.

Original article

OVERVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR CRACKS' RESTORATION IN THE MASSIVE HYDRAULIC STRUCTURE' CONCRETE

Olga E. Bibina¹, Georgy V. Okhapkin²

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

¹ bibinaoe@vniig.ru

² okhapkingv@vniig.ru, georgii@okhapkin.net

Abstract. The article considers approaches to the cracks' restoration in the hydraulic structure' concrete. The main types of cracks' and causes for their creation were identified. Admissible the cracks' opening value for massive hydraulic structure' depending on the regulatory parameters were defined. Basic consecutive operations for the cracks' restoration in the concrete and reinforced concrete structures were identified, rational way for the cracks' mouth preparation were designated. The technical solutions and the injection materials used in the cracks restoration are analyzed. Typical technical solutions for the cracks' restoration, including those with signs of corrosion of concrete and reinforcement, were proposed. As a result of the research carried out, the method of the technical solutions' choice for the cracks' restoration in the hydraulic structure' concrete was submitted.

Keywords: cracks' restoration, crack opening width, hydraulic structures, injection materials, technical solutions, selection method

For citation: Bibina O.E., Okhapkin G.V. Overview of technical solutions for cracks' restoration in the massive hydraulic structure' concrete. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:103-115. (In Russ.).

Обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) является одной из важнейших стратегических задач для функционирования топливно-энергетических комплексов Российской Федерации [1, 2].

Как известно, для ГТС характерны длительные периоды эксплуатации, которые в сочетании с комплексом климатических, гидростатических, сейсмических и эксплуатационных воздействий приводят к износу конструкций. К одним из наиболее распространенных дефектов и разрушений бетонных и железобетонных конструкций ГТС относятся трещины, для которых характерны локальные фильтрации и признаки коррозии бетона и арматуры [3–10]. В связи с этим обеспечение надежной и безопасной эксплуатации ГТС неразрывно связано с ремонтом трещин в бетонных и железобетонных конструкциях.

В общих случаях выбор технических решений по восстановлению бетона конструкций осуществляется в соответствии с общими нормативно-техническими документами [11–14], посвященными материалам и системам для защиты и ремонта бетонных конструкций. Стоит отметить, что в настоящее время отсутствует нормативная документация, регламентирующая ремонтно-восстановительные работы на ГТС [3]. В связи с этим совершенствование методов выбора технических решений по ремонту трещин в бетоне ГТС является актуальной задачей.

Одним из обязательных условий обеспечения надежного и эффективного ремонта является определение причин образования трещин [10, 11]. Ошибки, допущенные при проектировании, строительстве и эксплуатации, являются причинами появления трещин, которые можно объединить в следующие основные группы [10, 11, 15–18]:

конструктивные трещины – оказывают влияние на несущую способность, устойчивость, долговечность, безопасность и надежность конструкции;

неконструктивные трещины – не оказывают влияние на несущую способность, устойчивость, безопасность и надежность, но влияют на долговечность конструкции.

Некоторыми причинами образования трещин в бетонных и железобетонных конструкциях до ввода в эксплуатацию ГТС являются [10]: пластическая осадка и усадка бетонной смеси; температурная усадка на раннем этапе набора прочности бетоном; изменения в свойствах смеси вблизи поверхности или при большом градиенте влажности; деформация при увлажнении и высыхании бетонной смеси; разное время укладки бетонной смеси; неравномерное температурное воздействие; разный состав бетонной смеси. Причинами образования трещин в период эксплуатации ГТС могут являться [10]: длительная усадка при высыхании бетона; превышение способности железобетонных элементов воспринимать растягивающие напряжения вследствие чрезмерного нагружения или усталости

бетона; ударные воздействия; неравномерная осадка грунтов и деформации; температурные деформации вследствие нарушения требований устройства температурных швов или неправильного расчета системы на температурные воздействия; развитие процессов коррозии бетона и (или) арматуры.

Регламентирующими параметрами для определения допустимой ширины раскрытия трещин Δ_{cr} являются: класс сооружения (I, II, III, IV); тип конструкции (трещиностойкие, нетрещиностойкие); параметры воздействия [19, 20].

К трещиностойким относятся конструкции, в которых по условиям нормальной эксплуатации сооружения не допускается образование трещин, $\Delta_{cr} = 0$:

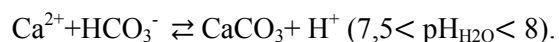
конструкции, к которым предъявляется требование водонепроницаемости в тех случаях, когда это требование невозможно обеспечить конструктивными и технологическими мероприятиями;

элементы причальных набережных, погружаемые в грунт забивкой или вибрированием;

лицевые элементы причальных набережных, сваи и сваи-оболочки для стадий изготовления, транспортировки и монтажа.

К нетрещиностойким относятся конструкции, в которых по условиям нормальной эксплуатации ограничена величина раскрытия трещин Δ_{cr} . Значения допускаемой ширины раскрытия трещин Δ_{cr} для массивных ГТС в зависимости от регламентирующих параметров приведены в таблице [19, 20].

В ряде случаев трещины с допустимым раскрытием самозалечиваются, тем самым обеспечивая водонепроницаемость конструкции. Постоянное насыщение бетона конструкции водой, отсутствие динамических нагрузок, прекращение усадки при твердении бетона, отсутствие активного движения воды способствуют процессу самозалечивания. Наиболее важным фактором, оказывающим влияние на процессы самозалечивания трещин, является осаждение карбоната кальция CaCO_3 в полости трещины [10]:



Недопустимое раскрытие трещин способствует проникновению в конструкцию влаги и газов, которые являются причиной коррозии бетона и арматуры. Катализатором коррозии бетона может являться комплексное воздействие агрессивных сред, периодические циклы увлажнения-высушивания и замораживания-оттаивания [10, 21, 22].

Образование на поверхности бетона в области трещин белых потеков (выщелачивания), хлопьев или сталактитов свидетельствует о процессах коррозии бетона первого типа. В ряде случаев на данных участках присутствуют ржавые потеки в местах расположения арматуры. Как известно, выщелачивание 15–30 % CaO из цементного камня приводит к уменьшению прочностных характеристик бетона на 40–50 % [9, 22, 23]. В связи с этим процессы коррозии бетона первого типа могут приводить к значительной деструкции бетона в области трещин [3].

Таблица

**Значения допускаемой ширины раскрытия трещин Δ_{cr} для массивных ГТС
в зависимости от регламентирующих параметров**

Класс сооружения	Конструкции	Δ_{cr} , мм	Примечание
I, II, III, IV	Напорные и безнапорные элементы, находящиеся в зоне переменного уровня воды и подвергающиеся систематическому замораживанию и оттаиванию	$\Delta_{cr(I,II,III,IV)} \leq 0,2$	
	Массивные напорные конструкции, не подвергающиеся систематическому замораживанию и оттаиванию	$\Delta_{cr(I)} \leq 0,5$	Гидрокарбонатная щелочность воды $W \leq 2,4$ мг-экв/л
		$\Delta_{cr(I)}$ не ограничивается	Гидрокарбонатная щелочность воды $W \geq 3,2$ мг-экв/л
		$\Delta_{cr(I)}$ не допускается или необходимы дополнительные защитные мероприятия	Среднегодовое значение бикарбонатной щелочности воды-среды менее 0,25 мг-экв/л
		$0,05 \leq \Delta_{cr(I)} \leq 0,5$	Суммарная концентрация ионов в водной среде $[Cl^-] + 0,25[SO_4] \leq 0,5$ мг/л
		$0,2 \leq \Delta_{cr(I)} \leq 0,5$	Постоянное водонасыщение
		$0,05 \leq \Delta_{cr(I)} \leq 0,3$	Периодическое водонасыщение
		$0,05 \leq \Delta_{cr(I)} \leq 0,2$	Капиллярный подсос и брызги
II	Массивные напорные конструкции, не подвергающиеся систематическому замораживанию и оттаиванию	$\Delta_{cr(II)} = 1,3\Delta_{cr(I)}$ $\Delta_{cr(II)} \leq 0,5$	
III		$\Delta_{cr(III)} = 1,6\Delta_{cr(I)}$ $\Delta_{cr(III)} \leq 0,5$	
IV		$\Delta_{cr(IV)} = 2\Delta_{cr(I)}$ $\Delta_{cr(IV)} \leq 0,5$	
<i>Примечание:</i> для массивных напорных конструкций, не подвергающихся систематическому замораживанию и оттаиванию, с диаметром арматуры $d \geq 40$ мм значение Δ_{cr} допускается увеличивать на 25 %.			

Анализ рекомендаций по ремонту бетонных и железобетонных конструкций [24–29] позволил выделить основные последовательные операции при ремонте трещин в бетонных и железобетонных конструкциях:

1. *Подготовка устья трещин.* Наибольшее распространение при подготовке устья трещин нашли традиционные способы удаления бетона, включая: механические ударные способы удаления бетона (отбойные молотки, перфораторы); безударные механические способы алмазной резки с последующей установкой инъекционных пакеров [24–29]. Однако данные способы обладают недостатками, которые могут способствовать преждевременному разрушению отремонтированной конструкции, в том числе: в полости трещины может остаться деструктивный корродированный бетон и продукты коррозии арматуры; ударное воздействие способствует появлению микротрещин в «здоровом» бетоне и в ряде случаев повреждению армирования, что в совокупности может являться причиной преждевременного разрушения отремонтированного участка.

Для устранения вышеуказанных недостатков существует способ гидродемонтижного удаления бетона [2, 27, 30–36], который позволяет очистить арматуру в области трещины, в том числе: удалить с поверхности арматуры продукты коррозии, окалину и загрязнения, значительный объем следов агрессивных химических веществ, являющихся источниками новой агрессии стали после ремонта; удалить деструктивный корродированный бетон в полости трещины; обеспечить высокое качество подготовленной поверхности, повысить долговечность зоны контакта между слоем инъекционного материала и бетонным основанием, увеличить сроки службы и надежность восстановленной конструкции. Кроме того, гидродемонтижный способ удаления бетона позволяет сократить последовательные технологические операции по устройству штрабы, удалению бетона, очистке подготовленной полости до одной, обеспечивающей все требуемые мероприятия, без угрозы повреждения арматурных стержней в ремонтируемой области, тем самым обеспечив сокращение сроков и уменьшение стоимости производства работ по ремонту трещин [2, 30]. Следовательно, в общих случаях при ремонте трещин в бетоне конструкций ГТС при подготовке устья трещины способ гидродемонтижа является рациональным, при отсутствии возможности использования оборудования для гидродемонтижа используются традиционные способы удаления бетона.

2. *Заполнение полости трещин инъекционными составами.* Для ремонта трещин без проявления фильтраций нашли применение способы одноэтапного инъектирования [24–29]. Для конструкционного заполнения с адгезионно-силовым замыканием используются составы группы АС [12], 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. Для неконструкционного заполнения с адгезионно-герметизирующим замыканием используются составы группы АГ [12], материал на полимерной основе с упругоэластичной водонепроницаемой структурой, адгезионно связанный с бетоном конструкции, способный воспринимать воздействия от перемещений при подвижке трещины и давления воды. Для ремонта трещин с проявлениями фильтраций нашли применение способы двухэтапного инъектирования [24–29]. Для остановки фильтраций используются составы группы КГ [12] для неконструкционного заполнения с компрессионно-герметизирующим замыканием, материал на полимерной гидрофильной основе с гелеобразной ограниченно набухаю-

шей структурой, компрессионно (под действием набухания при поглощении влаги) связанный с бетоном конструкции, способный воспринимать воздействия от перемещений при подвижке трещины и давления воды. Последующее заполнение трещин аналогично одноэтапному инъецированию.

Типовые технические решения:

Подготовка устья трещины с использованием гидродемонтажного способа удаления бетона и последующей установкой инъекционных пакеров.

Подготовка устья трещины с использованием традиционных способов удаления бетона: механических ударных способов удаления бетона (отбойные молотки, перфораторы); безударных механических способов алмазной резки с последующей установкой инъекционных пакеров.

Одноэтапное инъецирование для трещин без проявления фильтраций с предварительной зачеканкой устья трещины ремонтными материалами класса R3 (прочность на сжатие не менее 25 МПа, адгезия не менее 1,5 МПа) и R4 (прочность на сжатие не менее 45 МПа, адгезия не менее 2 МПа) [37] и использованием инъекционных составов группы АС [12] при конструкционном ремонте и группы АГ [12] при неконструкционном ремонте.

Двухэтапное инъецирование для трещин с проявлением фильтраций с предварительной зачеканкой устья трещины сверхбыстротвердеющими ремонтными материалами группы «гидропломба» и использованием инъекционных составов группы КГ и АС [12] при конструкционном ремонте и группы КГ и АГ [12] при неконструкционном ремонте.

Схемы ремонта конструктивных и неконструктивных трещин в железобетонных конструкциях ГТС в графическом виде приведены на рис. 1, 2 [3].

В результате исследований предложен метод выбора технических решений по ремонту трещин в бетоне ГТС, в графическом виде приведенный на рис. 3.

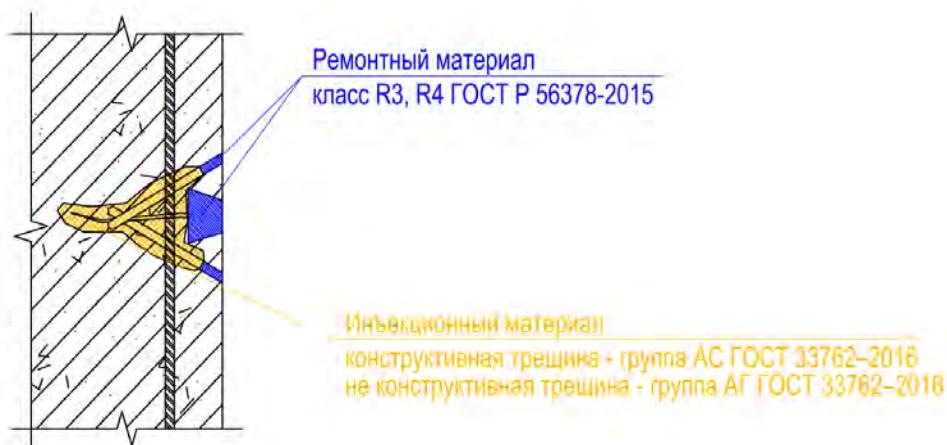


Рис. 1. Схема ремонта конструктивных и неконструктивных трещин без проявления фильтраций



Рис. 2. Схема ремонта конструктивных и неконструктивных трещин с проявлениями фильтраций



Рис. 3. Метод выбора технических решений по ремонту трещин в бетоне ГТС

Метод выбора способа ремонта трещин в бетоне конструкций гидротехнических сооружений

1. Сбор исходных данных

- 1.1. Условия для производства подготовительных работ.
 - 1.1.1. Общие условия – обеспечена возможность установки гидродемонтижного оборудования.
 - 1.1.2. Особые условия – стесненные условия производства работ, отсутствует возможность установки гидродемонтижного оборудования.
- 1.2. Категория трещины.
 - 1.2.1. Конструктивная трещина.
 - 1.2.2. Неконструктивная трещина.
- 1.3. Наличие фильтрации через трещину.
 - 1.3.1. Трещина без фильтрации.
 - 1.3.2. Трещина с фильтрацией.

2. Выбор технических решений по подготовительным работам

- 2.1. Общие условия – подготовка устья трещины с использованием гидродемонтижного способа удаления бетона, в том числе удаление коррозии бетона и арматуры (в случае наличия), с последующей установкой инъекционных пакеров.
- 2.2. Особые условия – подготовка устья трещины с использованием традиционных способов удаления бетона (механические ударные и безударные способы: отбойные молотки, перфораторы, алмазные пилы и т.д.) с последующей установкой инъекционных пакеров.

3. Выбор технических решений по инъекционным работам

- 3.1. Трещина без фильтрации – одноэтапное инъектирование с предварительной зачеканкой устья трещины ремонтными материалами класса R3, R4 и последующим демонтажом пакеров (в случае необходимости).
- 3.2. Трещина с фильтрацией – двухэтапное инъектирование с предварительной зачеканкой устья трещины сверхбыстро-схватывающимися ремонтными материалами группы «гидропломба» и последующим демонтажом пакеров (в случае необходимости).

4. Выбор инъекционных составов

- 4.1. Трещина без фильтрации.
 - 4.1.1. Конструктивная трещина – состав группы АС.
 - 4.1.2. Неконструктивная трещина – состав группы АГ.
- 4.2. Трещина с фильтрацией.
 - 4.2.1. Конструктивная трещина: первый этап инъектирования – состав группы КГ, второй этап инъектирования – состав группы АС.
 - 4.2.2. Неконструктивная трещина: первый этап инъектирования – состав группы КГ, второй этап инъектирования – состав группы АГ.

Заключение

В результате выполненных исследований собрана, проанализирована и систематизирована информация по ремонту трещин в бетоне, представленная в нормативно-технической документации и рекомендациях по ремонту, разработанных заводами – изготовителями ремонтных материалов, и определено следующее:

1. Накопленный опыт эксплуатации показывает, что для конструкций ГТС, как правило, характерны признаки фильтрации и коррозии бетона в области трещин. При ремонте трещин с признаками коррозии бетона следует уделить особое внимание удалению деструктивного корродированного бетона в полости трещин и очистке арматурных стержней от коррозии.

2. Механические способы удаления бетона, традиционно используемые при подготовке устья трещин, обладают некоторыми недостатками, например: способствуют появлению микротрещин в бетоне, могут оказать воздействие или повредить существующее армирование, как правило, обеспечивают удаление деструктивного корродированного бетона в пределах защитного слоя. В связи с этим после проведения работ по инъектированию между инъекционным материалом и бетоном конструкции в ряде случаев может остаться деструктивный корродированный бетон со сниженными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, который может способствовать продолжению фильтрационных и коррозионных процессов и преждевременному разрушению отремонтированного участка.

3. Применение гидродемонтажного способа удаления бетона при подготовке устья трещины является целесообразным, так как позволяет удалить деструктивный корродированный бетон с полости трещины без появления микротрещин, очистить арматуру от продуктов коррозии без повреждений.

4. В результате исследований выделены типовые технические решения по ремонту трещин в бетонных и железобетонных конструкциях ГТС, в том числе с признаками коррозии бетона и армирования, и метод их выбора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Охупкин Г.В., Василевская Л.С.** Анализ подходов к выбору способов нанесения или укладки ремонтных материалов при восстановлении бетона конструкций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2022. № 3. С. 39–45.

2. **Охупкин Г.В.** Совершенствование методов выбора способов удаления бетона при восстановлении объемной структуры бетона конструкций гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 50–60.

3. **Бибина О.Е., Охупкин 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.

4. **Василевская Л.С.** Разработка оптимального комплекса методов неразрушающего контроля бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: Филиал АО «Институт Гидропроект» – «ЦСГНЭО», 2020.

5. **Василевская Л.С., Ануфренкова П.С., Грачева Д.А.** Оценка состояния бетонных конструкций здания Волжской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2018. № 2. С. 28–32.

6. **Баклашова М.А., Василевская Л.С., Количко П.С.** Оценка технического состояния строительно-эксплуатационных водосбросов комплексом методов неразрушающего контроля // Гидротехническое строительство. 2021. № 1. С. 55–61. DOI:10.34831/EP.2021.62.36.007.
7. **Vasilevskaya L.S., Volgin N.A.** Application of Non-Contact Methods for Improved Visual Inspection of the Technical Condition of Hydraulic Structures // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 55, No. 4. P. 528–533. DOI 10.1007/s10749-021-01392-2.
8. **Охапкин Г. В., Давиденко В.М.** Проектное обоснование рациональных технических решений по ремонту локальных и площадных разрушений бетона гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 294. С. 111–136.
9. **Москвин В.М.** Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 344 с.
10. **Шилин А.А.** Ремонт железобетонных конструкций. М.: Горная книга, 2010. 519 с.
11. **ГОСТ 32016–2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013.
12. **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.
13. **СТБ EN 1504-5-2019.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Определения, требования, контроль качества и оценка соответствия. Часть 5. Инъектирование бетона. РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», 2019.
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. **Давиденко В.М., Паромова Г.Ф., Мальков А.Л., Касымов М.Р., Фотиев П.И.** Факторы разрушения бетона и методы его ремонта // Гидротехника. 2019. № 3. С. 70–73.
16. **Давиденко В.М., Паромова Г.Ф., Охапкин Г.В., Ивашинцов Д.А., Фотиев П.И.** Причины разрушения и концепции ремонта бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 286. С. 3–9.
17. **Охапкин Г.В.** Обоснование рациональных технических решений по ремонту площадных разрушений бетона гидротехнических сооружений в зоне переменного уровня: автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 124 с.
18. **Касперов Г.И., Левкевич В.Е., Миканович Д.С.** Натурные обследования технического состояния гидротехнических сооружений прудов-накопителей мелиоративных и польдерных систем // Труды БГТУ. 2016. № 2. С. 315–319.
19. **СП 41.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 (с Изменением № 1). М., 2012.
20. **СНиП 2.06.08-87.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. М.: Госстрой СССР. 1988. 32 с.
21. **СТ СЭВ 4419-83.** Защита от коррозии в строительстве. Конструкции строительные. Термины и определения. Дрезден, 1983.
22. **Джирма С.А.** Трещины в конструкциях из бетона и железобетона. Технология выполнения работ по устранению трещин // Наукові записки. 2010. Вып. 10, ч. III. С. 195–200.
23. **РД 153-34.1-21.326-2001.** Методические указания по обследованию строительных конструкций производственных зданий и сооружений тепловых электростанций. Часть 1. Железобетонные и бетонные конструкции. М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 2001. 67 с.

24. **Руководство** по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом совместимости материалов / ОАО «ЦНИИС». М., 2010.
25. **Руководство по ремонту** железобетонных гидротехнических сооружений специальными бетонами / ОАО «Гипроречтранс». М., 2005.
26. **Руководство по применению** материалов торговой марки Mapei на гидротехнических сооружениях / ЗАО «МАПЕЙ», АО «НИИЭС». М., 2017.
27. **Raupach M., Buttner T.** Concrete repair to EN 1504. Diagnosis, Design, Principles and Practice. 2014.
28. **The repair and protection** of reinforced concrete with Sika® in accordance with European Standards EN 1504. Switzerland: Sika, 2014.
29. **СТО 51552155-302-2016.** Ремонт и защита бетонных и железобетонных конструкций методом инъектирования. М.: ООО «Эм-Си Баухеми», 2016.
30. **Давиденко В.М., Охупкин Г.В., Бибина О.Е.** Современные методы подготовки к ремонту поверхностей бетонных конструкций гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 289. С. 52–58.
31. **Косолапов А.В.** Зарубежный опыт использования технологии обработки бетона водой высокого давления при ремонте и реконструкции гидротехнических сооружений // PRO. Алмазная резка и разрушение бетона. 2013. № 2.
32. **Щепа С.В.** Применение гидродемонтажа бетона при ремонте и реконструкции бетонных сооружений // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: тезисы докладов седьмой научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2012. Секция 3. С. 1–2.
33. **Щепа С.В.** Применение обработки бетона водой высокого давления // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: тезисы докладов шестой научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2011. С. 48–49.
34. **Лешицкая Т.П., Попов В.А.** Современные методы ремонта аэродромных покрытий. М., 1999. 131 с.
35. **Петров М.И.** Опыт применения технологии гидродемонтажа в строительстве и реконструкции объектов гидроэнергетики и транспортной инфраструктуры в Российской Федерации. X НПК, 2016.
36. **ОДМ 218.2.023-2012.** Рекомендации по применению быстротвердеющих материалов для ремонта цементобетонных покрытий. М., 2014.
37. **ГОСТ Р 56378–2015.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций. М.: Стандартинформ, 2015.

REFERENCES

1. Okhapkin G.V., Vasilevskaya L.S. Analysis of approaches to the choice of methods for applying or laying repair materials for the concrete's restoration of hydro-technical facilities. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2022;3:39-45. (In Russ.).
2. Okhapkin G.V. Selecting methods improvement of concrete removal for concrete volumetric structure restoring of hydraulic structures. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;302:50-60. (In Russ.).
3. Bibina O.E., Okhapkin G.V. Analysis of regulatory documentation on the repair of cracks in concrete constructions of hydraulic structures. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2022;306: 32-40. (In Russ.).
4. Vasilevskaya L.S. Development of an optimal set of methods for non-destructive testing of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures: dissertation abstract for the degree of Candidate of Technology. Moscow, 2020. (In Russ.).

5. Vasilevskaya L.S., Anufrenkova P.S., Gracheva D.A. Evaluation of concrete structure condition of the Volzhskaya hydroelectric power plant. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2018; 2: 28-32. (In Russ.).
6. Baklashova M.A., Vasilevskaya L.S., Kolichko P.S. Evaluation the technical condition of construction and operational spillways using a complex of non-destructive testing methods. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2021; 1: 55-61. DOI:10.34831/EP.2021.62.36.007. (In Russ.).
7. Vasilevskaya L.S., Volgin N.A. Application of Non-Contact Methods for Improved Visual Inspection of the Technical Condition of Hydraulic Structures. *Power Technology and Engineering*. 2021;55(4):528-533. DOI 10.1007/s10749-021-01392-2.
8. Okhapkin G.V., Davidenko V.M. Design Justification of Rational Technical Solutions on Repair of Local and Site-Wide Destruction of Concrete in Hydraulic Structures. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;294:104-114. (In Russ.).
9. Moskvina V.M. Corrosion of concrete. Moscow: Gosstroyizdat; 1952. 344 p. (In Russ.).
10. Shilin A.A. Repair of reinforced concrete structures. Moscow: Gornaya kniga; 2010. 519 p. (In Russ.).
11. GOST 32016-2012. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. General requirements. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
12. GOST 33762-2016. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements for injection products and filling of cracks, voids and interstices. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.).
13. STB EN 1504-5-2019. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 5. Concrete injection. RUP «STROYTECHNORM», 2019. (In Russ.).
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. Davidenko V.M., Paromova G.F., Malkov A.L., Kasymov M.R., Fotiev P.I. Some factors of destruction of concretes and methods of its repair. *The Hydrotechnika*. 2019;3: 70-73. (In Russ.).
16. Davidenko V.M., Paromova G.F., Okhapkin G.V., Ivashintsov D.A., Fotiev P.I. Failure analysis and analysis of repair conceptions for concrete and reinforced concrete structures of hydraulic engineering constructions. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2017;286:3-9. (In Russ.).
17. Okhapkin G.V. Substantiation of rational technical solutions for the repair of areal destruction of concrete hydraulic structures in the zone of variable level: dissertation abstract for the degree of Candidate of Technology. Saint Petersburg, 2019. 124 p. (In Russ.).
18. Kasperov G.I., Levkevich V.E., Mikanovich D.S. Field surveys of drainage and polder systems sludge depositories' technical state. *Bulletin of Belgorod State Technological University*. 2016;2:315-319. (In Russ.).
19. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.06.08-87 (with Change № 1). Moscow; 2012. (In Russ.).
20. SNiP 2.06.08-87. Concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Moscow: Gosstroy of the USSR. 1988. 32 p. (In Russ.).
21. ST SEV 4419-83. Corrosion protection in construction. Construction structures. Terms and definitions. Dresden, 1983. (In Russ.).
22. Girma S. A. Cracks in concrete and reinforced concrete structures. Technology of work on the elimination of cracks. *Naukovi zapiski*. 2010; 10(III):195-200. (In Russ.).
23. RD 153-34.1-21.326-2001. Methodological guidelines for the inspection of building structures of industrial buildings and structures of thermal power plants. Part 1. Reinforced concrete and concrete structures. Moscow: ORGRES Service of Excellence, 2001. 67 p. (In Russ.).

24. Repair manual for concrete and reinforced concrete structures of transport structures, taking into account the compatibility of materials. JSC «TSNII». Moscow, 2010. (In Russ.).
25. Manual for the repair of reinforced concrete hydraulic structures with special concretes. JSC «Giprorechtrans». Moscow; 2005. (In Russ.).
26. Guidelines for the use of Mapei trademark materials on hydraulic structures. Moscow; 2017. (In Russ.).
27. Raupach M., Buttner T. Concrete repair to EN 1504. Diagnosis, Design, Principles and Practice. 2014.
28. The repair and protection of reinforced concrete with Sika® in accordance with European Standards EN 1504. Switzerland: Sika; 2014.
29. STO 51552155-302-2016. Repair and protection of concrete and reinforced concrete structures by injection. Moscow: MC-Bauchemie; 2016. (In Russ.).
30. Davidenko V.M., Okhapkin G.V., Bibina O.E. Contemporary methods for preparing the surfaces of hydraulic concrete structures for repair. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2018;289:52-58. (In Russ.).
31. Kosolapov A.V. Foreign experience of using the technology of concrete treatment with high-pressure water in the repair and reconstruction of hydraulic structures. *PRO. Diamond cutting and concrete destruction – PRO. Almaznaya rezka i razrusheniye betona*. 2013; 2. (In Russ.).
32. Shchepa S.V. The use of concrete hydrodemontage in the repair and reconstruction of concrete structures. *Hydropower. New developments and technologies: abstracts of the seventh scientific and technical conference*. Saint-Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG»; 2012. Section 3. P. 1-2. (In Russ.).
33. Shchepa S.V. Application of concrete treatment with high pressure water. *Hydropower. New developments and technologies: abstracts of the sixth scientific and technical conference*. Saint-Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG»; 2011. P. 48-49. (In Russ.).
34. Leshchitskaya T.P., Popov V.A. Modern methods of repair of airfield coverings. M., 1999. 131 p. (In Russ.).
35. Petrov M.I. Experience in the application of hydrodemontage technology in the construction and reconstruction of hydropower facilities and transport infrastructure in the Russian Federation. X Scientific and practical conference, 2016.
36. ODM 218.2.023-2012. Recommendations for the use of fast-hardening materials for the repair of cement concrete coatings. Moscow; 2014. (In Russ.).
37. GOST R 56378-2015. Materials and systems for the protection and repair of concrete structures. Requirements for products repair and bond connections for rehabilitation of structures. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.).

Информация об авторах

О.Е. Бибина – инженер 1 категории;

Г.В. Охупкин – канд. техн. наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

O.E. Bibina – Engineer, category 1;

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

Статья поступила в редакцию 10.03.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 10.03.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 20.06.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Финагенов О.М.</i> Особенности мониторинга грунтового основания и опорной части морского нефтегазопромыслового гидротехнического сооружения	3
<i>Наупарац Д., Вишинич Н.</i> Подход к проектированию электрогидравлических систем привода движения затворов для обеспечения разных уровней работоспособности в случае отказа в системе	15
<i>Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Пучкарюс А.В.</i> Обоснование расчетных гидрологических характеристик боковой приточности на участке р. Виллой между гидроузлами Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС	27
<i>Кузьменко А.П., Сабуров В.С.</i> Сравнение результатов динамических и статических испытаний двухпролетной балочной конструкции	42
<i>Воронков О.К., Кондратенко П.В., Ушакова Л.Ф.</i> Геомеханические свойства оттаивающих грунтов	52
<i>Мамедов А.Ш.</i> Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне	67
<i>Григорьев Д.В., Гарибин П.А.</i> Воздействие буровзрывных работ на распорные сооружения	83
<i>Величко А.С.</i> Анализ методов лабораторных определений прочностных и деформационных характеристик глиноцементобетона	92
<i>Бибина О.Е., Охаткин Г.В.</i> Обзор технических решений по ремонту трещин в бетоне массивных гидротехнических сооружений	103

CONTENT

<i>Finagenov O.M.</i> Features of ground base monitoring and bearing part of the offshore oil and gas production hydraulic engineering structures	3
<i>Nauparac D., Vishnich N.</i> An approach to the design of electrohydraulic gate movement drive systems to ensure different levels of operability in the event of a system failure	15
<i>Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Maksimova A.A., Puchkoryus A.V.</i> Substantiation of the calculated hydrological characteristics of the lateral inflow on the Vilyuy River section between the hydroelectric units of the Vilyuy HPP-1, 2 and the Svetlinskaya HPP	27
<i>Kuzmenko A.P., Saburov V.S.</i> Comparison of the results of dynamic and static tests of a two-span beam structure	42
<i>Voronkov O.K., Kondratenko P.V., Ushakova L.F.</i> Geomechanical properties of thawing soils	52
<i>Mamedov A.Sh.</i> Hydraulic jump on a smooth and rough bottom	67
<i>Grigoriev D.V., Garibin P.A.</i> Impact of drilling and blasting operations on spacer structures	83
<i>Velichko A.S.</i> Analysis of methods for laboratory determination of strength and deformation characteristics of clay cement concrete	92
<i>Bibina O.E., Okhapkin G.V.</i> Overview of technical solutions for cracks' restoration in the massive hydraulic structure' concrete	103

**Перечень организаций, представивших статьи
для опубликования в сборнике научных трудов
«Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», т. 308**

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

АО «Объединенная энергостроительная корпорация», Красноярск, Россия;

АО «ППТ Инжиниринг», Белград, Сербия;

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала
С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия;

ООО «Hidroloq», Баку, Азербайджан;

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислитель-
ных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия.

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 абзацным 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) 535-88-56, (812) 493-93-41

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научный редактор *В.Б. Глазовский*
Редакторы *Т.М. Бовичева, А.А. Ермолаева*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Подписано к печати 22.06.2023.

Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 1. Печать цифровая.
Печ.л. 7,5. Усл.печ.л. 10,5. Уч.-изд.л. 8,75. Тираж 300 (100). Заказ 16.

Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».
Типография ООО «ПК Марка».
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.