

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

ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ

им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Издание основано в 1931 году

Том 307

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 622.7

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО КОНСОЛИДАЦИИ НАМЫВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Станислав Викторович Сольский¹, Олег Николаевич Котлов²,
Илья Григорьевич Зеленский³, Кристина Ренатовна Биканасова⁴**

¹ АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, solsky@yandex.ru

² АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, kotlovoleg@yandex.ru

³ ООО «АйДи Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, igzelensky@yandex.ru

⁴ ООО «НПК Проектводстрой», Санкт-Петербург, Россия, kbikanasova@proektvodstroj.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросу консолидации намывных накопителей, а именно разработке, обоснованию и внедрению рациональных технических решений для обеспечения надежной и безопасной работы намывных геотехнических массивов путем активизации и управления консолидацией складываемых грунтовых массивов.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, консолидация, складирование, дренаж, накопитель, фильтрационные процессы

Для цитирования: Сольский С.В., Котлов О.Н., Зеленский И.Г., Биканасова К.Р. Конструктивные решения по консолидации намывных накопителей грунтовых материалов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 3–15.

Original article

STRUCTURAL SOLUTIONS FOR THE CONSOLIDATION OF ALLUVIAL RESERVOIRS OF SOIL MATERIALS

**Stanislav V. Solsky¹, Oleg N. Kotlov², Ilya G. Zelensky³,
Kristina R. Bikanasova⁴**

¹ JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, solsky@yandex.ru

² JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, kotlovoleg@yandex.ru

³ ID Engineering, Saint Petersburg LLC, Russia, igzelensky@yandex.ru

⁴ Research and Production Corporation Projectvodstroy LLC, Saint Petersburg, Russia, kbikanasova@proektvodstroj.ru

Abstract. This article is devoted to the issue of the consolidation of alluvial storages, namely the development, justification and implementation of rational technical solutions to ensure the reliable and safe operation of alluvial geotechnical massifs by activating and managing the consolidation of stored soil massifs.

Keywords: engineering and geological conditions, consolidation, storage, drainage, reservoir, filtration processes

For citation: Solsky S.V., Kotlov O.N., Zelensky I.G., Bikanasova K.R. Structural solutions for the consolidation of alluvial reservoirs of soil materials. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:3-15. (In Russ.).

В Российской Федерации накоплен значительный опыт по транспортированию и складированию побочных продуктов производства концен-

тратов горно-обогатительных предприятий, в первую очередь это касается инертных грунтовых материалов и отходов горно-обогатительных предприятий.

Основным технологическим способом складирования грунтовых материалов и отходов обогатительных фабрик является их гидротранспорт в виде пульпы в гидротехнические сооружения – накопители, объемы которых могут достигать сотни миллионов кубических метров, иметь площади в десятки квадратных километров и высоту более 100 м.

При использовании гидротранспорта в накопитель намывным способом с образованием отстойного прудка и организацией оборотного водоснабжения существуют два способа возведения ограждающих конструкций:

намывной, при котором сами хвосты являются строительным материалом для намывных противофильтрационных экранов (пляжей) каждого яруса ограждающей дамбы. Также эти экраны (пляжи) являются основанием для возведения последующих ярусов;

наливной, при котором ограждающая дамба возводится сразу на весь срок заполнения полностью из привозного материала.

Очевидно, что строительство накопителей с использованием побочных продуктов извлечения концентрата обогатительных фабрик в качестве строительного материала является более предпочтительным со всех точек зрения [1].

Следует отметить, что в связи с зачастую повышенной экологической опасностью фильтрата для подземных водоносных горизонтов и поверхностных водных объектов верховые откосы ограждающих конструкций, ложе и борта гидроизолируются с применением грунтовых (глинисто-суглинистые инертные материалы, а при соответствующем обосновании – илисто-глинистые фракции складированных материалов) или геосинтетических материалов (геомембраны, бетонные маты), а также противофильтрационных завес в виде различных типов противофильтрационных стенок в грунте (траншейного типа, буросекущих свай, инъекционных завес, мерзлотных завес и др.) [2]. Возможно сочетание разных способов.

В результате создается замкнутый обводненный объем, затрудняющий отток поровой воды из образуемого геотехнического массива и его уплотнение.

Если складированный материал состоит в основном из песчаных и супесчаных фракций, то процессы укладки и уплотнения продуктов в накопителях не представляют особых сложностей, в отличие от илисто-глинистых частиц.

Эти материалы, в отличие от песков, поступая в гидроотвал в обводненном состоянии, обезвоживаются и уплотняются на протяжении длительного времени, и в условиях непрерывного намыва характеризуются повышенным поровым давлением в грунтовых массивах накопителей и, соответственно, пониженной сдвиговой прочностью грунта.

Эти факторы обуславливают повышенные риски обрушения не только ограждающей дамбы, но и всего намытого массива, поскольку в намывном сооружении разделить эти элементы физически невозможно. Следует отметить, что в РФ таких гидротехнических сооружений только 1 класса опасности не менее 25.

Значимость проблем намывных массивов, связанных с консолидацией, можно проиллюстрировать двумя яркими примерами негативных последствий произошедших на них аварий:

в 2010 г. на заводе по производству глинозема в 160 км от Будапешта (Венгрия) вследствие разрушения дамбы произошла утечка более миллиона кубометров токсичного красного шлама. При этом пострадала территория более 40 км², жертвами стали 10 человек;

в 2019 г. на железнорудном предприятии в Брумадиньо (Бразилия) произошло разрушение хвостохранилища, приведшее к гибели 259 человек.

Для обоснования применения существующих и разработки перспективных методов, технологий и технических решений по управлению процессами консолидации намывных геотехнических массивов приведем некоторые общие сведения о ней.

Консолидация грунтов является важным фактором, подлежащим обязательному учету в проектировании, строительстве и эксплуатации промышленных, гидротехнических, транспортных и гражданских сооружений.

Консолидация напрямую связана с многофазностью структуры грунта. Теории, описывающие этот процесс и другие реологические свойства, являются базовыми концепциями инженерного прогнозирования.

Грунты, служащие самыми распространенными строительными материалами для устройства намывных грунтовых массивов, представляют собой сочетание традиционных фазовых состояний веществ (твердое, жидкое, газообразное), являясь трехкомпонентной системой. Их прочностные и другие физико-механические свойства зависят от совокупного взаимодействия этих элементов и изменяются в широком диапазоне.

Различают следующие типы консолидации грунтов:

естественная консолидация, обусловленная давлением вышележащих слоев. По истечении определенного промежутка времени она заканчивается. Возникающие при этом напряжения называют историческими. Если в данный момент текущие напряжения в грунте совпадают с историческими, то говорят, что он нормально уплотненный. В том случае, когда значение первых меньше, грунт является переуплотненным (такое наблюдается при снижении нагрузки, например при таянии ледника);

первичная консолидация, происходящая за счет миграции воды в порах при уменьшении их объема под воздействием нагрузки. Величину консолидации определяют по графикам (при степени консолидации, находящейся в пределах 0–100 %);

вторичная консолидация. Уплотнение продолжается в результате ползучести твердых частиц (или скелета) грунта, которая не учитывалась в предыдущем случае. Для определения осадки рассчитывают коэффициент консолидации грунта вторичного процесса.

Основными характеристиками грунта, влияющими на скорость осадки, являются:

- способность пропускать воду под давлением (водопроницаемость);
- структура (свойства частиц, из которых он состоит);
- давление, создаваемое жидкостью на стенки пор;
- способность скелета деформироваться с течением времени под воздействием нагрузки;
- сжимаемость минеральных частиц, воды и воздуха в порах грунта;

схема нагружения;
геологическое строение;
преобладание той или иной фазы. Например, наличие воздуха снижает коэффициент консолидации и скорость выравнивания избыточного порового давления.

В песчаных грунтах с высокой водонасыщенностью отжатие воды из пор протекает быстрее (соответственно выше коэффициент консолидации грунта), так как пространство между твердыми частицами является достаточно большим. Сдвиговые деформации в песчаных и обломочных породах возникают в результате взаимного смещения частиц и разрушения контактов между ними.

В глинах объемная деформация вызывает плотную переупаковку частиц, окруженных жидкостной оболочкой. Скорость консолидации определяется в основном типом структурных связей и величиной нагрузки. Наличие водноколлоидных связей обуславливает упругость глинистых грунтов – их способность к восстановлению после устранения нагрузки. Упрочнение после уплотнения связано с тем, что происходит возобновление этих связей, если внутреннее напряжение не превышало структурную прочность. Так как поры в глинистых грунтах значительно меньше, то консолидация происходит медленнее.

Наиболее сложными для прогнозирования являются структурно-неустойчивые грунты, у которых деформация происходит под влиянием дополнительных внешних факторов – оттаивания мерзлых почв, разложения органики в торфах и заторфованных грунтах, обводнения лесса, роста засоленности. Так, у торфа фильтрационная консолидация затухает быстро, а осадка продолжается в течение длительного периода времени.

При консолидации твердой фракции массива необходимо обеспечить выход поровой воды, создать пути и зоны для «разгрузки» порового давления, то есть использовать инженерные методы активации процесса консолидации грунтовых массивов.

При наличии дренирующего основания и водопроницаемых ограждающих дамб данная проблема, особенно в песчаных грунтах, отсутствует. Кроме этого, в песчаных грунтах вода из массива грунта «выжимается» в отстойный прудок.

Совсем по-другому обстоит дело, если складировемый материал представляет собой илисто-глинистые фракции и в ложе накопителя выполнен гидроизоляционный экран. Глиняный массив можно представить как череду гидроизоляционных слоев, препятствующих перемещению поровой воды. Без специальных мероприятий освободить воду из такого массива не получится.

Например, применение реагентов для гидротранспорта способствует более плотной укладке твердого материала при складировании. Если укладку материала производить послойным намывом с выдержкой каждого слоя, то плотность укладки также возрастает.

Уплотнение массива складировемого материала увеличивает его гидроизоляционные свойства, что снижает практически до нуля воздействие фильтрационных выходов накопителя на подземный и поверхностный стоки.

Кроме этого, повышение плотности материала значительно увеличивает объемы его складирования в тех же размерах чаши накопителя.

В связи с колоссальным ростом объемов складываемых материалов илесто-глинистых фракций возникает серьезная задача регулирования консолидации данных массивов. Для решения данной задачи возможно применение таких мероприятий, как:

использование соответствующих реагентов (флокулянтов, реологических модификаторов);

внедрение конструктивных элементов, ускоряющих консолидацию массивов грунта (дренажи);

применение технологий складирования, способствующих консолидации грунтов в массивах (складирование рассредоточенным методом – намыв с фракционированием, послойная укладка материала и т.д.).

Возможно сочетание данных мероприятий.

Нами выполнена систематизация применяемых и предложен ряд новых методов и технологических приемов по обеспечению прогнозируемой консолидации крупных намывных геотехнических массивов на основе использования традиционных и современных геотехнических материалов, оборудования и технологий. Систематизация выполнена по характерным признакам, свойственным данному типу объектов, и условиям их эксплуатации.

По этапу жизненного цикла: строительный период до начала подачи пульпы; начальный период заполнения в первичном прудке; основной период наращивания ограждающих конструкций на проектную высоту.

По местоположению в конструкции накопителя: в районе верхового откоса и понура ограждающих дамб; в ложе и бортах накопителя; в теле образуемого геотехнического массива.

По способу отвода отжатой поровой воды: самоизлив под воздействием гидростатического воздействия, путем перепуска в низконапорные нижележащие водоносные горизонты; путем перепуска сквозь ограждающую конструкцию (дамбу, плотину); механический водоотлив.

По конструкции и ориентации дренажа в пространстве: горизонтальный, вертикальный, наклонный, комбинированный, пластовый, веерный (в горизонтальной, вертикальной или наклонных плоскостях).

По материалу дренажа: бесполостной, трубчатый, с объемными фильтрами.

По периоду действия: постоянно действующий, в режиме ожидания.

По типу водоприемного и транспортирующего сооружения: закрытый коллектор, дренажная потерна, дренажная галерея, вертикальная шахта (колодец), закрытая камера.

Ниже представлены принципиальные схемы конструктивного исполнения основных типов консолидационного дренажа, а также проработки ключевых узлов, обеспечивающих их надежную и безопасную работу в течение всего периода эксплуатации накопителя.

Перед тем как решать, каким образом воду из порового пространства отжать и как ее транспортировать дальше, необходимо дать ответ на ключевой вопрос: куда ее деть?

Учитывая специфику и конструктивные особенности намывных накопителей, а также характеристики собственно фильтра, можно рассмотреть 4 варианта вывода отжимающейся воды.

Первый вариант: дать ей возможность самоизливаться на дневную поверхность (рис. 1). Этот метод нашел широчайшее применение при инженерной подготовке территорий, строительстве на слабых основаниях. На практике он предполагает устройство системы из достаточно густой сетки вертикальных разгрузочных дрен, по которым за счет давления вышележащих грунтовых масс вода поднимается на поверхность и поступает там либо в специальные траншеи, либо в специальные бесполостные дрены или пласты, и отводится по ним далее в место ее приема. Конструкция и схема расстановки вертикальных дрен обуславливается потребной скоростью консолидации, характеристиками консолидации, характеристиками грунтового массива и возможностью производить с поверхности какие-либо работы с учетом его несущей способности. Для устройства такого дренажа существует линейка геосинтетических дрен (лент) и оборудования для их укладки, эту роль могут выполнять и вертикальные бесполостные дрены – скважины, заполненные водопроницаемым материалом. Конструктивно они могут быть вертикальными, наклонными. Оборудование для реализации данных решений имеется.

Вариантом такого дренажа может быть вертикальный дренаж, устраиваемый с гребня дамб наращивания (рис. 2, 3) и оснащенный отводом в НБ для запуска в водооборот.

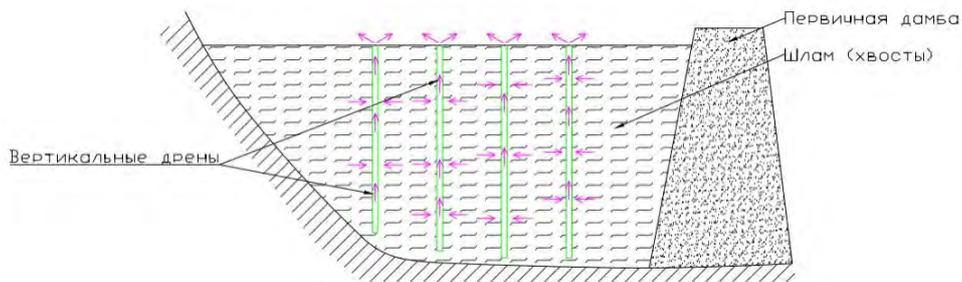


Рис. 1. Вертикальные дрены для отжатия избыточной воды на поверхность

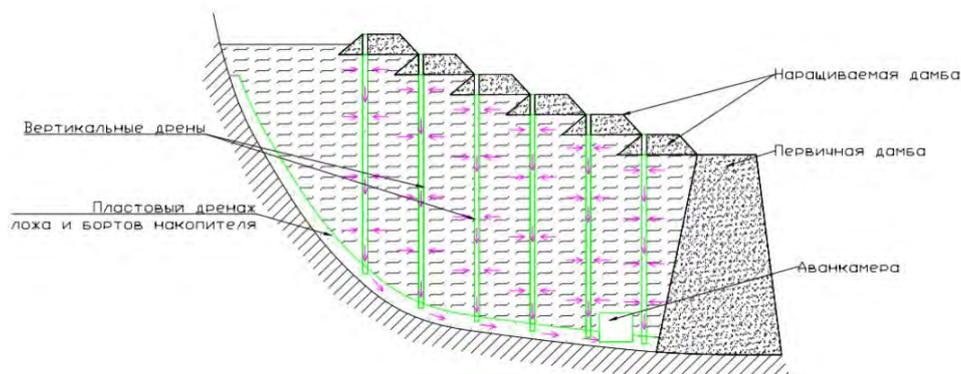


Рис. 2. Вертикальный дренаж с наращиваемых дамб

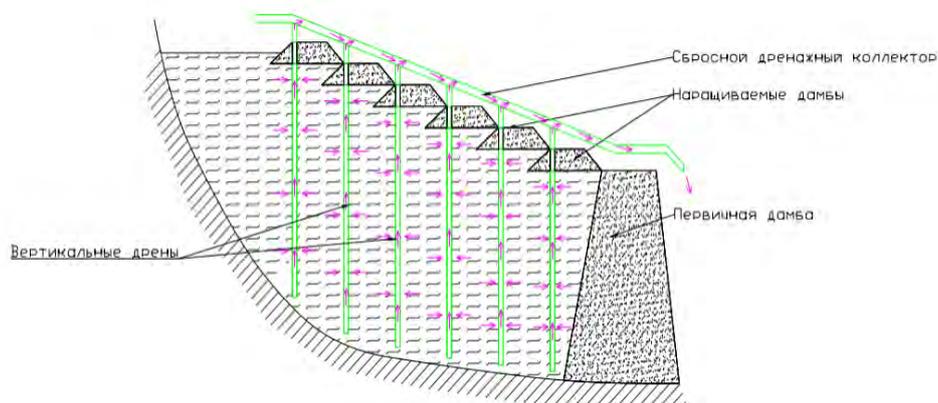


Рис. 3. Вертикальный дренаж для отжатия и отвода избыточной воды с наращиваемых дамб

Второй вариант: в зависимости от конкретных гидрогеологических условий и гидрохимических характеристик фильтрата, при соответствующем обосновании перепустить воду в нижележащие безнапорные или малонапорные водоносные горизонты (рис. 4). Технически это удобнее всего подготовить заблаговременно, на начальной стадии подготовки ложа накопителя из приемных камер, в которые заводятся транспортирующие коллекторы. Конструкция, диаметр, шаг между перепускными скважинами определяются соответствующими гидрогеологическими расчетами.

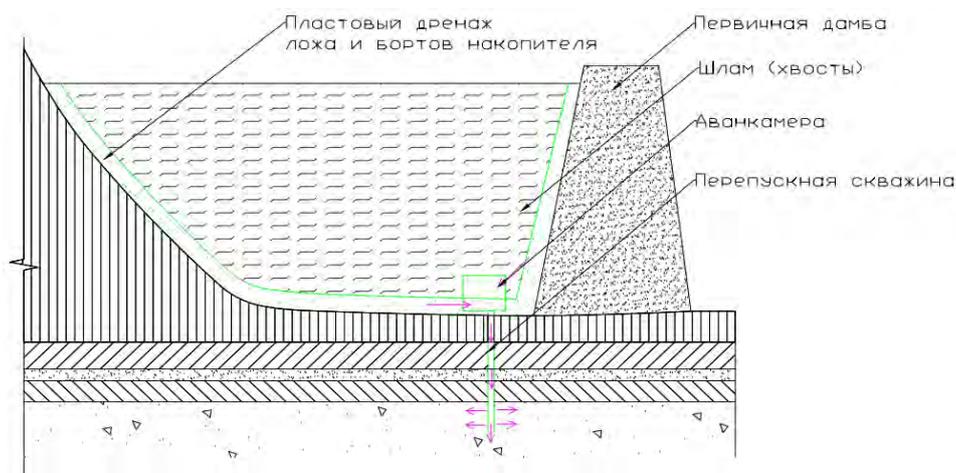


Рис. 4. Вывод воды в нижележащий безнапорный водоносный горизонт

Третий вариант: перепустить воду через подошву ограждающей дамбы (плотины). Это довольно удачный вариант, так как позволяет решать, в какой момент времени и в каком режиме производить слив отжатых вод. Особенно актуально такое решение для обеспечения работы первичного прудка, в процессе накопления в нем илисто-глинистых фракций. Собственно, это решение также успешно можно применять и для водопроницаемых намывных грунтов. Спецификой его конструктивного исполнения является узел сопряжения водопропускного коллектора с противофильтрационным экраном ограждающей конструкции (рис. 5).

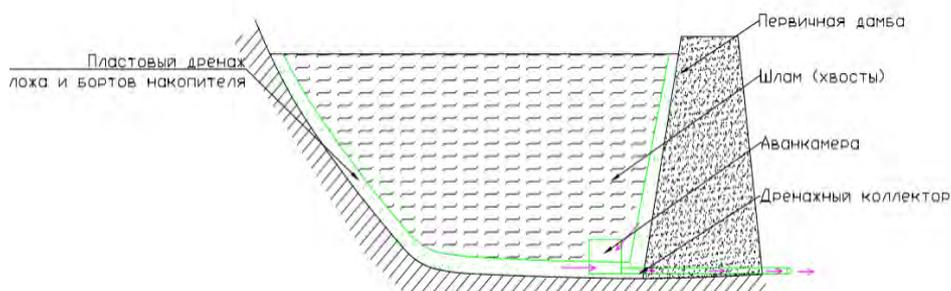


Рис. 5. Вывод воды через (сквозь) первичную дамбу

Четвертый вариант: откачать. Отжатая из массива поровая вода собирается по системе коллекторов на нижележащих отметках самотеком в аванкамерах, расположенных у подошвы верхового откоса ограждающей дамбы (плотины), из которой и производится откачка фильтрата. Сложности и достоинства этого варианта очевидны.

Возможные варианты:

размещение в аванкамере необслуживаемой автоматической насосной станции (достоинство – возможность трассировки отводящего напорного водовода по оптимальному маршруту, недостаток – полная неремонтопригодность);

вывод на гребень первичной дамбы прямолинейной трубы (наклонной скважины) и размещение в ней опускного скважинного насоса (достоинство – возможность доступа к насосу для его ремонта или замены);

сифон (отметка сброса должна располагаться ниже отметки забора воды).

Во всех случаях необходимо решать вопрос с устойчивым энерго-снабжением и защитой напорной линии от промерзания (рис. 6).

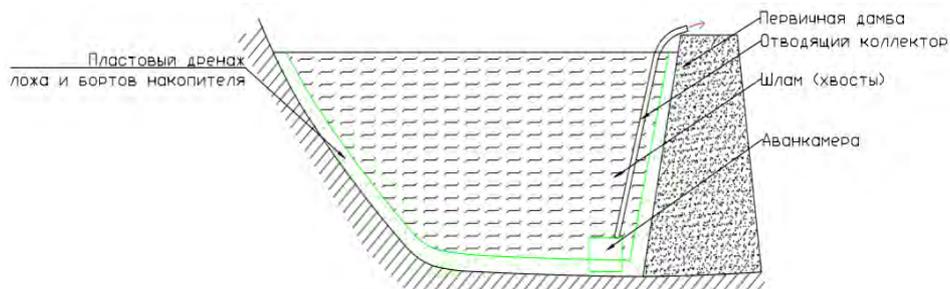


Рис. 6. Вывод воды через отводящий напорный коллектор

Имея решение по отводу воды, можно разрабатывать систему ее сбора и подвода к аванкамере (аванкамерам) (рис. 7).

Одним из важнейших элементов этой системы является коллектор, установленный параллельно подошве верхового откоса, собирающий воду из дренажа, устроенного на верховом откосе, из пластового дренажа ложа и бортов или из коллекторов, усиливающих их пропускную способность. Дополнительной функцией этого коллектора является подвод воды к приемной аванкамере или распределение ее между несколькими аванкамерами. Его конструктивные параметры и материал подбираются в зависимости

от воспринимаемой нагрузки намываемого геотехнического массива, уклонов его заложения и расчетной приточности. Ввиду расположения коллектор должен обладать повышенной надежностью в связи с полной неремонтопригодностью. Он устраивается в первую очередь, вместе с аванкамерой (аванкамерами). На период первичного намыва, до исчерпания полезной емкости первичного прудка и формирования относительно водоупорного прослоя из намываемых илесто-глинистых фракций работает в режиме ожидания – то есть в работу не включается.

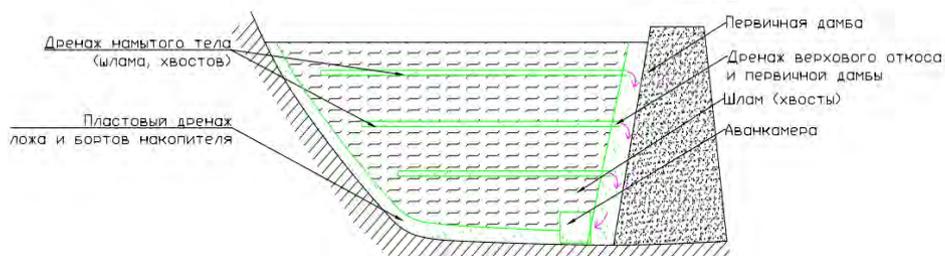


Рис. 7. Зонирование дренажей по элементам накопителя

Другим элементом системы является наклонный дренаж верхового откоса, который устраивается в процессе строительства первичной дамбы по всей его площади. Он имеет важную функцию дренировать намытый геотехнический массив в непосредственной близости от подпорного сооружения и обеспечить его максимально возможные прочностные характеристики для совместной работы системы «ограждающая конструкция – намытый геотехнический массив» (рис. 8).

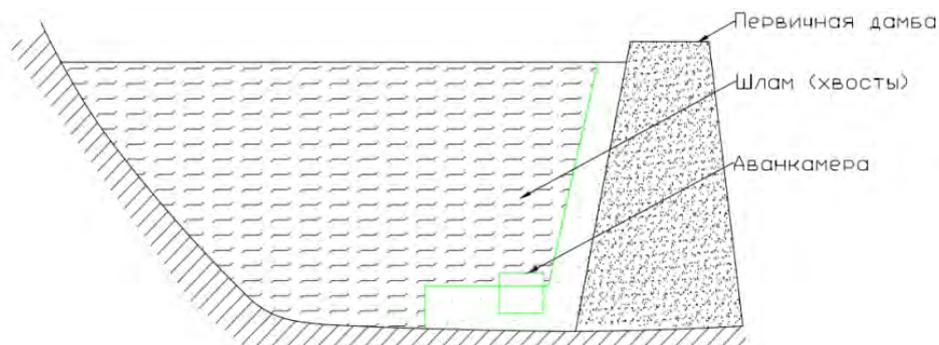


Рис. 8. Дренаж верхового откоса первичной дамбы

Конструкция дренажа представляет собой многослойный обратный фильтр, в том числе с возможным использованием фильтрующих геосинтетических материалов, подобранный как переходные слои от материала геотехнического массива до собственно дренажного пласта, по которому отжатая вода поступает в дренажный коллектор. Аналогично предыдущему элементу на период первичного намыва, до исчерпания полезной емкости первичного прудка и формирования относительно водоупорного прослоя из намываемых илесто-глинистых фракций работает в режиме ожидания – то есть в работу не включается.

Следует отметить, что этот дренажный элемент может также выполнять и функцию приема отжатой воды из верхних дренажных систем, образующихся после завершения первого этапа работы накопителя – его первичного заполнения намываемым материалом.

И наконец, основной водоприемный элемент – дренаж ложа и бортов накопителя. Его конструкция представляет собой многослойный обратный фильтр, в том числе с возможным использованием фильтрующих геосинтетических материалов, подобранный как переходные слои от материала геотехнического массива до собственно дренажного пласта, по которому отжатая вода поступает либо непосредственно в головной коллектор, либо в систему транспортирующих собирателей (бесполостных или материальных), усиливающих его пропускную способность. Эти коллекторы более низких порядков трассируются в зависимости от рельефа ложа накопителя, обеспечивая сбор всей принятой пластовым дренажем отжатой воды (рис. 9).

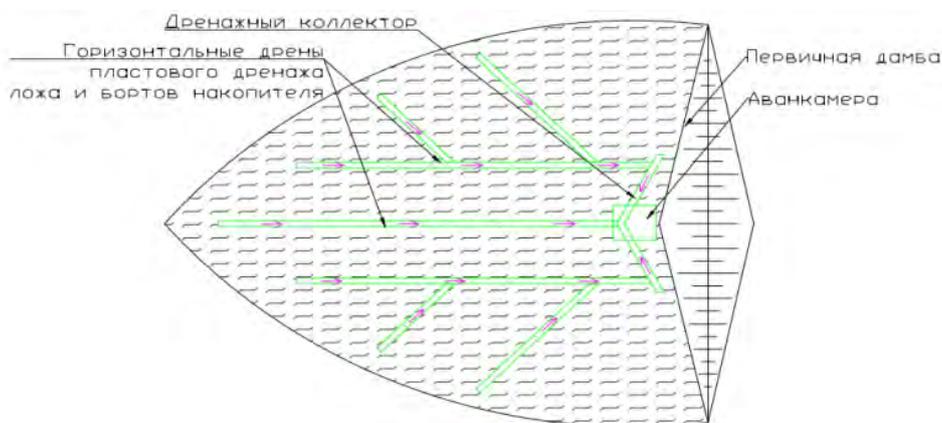


Рис. 9. Дренаж в ложе (план)

Дренаж ложа выполняет ряд функций. Во-первых, принимает воду из основания образованного геотехнического массива, во-вторых, транспортирует ее в головной дренажный коллектор и, в-третьих, обеспечивает возможность развития дренажной системы в объеме намываемого массива практически до завершения его эксплуатации путем приема отжатой воды с помощью забуривания в него перепускных скважин вертикального дренажа.

Как и два предыдущих элемента, на период первичного намыва, до исчерпания полезной емкости первичного прудка и формирования относительно водоупорного прослоя из намываемых илисто-глинистых фракций работает в режиме ожидания – то есть в работу не включается.

Для обеспечения объемного дренирования всего намываемого массива эффективной представляется конструкция комбинированного дренажа, представляющего собой горизонтальные пластовые дренажи или широкие дрены, которые посредством системы вертикальных дрен сопряжены с пластовым дренажем основания. Эта дренажная система возводится и развивается параллельно с заполнением накопителя и наращиванием его ограждающих конструкций (рис. 10, 11).

В некоторых случаях может оказаться целесообразным устройство в основании дренажных потерн (галерей), из которых возможно выполнить

бурение веерного дренажа горизонтальными, наклонными и восходящими скважинами в намытый геотехнический массив. Дрены в данном случае могут представлять собой специальные дренажные кассеты, оснащенные обратными фильтрами, заранее подобранными к намываемому материалу (рис. 12).

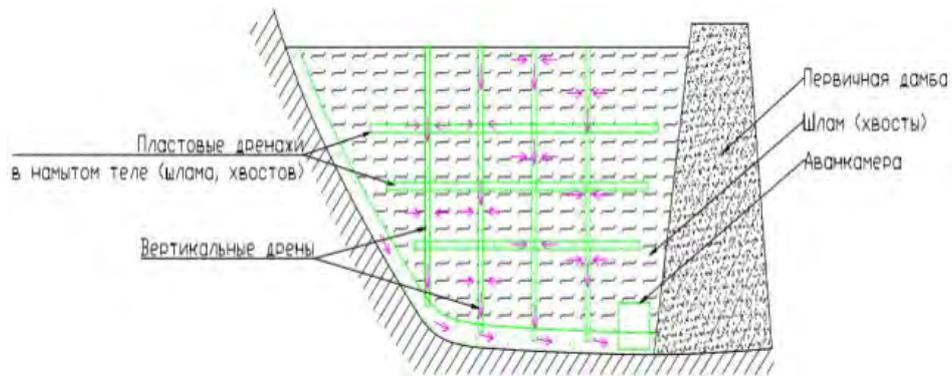


Рис. 10. Комбинированный дренаж намываемого массива

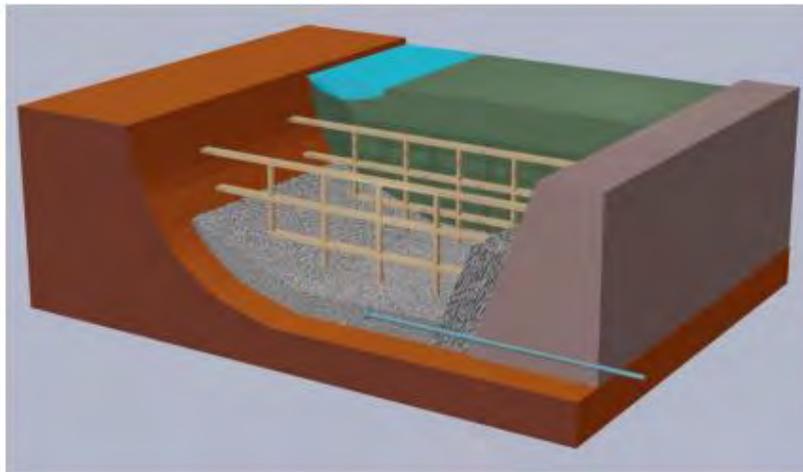


Рис. 11. 3D-визуализация комбинированного дренажа намываемого массива

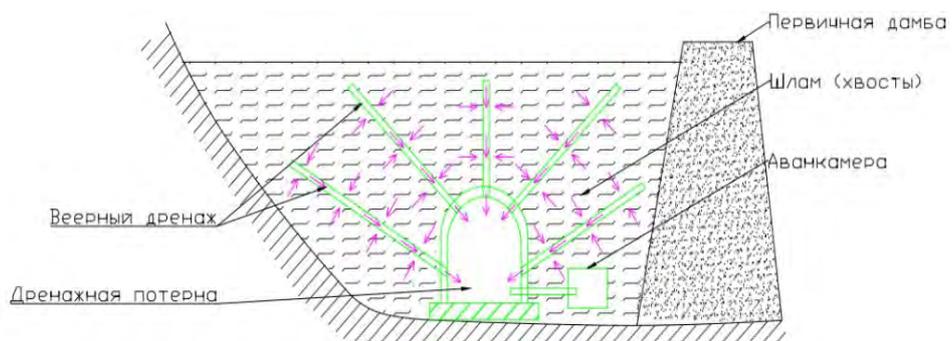


Рис. 12. Веерные дренажи из специальных дренажных потерн

Перспективной представляется конструкция дренажа шахтного типа, в котором вертикальная шахта из наборных элементов возводится в процессе намыва опережающими темпами (по типу водосбросного колодца), но принимает не осветленную воду, а отжимаемую путем устройства веерного радиального многоярусного дренажа, забуриваемого горизонтальными скважинами в намывтый геотехнический массив (рис. 13).

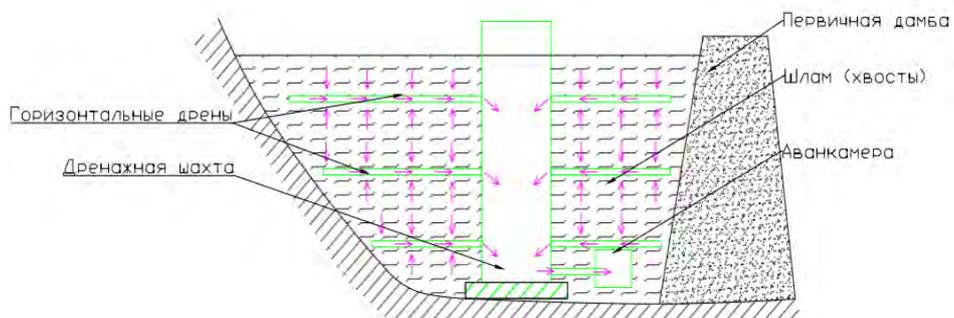


Рис. 13. Веерные дренажи из специально устроенных шахт

При наращивании ограждающих конструкций целесообразно устройство с гребня каждого наращенного яруса вертикальных дренажных скважин, перепускающих отжатую воду в пластовый дренаж основания. При отсутствии пластового дренажа основания эти вертикальные скважины могут выполнять функцию сбора и отвода отжатой воды на поверхность – на гребни дамб наращивания.

Для оценки эффективности работы дренажа консолидируемые массивы предполагается оснастить специализированной контрольно-измерительной аппаратурой – датчиками порового давления.

Прогнозные расчеты консолидации и параметров дренажных устройств выполняются с применением современных программных расчетных комплексов, например Plaxis, Midas, Modflow, Feflow и др, позволяющих рассчитывать время консолидации, параметры дренажных устройств, оценивать эффективность технических решений для регулирования консолидации.

В практике имеются примеры применения отдельных описанных выше технологий и элементов дренажа на конкретных объектах: накопитель одного из обогатительных комбинатов в Забайкальском крае, строящийся накопитель грунтового массива продукта обогатительной фабрики в Республике Бурятия и др.

Следует отметить, что на сегодняшний день данные вопросы практически не отражены в нормативной документации, что затрудняет их внедрение. Применение рассмотренных конструкций обосновано не только технико-экономическим сопоставлением выгод, получаемых от образования дополнительного объема емкости накопителя за счет уменьшения объема консолидированного массива, но и всесторонним эффектом за счет повышения надежности и безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений [3].

Заключение

Одним из направлений поиска технических решений для обеспечения надежной и безопасной работы намывных геотехнических массивов и

минимизации их негативного воздействия на окружающую среду является активизация и управление консолидацией складываемых грунтовых массивов из илисто-глинистых фракций. Учитывая возрастающие объемы складываемых материалов, снижение содержания полезных ископаемых в исходных рудах и значительную долю затрат на строительство и эксплуатацию гидротехнических сооружений, данная задача может стать одной из приоритетных при определении рентабельности и экономической эффективности многих горно-обогатительных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Сольский С.В.** Вторичное освоение техногенно-нагруженных территорий. Проблемы и решения. Санкт-Петербург: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2011. 323 с.
2. **Сольский С.В., Зеленский И.Г.** Актуальные конструктивные решения накопителей грунтовых материалов и отходов горно-обогатительных предприятий // Гидротехника. 2022. № 3. С. 56–61. DOI: 10.55326/22278400_2022_3_56.
3. **О безопасности** гидротехнических сооружений: федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/.

REFERENCES

1. Solsky S.V. Secondary development of technogenically loaded territories. Problems and solutions. Saint Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva Publ.; 2011. 324 p. (In Russ.).
2. Solsky S. V., Zelensky I. G. Current design solutions for materials and wastes ponds of ore mining and processing plants. *Hydrotechnika*. 2022;3:56-61. DOI: 10.55326/22278400_2022_3_56. (In Russ.).
3. On the safety of hydraulic structures: national law No. 117-FZ of July 21, 1997. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/. (In Russ.).

Информация об авторах

- С.В. Сольский** – доктор техн. наук, главный научный сотрудник;
О.Н. Котлов – канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения»;
И.Г. Зеленский – начальник отдела проектирования гидротехнических сооружений – главный гидротехник;
К.Р. Биканасова – инженер-проектировщик 2 категории.

Information about the authors

- S.V. Solsky** – Dr. Sci. (Techn.), Chief Researcher;
O.N. Kotlov – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of Department «Foundations, earth and underground structure»;
I.G. Zelensky – Head of the Department for designing hydraulic structures – Chief Hydraulic Engineer;
K.R. Bikanasova – Design Engineer, category 2.

Статья поступила в редакцию 25.11.2022; одобрена после рецензирования 08.12.2022; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 25.11.2022; approved after reviewing 08.12.2022; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 621.643:622.698+620.19

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ В ТРУБЕ ПРИ МНОГОФАЗНОМ ПОТОКЕ НЕФТИ И ГАЗА

Алиреза Тахерифард¹, Виктор Васильевич Елистратов²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

¹ taherifard.a@edu.spbstu.ru

² elistratov@spbtu.ru

Аннотация. В данном исследовании эрозия трубопровода на нефтегазодобычном участке оценивалась при движении многофазного потока с использованием вычислительной гидродинамики (CFD-анализа). Рассмотрены два разных типа труб, горизонтальные и вертикальные с изгибами, для которых моделируются процессы эрозии песком при процентном содержании до 1,7 %. На основе моделирования CFD было получено распределение эрозии в вертикально и горизонтально расположенной трубе.

Ключевые слова: *CFD, эрозия, удар твердых частиц, многофазный поток, турбулентность, труба с двумя коленами*

Для цитирования: Тахерифард А., Елистратов В.В. Численное моделирование эрозии в трубе при многофазном потоке нефти и газа // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 16–28.

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF EROSION IN A PIPE UNDER A MULTI-PHASE OIL AND GAS FLOW

Alireza Taherifard¹, Viktor V. Elistratov²

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

¹ taherifard.a@edu.spbstu.ru

² elistratov@spbtu.ru

Abstract. In this study, pipeline erosion in an oil and gas production area was evaluated concerning multi-phase flow using computational fluid dynamics (CFD analysis). Two different types of pipes are considered, horizontal and vertical with elbows, for which sand erosion processes are modeled at a percentage of up to 1,7 %. Based on the CFD simulation, the erosion distribution in the vertical and horizontal pipe was obtained.

Keywords: *CFD, erosion, particle impact, multiphase flow, turbulence, two elbows pipe*

For citation: Taherifard A., Elistratov V.V. Numerical simulation of erosion in a pipe under a multi-phase oil and gas flow. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:16-28. (In Russ.).

Введение

Эрозию, вызванную твердыми частицами, можно рассматривать как серьезную проблему в нефтегазовой отрасли. Песок всегда увлекается транспортирующей жидкостью, добываемой из скважины. Мелкие твердые

частицы стекают с переносимой жидкостью и ударяются о внутреннюю стенку, клапаны и некоторые другие элементы трубопровода. Они подвергаются высокому риску эрозии твердыми частицами из-за постоянного столкновения, что может привести к неправильной работе оборудования и даже к выходу его из строя. Как сложный процесс эрозия зависит от многих факторов [1–4]. В частности, в трубопроводах небольшое или едва уловимое изменение условий эксплуатации может значительно повлиять на ущерб, вызванный эрозией. Получение точных закономерностей различных влияющих на эрозию факторов необходимо для прогнозирования срока службы трубопроводов. Кроме того, точное прогнозирование эрозии может помочь в обнаружении мест, где с большей вероятностью может произойти сильная эрозия [2]. Предлагается множество моделей эрозии твердых частиц для расчета скорости эрозии различных элементов трубы. Meng и Ludema [5] провели подробное исследование моделей эрозии, разработанных ранее, и обнаружили, что 28 моделей эрозии связаны с ударами твердых частиц, а также определили 33 ключевых параметра, влияющих на скорость эрозии. Несколько моделей эрозии, упомянутых в их работе, широко используются для прогнозирования скорости эрозии изгибов труб, например, модели, предложенные Finnie [6], Bitter [7], Neilson [8], Grant и Tabakoff [9], Hutchings [10]. Обзор показал, что каждая модель была разработана на основе конкретного механизма эрозии, и для практического прогнозирования эрозии нельзя было использовать одно единственное прогностическое уравнение.

С 1990-х годов вычислительная гидродинамика (CFD от англ. computational fluid dynamics) широко используется для прогнозирования эрозии, вызванной твердыми частицами. Метод CFD значительно способствует развитию моделей эрозии, и предложено несколько широко используемых моделей эрозии на основе CFD [11–12]. Chen [13] применил основанную на CFD модель прогнозирования эрозии, разработанную Ahlert [14] и McLaury [15], для прогнозирования относительной эрозии между отводом и забитым тройником с потоком воды и песка. Траектории частиц и картина эрозии были проанализированы с использованием модели отскока частиц Grant и Tabakoff [9]. Wood и его коллеги [16] изучали распределение частиц и условия столкновения частиц в насыщенных частицами жидкостях в горизонтально-вертикальных (H-V) восходящих изгибах трубы. Модель эрозии у Hashish [17] была реализована в программе CFD для изучения влияния углов удара и скорости удара о трубу. Было выявлено, что эрозия всегда происходила в определенных областях. В работе [18] описано исследование эрозии на изгибе малой кривизны и прямолинейном участке трубы вверх по течению. Жидкая фаза была смоделирована с использованием потока шлама. Скорость эрозии стенки в плоскости, рассчитанная по модели эрозии Hashish [17], хорошо согласовывалась с их экспериментальными данными. Huang [19] предложил феноменологическую модель эрозии, основанную на их предыдущем исследовании [20], для расчета скорости эрозии материала в потоке шлама. В работе указывается, что скорость эрозии сильно зависит от средней скорости движения шлама и слабо зависит от диаметра трубы и вязкости жидкости. Скорость эрозии имеет степенную зависимость от диаметра частиц, средней скорости движения шлама, диаметра трубы и вязкости жидкости.

Переходный характер газожидкостных двухфазных потоков с включением песка по-прежнему остается ключевой проблемой в исследованиях многофазных потоков как экспериментально, так и численно. CFD-анализ может предоставить важную информацию о потоке и взаимодействиях между его фазами. Модель объема жидкости (VOF от англ. volume of fluid) – это широко используемый подход для моделирования многофазных течений [21–27], когда существует четкая граница раздела между фазами (например, режимы стратифицированного или пробкового течения). В настоящем исследовании рассмотрено движение многофазных потоков до, между и после двойного колена в вертикально и горизонтально расположенных трубах.

Методы и модели решения задачи

В условиях потока существует четкая и резкая граница раздела между жидкой и газовой фазами. Эта четкая граница раздела была определена в настоящем исследовании с использованием комбинации метода объема жидкости с моделью Эйлера [28]. На границе раздела двух фаз на основе рассчитанной объемной доли к ячейкам, расположенным рядом с границей раздела двух фаз, применяется специальная интерполяционная обработка для определения границы раздела формы с использованием схемы захвата.

Для численного решения основных уравнений массы, импульса, фазовой объемной доли и турбулентности использовался программный комплекс Ansys Fluent версии 19.1. В этом исследовании было выполнено трехмерное (3D) моделирование переходных процессов в предположении, что нефтяная и газовая фазы несжимаемы и между ними отсутствует массоперенос. Дискретно-фазовая модель (DPM от англ. discrete phase model) использовалась для отслеживания частиц и модели эрозии, разработанной Ока [29].

Широко признано, что для конкретного материала поверхности трубы скорость частиц и угол столкновения являются наиболее важными факторами, влияющими на эрозию. В настоящем исследовании используются модели Ока для анализа скорости эрозии в многофазном кольцевом потоке. Ключевые особенности этой модели эрозии следующие:

$$ER(\theta) = 10^{-9} \rho_w E_{90} F(\theta) \quad (1)$$

$$E_{90} = K(Hv)^{k_1} \left(\frac{VP}{V^*} \right)^{k_2} \left(\frac{dP}{d^*} \right)^{k_3} \quad (2)$$

$$F(\theta) = (\sin\theta)^{n_1} (1 + Hv(1 - \sin\theta))^{n_2} \quad (3)$$

$$n_1 = s_1(Hv)^{q_1} \quad (4)$$

$$n_2 = s_2(Hv)^{q_2} \quad (5)$$

$$k_2 = 2,3(Hv)^{0,038} \quad (6)$$

Здесь ρ_w и Hv – плотность стенки трубы и твердость по Виккерсу в кг/м^3 и ГПа соответственно, $d^* = 326$ мкм и $V^* = 10,4$ м/с соответственно – эталонные значения диаметра и скорости частиц. Значения постоянных коэффициентов K , k_1 , k_3 , s_1 , s_2 , q_1 и q_2 приведены для различных стенок

мишени и типов частиц [30]. Значения эмпирических констант модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения эмпирических параметров в модели Ока

Эмпирические параметры	Значение
K	60
k_1	-0,12
k_3	0,19
s_1	0,71
s_2	2,4
q_1	0,14
q_2	-0,94

В настоящем исследовании использовалась модель турбулентности RNG $k - \epsilon$. Уравнения импульса и турбулентности дискретизируются с использованием схемы First Order Upwind [31], а уравнения давления и скорости связаны с алгоритмом SIMPLE с фазовой связью. В дискретных алгебраических уравнениях используется коэффициент недорелаксации 0,3 для уравнений давления, импульса и концентрации межфазной поверхности; 0,5 для объемной доли и 0,6 для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии. Определяющие уравнения решаются в переходной схеме с шагом по времени 0,001 с. Решения считаются сходимыми, когда невязки всех уравнений становятся меньше 10^{-6} . Для достижения сходимости на каждом временном шаге требовалось от 10 до 20 итераций. Время потока установлено на 10 с.

Моделирование области потока рассматривается на отрезке модельной трубы, которая состоит из 3-метровой вертикальной и 1,9-метровой горизонтальной труб, расположенных до и после стандартного 90-градусного колена, а поток жидкости движется от восходящей вертикальной части к горизонтальной. Диаметр модельной трубы 0,0762 м, радиус колена равняется 4D. Такой же размер у горизонтальной трубы.

На рис. 1 показано распределение расчетных сечений. Сечение 1–1 расположено на расстоянии 0,1 м от начального сечения, сечение 2–2 на расстоянии 1,5 м от начального сечения, сечение 3–3 на расстоянии 2,9 м от начального сечения и перед коленом, чтобы показать поведение потока непосредственно перед проходом через колено. Сечение 4–4 находится в середине колена, чтобы показать движение нефтегазового потока в колене. Сечение 5–5 находится в середине прямолинейного участка.

Геометрия трубы была экспортирована в пакет ICEM CFD 21.0 для дискретизации. Расчеты проводились с использованием сеток, содержащих шестигранные ячейки.

Граничные условия. На входе и выходе заданы граничные условия скорости движения газа и нефти и давления на выходе соответственно. На стенке трубы использовалась стандартная функция стенки, предложенная Zhang [4]. На входе была установлена интенсивность турбулентности 5 %.

Чтобы способствовать более быстрому развитию потока, входная поверхность трубы была разделена на две части. Газ вводился в трубу через среднюю часть входного сечения, а нефть вводилась по периметру. Газовая и нефтяная фазы вводились в область со скоростями 25 и 12 м/с соответственно. Принята следующая объемная концентрация смеси: газ – 52,6 %, нефть – 45,7 %, песок – 1,7 %.

В качестве начального условия состояния принято, что вся область трубы заполнена нефтью с нулевой скоростью.

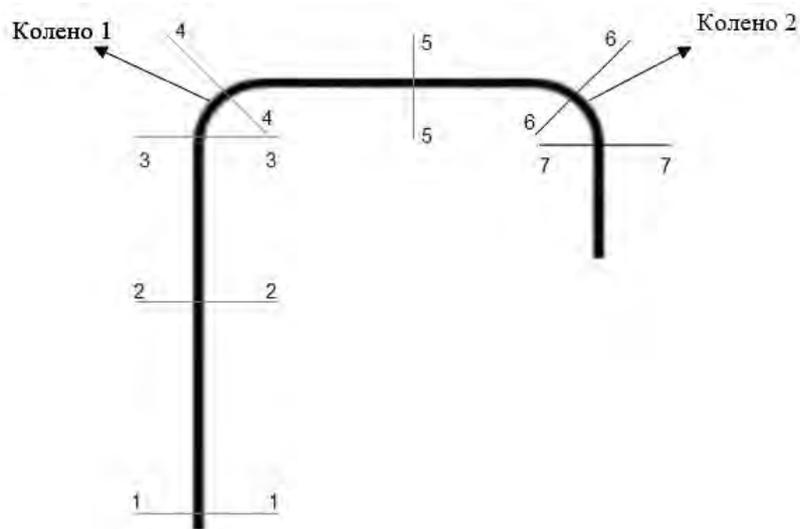


Рис. 1. Границы вычислительной области и расчетные сечения

Результаты и обсуждение

Валидационное исследование. Для настоящего исследования был проведен анализ эрозии для проверки и сравнения с результатами, полученными Parsi [32]. Валидация проводилась с одним отводом на сбивном течении при наличии многофазного потока. Parsi провел эксперименты по определению картины эрозии в стандартном отводе, в то время как режим потока представляет собой вспенивание с использованием неинтрузивных ультразвуковых устройств, а также был представлен анализ CFD. В CFD-анализе частицы песка вводились в область потока и отслеживались с помощью модели DPM, затем скорость эрозии трубы в изгибе учитывалась с помощью модели эрозии, разработанной Ока [29]. Кроме того, скорость эрозии, полученная для случая проверки, сравнивалась со скоростью данных CFD для Parsi, что представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение скорости эрозии – Parsi (2015 г.) и проверочный пример

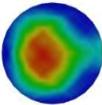
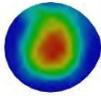
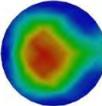
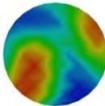
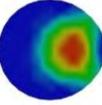
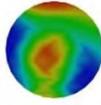
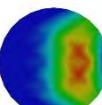
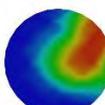
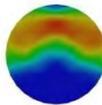
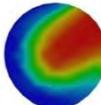
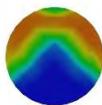
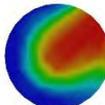
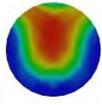
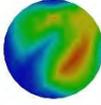
Источник данных	Эрозия, кг/м ²	Разница, %
CFD [32]	4.0E-06	
Валидационное исследование	3.65E-06	8,7

Результаты настоящего исследования показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными Parsi [32].

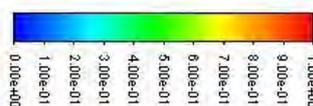
Исследования проводились по определению объемного содержания газа и нефти в общем объеме в 7 сечениях при расположении трубы вертикально и горизонтально. В табл. 3 показана структура течения и распределение объемной доли газа (красный цвет) и нефти (синий цвет) в расчетных сечениях в предположении, что песок не влияет на структуру течения. Переходные цвета от синего к красному в шкале, приведенной в примечании к табл. 3, показывают структуру нефтегазовой смеси с различным содержанием жидкой и газообразной фазы.

Таблица 3

Перенос газонефтяной смеси в вертикальной и горизонтальной трубах

Номер сечения	Вертикальная труба	Горизонтальная труба
Сечение 1–1		
Сечение 2–2		
Сечение 3–3		
Сечение 4–4		
Сечение 5–5		
Сечение 6–6		
Сечение 7–7		

Примечание. Распределение объемного содержания газа (красный цвет соответствует полному заполнению газом) и нефти (синий цвет соответствует полному заполнению нефтью) и их смеси



На основании полученных в сечениях 1–1, 2–2, 3–3 результатов можно сделать вывод, что на вертикальном участке трубы нефть препятствует продвижению газа в сторону стенки из-за своей высокой вязкости и имеет тенденцию находиться на внешней стенке. Газ, как правило, остается в центре перед входом в первое колено. Поведение жидкости указывает на наличие кольцевого течения в вертикальной трубе. По мере того, как поток проходит через первое колено, жидкая фаза нефти стремится к внешней стороне трубы из-за центробежной силы в вертикальной части трубы. После колена 1 (сечение 5–5) при развитии течения через горизонтальную часть трубы наблюдается, что из-за силы тяжести нефть стремится опуститься на дно трубы, что свидетельствует о пробковом течении с пузырьками тумана. Поток перед вторым коленом, по-видимому, имеет тенденцию находиться в стабильной фазе, так как перед вторым коленом мы наблюдаем горизонтальную трубу. В колене (сечение 6–6) наблюдается вспененное течение с появлением нефтяной структуры в средней части сечения из-за инерции движущейся нефти. После второго колена (сечение 7–7) поток имеет тенденцию быть стабильным, при этом газ стремится занять центральную часть трубы.

При движении многофазной жидкости в горизонтальной трубе видно, что объем нефти перед коленом 1 в основном движется в нижней части трубы, где действует сила тяжести, а газ находится в основном в центре трубы. Значительные пузыри газа внутри горизонтальной трубы в сечениях 2–2 и 3–3 перед первым коленом формируют пробковый режим в виде потока тумана с мелкими пузырьками. По мере развития потока наблюдается, что в первом колене и в сечении 4–4 происходит смещение нефти к внешней стороне трубы из-за инерции, и при движении в сторону сечения 5–5 нефть имеет тенденцию смещаться в стационарной фазе на дно трубы за счет силы тяжести. После второго колена в сечениях 6–6 и 7–7 наблюдается вспенивание потока и пробковое течение из-за высокой скорости газа. Поскольку огромный пузырь проходит через сечение 7–7, это свидетельствует о пробковом течении.

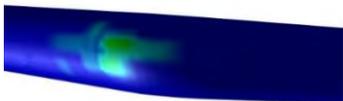
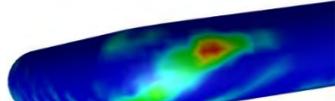
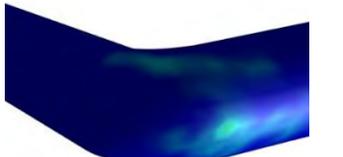
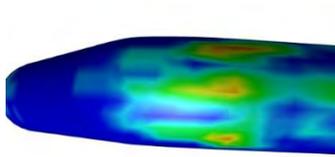
Следующим этапом исследования стала оценка эрозии твердой фазой (песком) в коленах трубопровода. Исследование проводилось при 10-секундном моделировании потока. В табл. 4 показаны контуры эрозии от влияния твердой фазы в многофазном потоке для вертикального и горизонтального расположения трубопровода. Красным цветом на рисунках в табл. 4 показаны места максимальной эрозии. В колене 1 горизонтальной трубы эрозия сильнее примерно под углом 45° к выступу колена и распространяется к выходу колена. Аналогичные закономерности отмечаются для вертикальной трубы, хотя видно, что эрозия в колене 1 наблюдается на внешней стороне трубы и максимальное место эрозии концентрируется между углами 45° и 50° колена. Это согласуется с результатами, представленными Parsi [33] в исследовании пробковых течений, где наблюдалось максимальное место эрозии под углом 45° на внешней стороне колена.

Картина и поведение эрозии в колене 2 различаются в обеих геометриях. Хотя, как и в колене 1, наружная часть колена также подвергается наибольшей эрозии, однако место эрозии становится более заметным и распространяется к выходному сечению колена. В горизонтальной трубе максимальное место эрозии находится примерно под углом 30° от начала

колена, и место эрозии остается более четким на внешней части колена. Это может быть результатом воздействия обладающего высокой скоростью кольцевого потока смеси газа и нефти, который оказывает большее влияние на частицы в направлении колена 2. С другой стороны, в вертикальной трубе большая часть частиц имеет тенденцию к распространению по трубе в колене 2, которое затягивается жидкостью. Расположение максимальной эрозии в вертикальной трубе в колене 2, произошло под углами от 30° до 40°, что аналогично колену 2 в горизонтальной трубе.

Таблица 4

Форма эрозии в коленах 1 и 2 для горизонтальной и вертикальной трубы

Трубы	Колено 1	Колено 2
Горизонтальная		
Вертикальная		

На рис. 2 представлены значения максимальной скорости эрозии в вертикальной и горизонтальной трубе для колен 1 и 2. Показано, что максимальная скорость эрозии наблюдается в горизонтальной трубе в колене 1 и составляет $1,85 \cdot 10^{-7}$ кг/м², а в колене 2 – $4,62 \cdot 10^{-7}$ кг/м². В вертикальной трубе максимальная скорость эрозии в колене 1 равна $9,83 \cdot 10^{-8}$, а в колене 2 – $2,46 \cdot 10^{-7}$ кг/м².

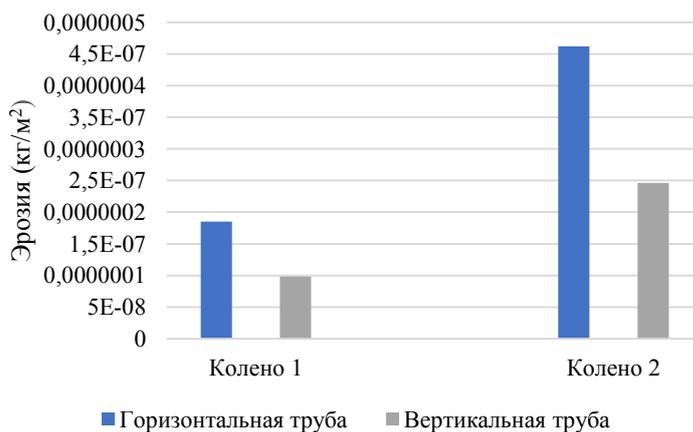


Рис. 2. Максимальная скорость эрозии в трубе

Максимальный вынос материала при эрозии в вертикальной трубе намного меньше, чем в горизонтальной. Это может быть связано с тем, что

в горизонтальной трубе мы наблюдаем поток смеси с устойчивым поведением нефти, которая имеет тенденцию оставаться на дне трубы и позволяет песку проходить через трубу. Такой же результат наблюдался в исследовании анализа эрозии, проведенном Peng [34] при эксперименте с кольцевым потоком. При высокой скорости газа в кольцевом потоке песок обладает большой энергией столкновения. После столкновения песка со стенкой трубы на поверхности экспериментальной модели образовывались ямки и глубокие царапины.

Таким образом, можно заключить, что в вертикальной трубе при наличии кольцевого потока наблюдается меньшая эрозия, чем в горизонтальной трубе. Причину можно обнаружить в состоянии трубы, что приводит к изменению места подачи нефти. В целом, присутствие жидкости естественным образом снижает скорость эрозии при заданном расходе газа. Поскольку нефть имеет тенденцию оставаться на дне трубы, газ переносит частицы песка, которые имеют относительно высокую скорость в кольцевом потоке, и в результате эрозия является наиболее сильной, когда частицы транспортируются в системах с преобладанием газа.

Заключение

1. Размер эрозии, возникающей в вертикальной трубе, значительно меньше, чем в горизонтальной. Большую роль в эрозии играет высокая вязкость нефти, так как она уносит частицы песка по трубе, при этом присутствие песка в газовой фазе не наблюдалось.

2. Отмечено, что в горизонтальной и вертикальной трубах поток перед первым коленом формируется в виде кольцевого потока с постоянным пробковым течением. После первого колена поток в вертикальной трубе имеет тенденцию оставаться в стратифицированной фазе, и из-за наличия волнового характера происходит вспенивание потока. В горизонтальной трубе наблюдается пробковое течение, а после второго колена имеется тенденция формирования кольцевого потока.

3. В колене 2 наблюдается большая эрозия, чем в колене 1. Накопление нефти перед коленом 1 формирует более толстую пленку жидкости в колене потока, что приводит к снижению скорости эрозии колена 1, так как существует прямая зависимость между скоростью удара частиц и скоростью эрозии. Жидкая пленка обеспечивает эффект амортизации, который уменьшает интенсивность, с которой ускоряющиеся частицы песка ударяются о стенку трубы. Частицы песка должны прорезаться сквозь пленку жидкости, прежде чем попасть на стенку трубы и разрушить ее. Толщина пленки жидкости вокруг колена является одной из причин, по которой может быть сложно спрогнозировать точное местоположение эрозии в колене 1.

4. Важно отметить увеличение объемной доли газовой фазы возле колена 2 по сравнению с коленом 1 в вертикальной и горизонтальной трубах. Устанавливается соответствующая зависимость: чем выше объемная доля газа в коленах, тем выше скорость эрозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Solnordal C.B., Wong C.Y., Boulanger J.** An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow // *Wear*. 2015. № 336. P. 43–57. DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.017.

2. **Pereira G.C., de Souza F.J., de Moro Martins D.A.** Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows // *Powder Technology*. 2014. № 261. P. 105–117.
3. **Jafari M., Mansoori Z., Avval M.S., Ahmadi G., Ebadi A.** Modeling and numerical investigation of erosion rate for turbulent two-phase gas–solid flow in horizontal pipes // *Powder technology*. 2014. № 267. P. 362–370.
4. **Zhang Y., Reuterfors E.P., McLaury B.S., Shirazi S.A., Rybicki E.F.** Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows // *Wear*. 2007. № 263 (1–6). P. 330–338.
5. **Meng H.C., Ludema K.C.** Wear models and predictive equations: their form and content // *Wear*. 1995. № 181. P. 443–457.
6. **Finnie I.** Erosion of surfaces by solid particles // *Wear*. 1960. № 3(2). P. 87–103.
7. **Bitter J.G.A.** A study of erosion phenomena, part I // *Wear*. 1963. № 6(1). P. 5–21.
8. **Neilson J.H., Gilchrist A.** Erosion by a stream of solid particles // *Wear*. 1968. № 11(2). P. 111–122.
9. **Grant G., Tabakoff W.** Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles // *Journal of Aircraft*. 1975. № 12 (5). P. 471–478.
10. **Hutchings I.M., Winter R.E., Field J.E.** Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1976. № 348 (1654). P. 379–392.
11. **Njobuenwu D.O., Fairweather M.** Modelling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions // *Computers & Chemical Engineering*. 2012. № 42. P. 235–247.
12. **Parsi M., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., McLaury B.S., Shirazi S.A.** A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2014. № 21. P. 850–873.
13. **Chen X., McLaury B.S., Shirazi S.A.** Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow // *Wear*. 2006. № 261(7–8). P. 715–729.
14. **Ahlert K.R.** Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel. University of Tulsa, 1994.
15. **McLaury B.S.** Predicting solid particle erosion resulting from turbulent fluctuations in oilfield geometries. The University of Tulsa, 1996.
16. **Wood R.J.K., Jones T.F., Miles N.J., Ganeshalingam J.** Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends // *Wear*. 2001. № 250 (1–12). P. 770–778.
17. **Hashish M.** An improved model of erosion by solid particle impact // *Erosion by Liquid and Solid Impact, Seventh International Conference*. 1987. Paper 66.
18. **Wood R.J.K., Jones T.F., Ganeshalingam J., Miles N.J.** Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts // *Wear*. 2004. № 256 (9–10). P. 937–947.
19. **Huang C., Minev P., Luo J., Nandakumar K.** A phenomenological model for erosion of material in a horizontal slurry pipeline flow // *Wear*. 2010. № 269 (3–4). P. 190–196.
20. **Huang C., Chiovelli S., Minev P., Luo J., Nandakumar K.** A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow // *Powder Technology*. 2008. № 187 (3). P. 273–279.
21. **Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S., Shirazi S.A., Schleicher E., Hampel U.** Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas–liquid churn flow // *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. № 105. P. 71–84.
22. **Da Riva E., Del Col D.** Numerical simulation of churn flow in a vertical pipe // *Chemical Engineering Science*. 2009. № 64(17). P. 3753–3765.

23. **Hernandez-Perez V., Abdulkadir M., Azzopardi B.J.** Grid generation issues in the CFD modelling of two-phase flow in a pipe // *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2011. № 3(1). P. 13–26.
24. **Ratkovich N., Majumder S.K., Bentzen T.R.** Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas–liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction // *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. № 91 (6). P. 988–998.
25. **Karami H., Torres C.F., Parsi M., Pereyra E., Sarica C.** CFD simulations of low liquid loading multiphase flow in horizontal pipelines // *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014. № 46261. P. V002T06A011.
26. **Saad S. Ben, Gentric C., Fourmigué J.-F., Clement P., Leclerc J.-P.** CFD and experimental investigation of the gas-liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger // *Chemical engineering research and design*. 2014. № 92(11). P. 2361–2370.
27. **Bortolin S., Da Riva E., Del Col D.** Condensation in a square minichannel: application of the VOF method // *Heat Transfer Engineering*. 2014. № 35 (2). P. 193–203.
28. **Akhlaghi M., Mohammadi V., Nouri N.M., Taherkhani M., Karimi M.** Multi-fluid VoF model assessment to simulate the horizontal air-water intermittent flow // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. № 152. P. 48–59.
29. **Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T.** Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation // *Wear*. 2005. № 259 (1–6). P. 95–101.
30. **Oka Y.I., Ohnogi H., Hosokawa T., Matsumura M.** The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact // *Wear*. 1997. № 203. P. 573–579.
31. **Haider J., Lee C.H., Gil A.J., Bonet J.** A first-order hyperbolic framework for large strain computational solid dynamics: an upwind cell centred total Lagrangian scheme // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2017. № 109 (3). P. 407–456.
32. **Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S., Shirazi S.A.** CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. № 27. P. 706–718.
33. **Parsi M., Kara M., Agrawal M., Kesana N., Jatale A., Sharma P., Shirazi S.** CFD simulation of sand particle erosion under multiphase flow conditions // *Wear*. 2017. № 376. P. 1176–1184.
34. **Peng W., Ma L., Wang P., Cao X., Xu K., Miao Y.** Experimental and CFD investigation of flow behavior and sand erosion pattern in a horizontal pipe bend under annular flow // *Particuology*. 2023. № 75. P. 11–25.

REFERENCES

1. Solnordal C.B., Wong C.Y., Boulanger J. An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow. *Wear*. 2015;336:43-57.
2. Pereira G.C., de Souza F.J., de Moro Martins D.A. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows. *Powder Technology*. 2014;261:105-117.
3. Jafari M., Mansoori Z., Avval M.S., Ahmadi G., Ebadi A. Modeling and numerical investigation of erosion rate for turbulent two-phase gas–solid flow in horizontal pipes. *Powder technology*. 2014;267:362-370.
4. Zhang Y., Reuterfors E.P., McLaury B.S., Shirazi S.A., Rybicki E.F. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows. *Wear*. 2007;263(1-6):330-338.
5. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*. 1995;181:443-457.
6. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*. 1960;3(2):87-103.
7. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena, part I. *Wear*. 1963;6(1);5-21.

8. Neilson J.H., Gilchrist A. Erosion by a stream of solid particles. *Wear*. 1968;11(2):111-122.
9. Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. *Journal of Aircraft*. 1975;12(5):471-478.
10. Hutchings I.M., Winter R.E., Field J.E. Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1976;348(1654):379-392.
11. Njobuenwu D.O., Fairweather M. Modelling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions. *Computers & Chemical Engineering*. 2012;42:235-247.
12. Parsi M., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., McLaury B.S., Shirazi S.A. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2014;21:850-873.
13. Chen X., McLaury B.S., Shirazi S.A. Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow. *Wear*. 2006;261(7-8):715-729.
14. Ahlert K.R. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel. University of Tulsa; 1994.
15. McLaury B.S. Predicting solid particle erosion resulting from turbulent fluctuations in oilfield geometries. The University of Tulsa; 1996.
16. Wood R.J.K., Jones T.F., Miles N.J., Ganeshalingam J. Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends. *Wear*. 2001;250(1-12):770-778.
17. Hashish M. An improved model of erosion by solid particle impact. *Erosion by Liquid and Solid Impact, Seventh International Conference*. 1987. Paper 66.
18. Wood R.J.K., Jones T.F., Ganeshalingam J., Miles N.J. Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts. *Wear*. 2004;256(9-10): 937-947.
19. Huang C., Minev P., Luo J., Nandakumar K. A phenomenological model for erosion of material in a horizontal slurry pipeline flow. *Wear*. 2010;269(3-4):190-196.
20. Huang C., Chiovelli S., Minev P., Luo J., Nandakumar K. A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow. *Powder Technology*. 2008;187(3):273-279.
21. Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S., Shirazi S.A., Schleicher E., Hampel U. Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016;105:71-84.
22. Da Riva E., Del Col D. Numerical simulation of churn flow in a vertical pipe. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(17):3753-3765.
23. Hernandez-Perez V., Abdulkadir M., Azzopardi B.J. Grid generation issues in the CFD modelling of two-phase flow in a pipe. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2011;3(1):13-26.
24. Ratkovich N., Majumder S.K., Bentzen T.R. Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas-liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013;91(6):988-998.
25. Karami H., Torres C.F., Parsi M., Pereyra E., Sarica C. CFD simulations of low liquid loading multiphase flow in horizontal pipelines. *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014;46261:V002T06A011.
26. Saad S. Ben, Gentric C., Fourmigué J.-F., Clement P., Leclerc J.-P. CFD and experimental investigation of the gas-liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger. *Chemical engineering research and design*. 2014;92(11):2361-2370.
27. Bortolin S., Da Riva E., Del Col D. Condensation in a square minichannel: application of the VOF method. *Heat Transfer Engineering*. 2014;35(2):193-203.
28. Akhlaghi M., Mohammadi V., Nouri N.M., Taherkhani M., Karimi M. Multi-fluid VoF model assessment to simulate the horizontal air-water intermittent flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019;152:48-59.

29. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*. 2005;259(1-6):95-101.
30. Oka Y.I., Ohnogi H., Hosokawa T., Matsumura M. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*. 1997;203:573-579.
31. Haider J., Lee C.H., Gil A.J., Bonet J. A first-order hyperbolic framework for large strain computational solid dynamics: an upwind cell centred total Lagrangian scheme. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2017;109(3):407-456.
32. Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S., Shirazi S.A. CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;27:706-718.
33. Parsi M., Kara M., Agrawal M., Kesana N., Jatale A., Sharma P., Shirazi S. CFD simulation of sand particle erosion under multiphase flow conditions. *Wear*. 2017;376:1176-1184.
34. Peng W., Ma L., Wang P., Cao X., Xu K., Miao Y. Experimental and CFD investigation of flow behavior and sand erosion pattern in a horizontal pipe bend under annular flow. *Particuology*. 2023;75:11-25.

Информация об авторах

В.В. Елистратов – доктор техн. наук, профессор;
А. Тахерифард – аспирант.

Information about the authors

V.V. Elistratov – Dr. Sci. (Techn.), Professor;
A. Taherifard – postgraduate student.

Статья поступила в редакцию 25.01.2023; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 25.01.2023; approved after reviewing 18.02.2022; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 627.824.012.4:627.824.7

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕТОННОЙ ПЛОТИНЫ БУРЕЙСКОЙ ГЭС С УЧЕТОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ШВОВ

Виктор Васильевич Толстик¹, Яра Вахиб Юссеф²

^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия

¹ TolstikovVV@mgsu.ru, victor_tolstikov@mail.ru

² yarayoussef2811@hotmail.com

Аннотация. Целью исследования является оценка достоверности математического моделирования системы «бетонная гравитационная плотина Бурейской ГЭС – скальное основание» при изучении ее несущей способности и сопоставление результатов математического и физического моделирования. Расчеты несущей способности плотины выполнены с помощью программного комплекса CRACK, разработанного на основе метода конечных элементов. Результаты математического моделирования показали, что несущая способность недостаточно омоноличенной плотины оказалась ниже на 9 % по сравнению с монолитным вариантом, что совпадает с результатами физического моделирования. Доказана достоверность математического моделирования разрушения плотины.

Ключевые слова: математическое моделирование, бетонная гравитационная плотина, межстолбчатый шов, коэффициент перегрузки, несущая способность, метод конечных элементов, программный комплекс CRACK

Для цитирования: Толстик В.В., Юссеф Я.В. Оценка достоверности математического моделирования бетонной плотины Бурейской ГЭС с учетом строительных швов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 29–38.

Original article

RELIABILITY ASSESSMENT OF MATHEMATICAL MODELING OF BUREYSKAYA HPP'S CONCRETE DAM WITH CONSIDERATION OF CONSTRUCTION JOINTS

Viktor V. Tolstikov¹, Yara Waheeb Youssef²

^{1,2} National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

¹ TolstikovVV@mgsu.ru, victor_tolstikov@mail.ru

² yarayoussef2811@hotmail.com

Abstract. The aim of this research is to assess the reliability of mathematical modeling of the system «concrete gravity dam of Bureyskaya HPP – rock foundation» when studying its bearing capacity by comparing the results of mathematical and physical modeling. Calculations of the dam's bearing capacity were carried out using the software complex CRACK developed based on the finite element method. The results of mathematical modeling of the dam's failure showed that the bearing capacity of the insufficiently grouted dam is 9 % less than that of the monolithic dam, and this agrees with the results of the physical modelling. The reliability of mathematical modeling of dam's failure has been proven.

Keywords: *mathematical modeling, concrete gravity dam, inter-columnar joint, overload factor, bearing capacity, finite element method, software complex CRACK*

For citation: Tolstikov V.V., Youssef Ya.W. Reliability assessment of mathematical modeling of Bureyskaya HPP's concrete dam with consideration of construction joints. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:29–38. (In Russ.).

Введение

В настоящее время математическое моделирование используется в различных областях науки и техники благодаря уменьшению затрат и времени по сравнению с методами физического моделирования. Математическое моделирование методом конечных элементов (МКЭ) считается важным методом для анализа поведения плотин в предельном состоянии [1, 2].

Объектом исследования является бетонная гравитационная плотина Бурейской ГЭС, которая представляет собой уникальную плотину, так как она построена с применением технологии укатанного бетона в суровых климатических условиях. Поскольку укатанный бетон является неморозостойким бетоном, в конструкции плотины Бурейской ГЭС вибрированный бетон защищает массив укатанного бетона как на напорной, так и на низовой грани плотины. Из-за температурных деформаций при усадке и остывании бетона между верховым столбом и низовым клином плотины образуется вертикальный межстолбчатый шов, который требует цементации [1].

В статье приведены результаты оценки достоверности математического моделирования системы «бетонная гравитационная плотина Бурейской ГЭС – скальное основание» при изучении ее несущей способности и сопоставление результатов математического и физического моделирования.

Материалы и методы

Созданы две математические модели системы «бетонная гравитационная плотина Бурейской ГЭС – скальное основание» в соответствии с данными экспериментальных исследований, выполненных ранее на кафедре гидротехнических сооружений МИСИ им. В.В. Куйбышева². Достоверность математического моделирования плотины оценивалась путем сопоставления качественных схем математических моделей разрушения плотины и их количественных величин перегрузки при разрушении с результатами физических моделей.

Физические модели бетонной гравитационной плотины Бурейского гидроузла

Рассмотрены две физические модели, выполненные ранее на кафедре гидротехнических сооружений МИСИ им. В.В. Куйбышева применительно к бетонной гравитационной плотине Бурейского гидроузла. Эксперименты выполнялись на упругохрупких моделях, изготовленных в масштабе 1:200. Физическая модель № 1 представляет собой монолитную плотину, имеющую только горизонтальные ослабленные швы через каждые 6 м. Физиче-

² Прежнее название НИУ МГСУ.

ская модель № 2 представляет собой недостаточно омоноличенную плотину, имеющую горизонтальные ослабленные швы через каждые 6 м и вертикальный межстолбчатый шов. Прочность на растяжение по вертикальному межстолбчатому шву равна нулю. Основание моделей № 1 и 2 представляет собой однородное монолитное тело. Контактный шов между плотиной и основанием в физических моделях № 1 и 2 не моделировали, а выполнили его с заведомо повышенной прочностью. Прочностные характеристики материалов системы «плотина – основание» для физических моделей № 1 и 2 приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1

Прочность на сжатие материалов системы «плотина – основание» для физических моделей № 1 и 2 [3]

Материалы моделей № 1 и 2	Прочность на сжатие, $R_{сж,пл}$ (МПа)
Материал плотины (гипс)	7 (M150) (B10)
Материал основания	5

Характеристики горизонтальных швов для физических моделей № 1 и 2 приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Характеристики горизонтальных швов для физических моделей № 1 и 2 [3]

Характеристика	Величина
Сцепление C , МПа	$\approx 0,6$
Угол внутреннего трения $tg\varphi$, φ°	0,66 (33,43°)
Прочность на растяжение R_p , МПа	≈ 0

Математические модели бетонной гравитационной плотины Бурейского гидроузла

Фрагмент созданной конечно-элементной сетки системы «плотина – основание» с учетом строительных швов показан на рис. 1. Число узлов сетки составляет 2697, а число конечных элементов – 2562.

Свойства материалов системы «плотина – основание» для математических моделей № 1 и 2 приведены в табл. 3.

Характеристики горизонтальных строительных швов плотины и контактного шва между плотиной и основанием для математических моделей № 1 и 2 приведены в табл. 4.

Характеристики межстолбчатого шва для математической модели № 2 приведены в табл. 5.

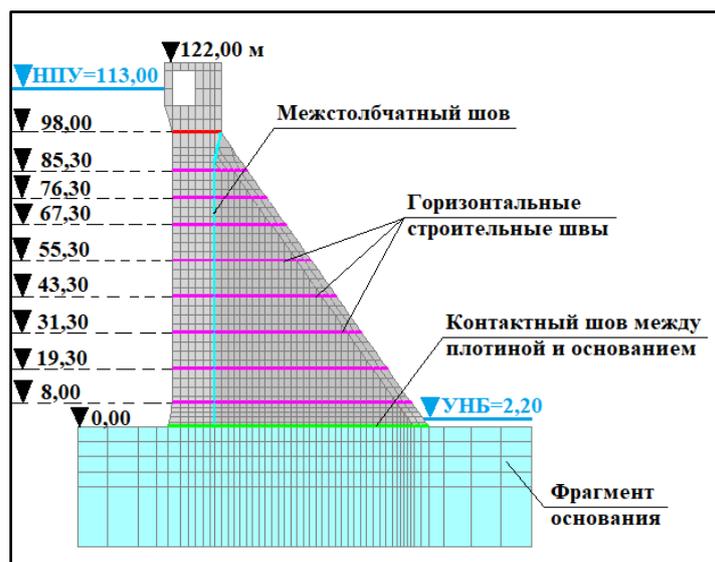


Рис. 1. Фрагмент созданной конечно-элементной сетки системы «плотина – основание» с учетом строительных швов

Таблица 3

**Свойства материалов системы «плотина – основание»
для математических моделей № 1 и 2**

Материал	Объемный вес, кН/м ³	Коэффициент Пуассона, ν	Модуль упругости, E , МПа	Прочность на сжатие, R_c (МПа)	Прочность на растяжение R_t , МПа
Материал плотины (гипс)	23,5	0,15	30500	7,0	0,78
Материал основания	0	0,24	17000	5,0	0,25

Таблица 4

**Характеристики горизонтальных строительных швов плотины
и контактного шва для математических моделей № 1 и 2**

Характеристика	Горизонтальные строительные швы	Контактный шов
Касательная жесткость, МПа/м	20 000	10 000
Нормальная жесткость, МПа/м	60 000	25 000
Сцепление C , МПа	0,6	300
Угол внутреннего трения $\text{tg}\varphi$, φ°	0,66 (33,43°)	1,73 (60°)
Прочность на растяжение R_p , МПа	0,1	30
Предельное закрытие δ_{max} , мм	0,5	1

Характеристики межстолбчатого шва для математической модели № 2

Характеристика межстолбчатого шва	Математическая модель № 2
Касательная жесткость, МПа/м	100
Нормальная жесткость, МПа/м	300
Сцепление C , МПа	0,1
Угол внутреннего трения $\operatorname{tg}\varphi$, φ°	0,7 (35°)
Прочность на растяжение R_p , МПа	0,1
Предельное закрытие δ_{\max} , мм	2

Методика исследования с помощью программного комплекса CRACK

Методика исследования основана на математическом моделировании МКЭ с помощью программного комплекса CRACK, разработанного на кафедре гидравлики и гидротехнического строительства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). Вычислительный комплекс предназначен для численного решения задач деформирования, разрушения и оценки несущей способности на основе МКЭ. Особенностью предлагаемой математической модели, реализованной в программном комплексе CRACK, является возможность учета отдельных крупных нарушений сплошности математической области (трещины, разломы, швы и т. д.) в явном виде с использованием в математической схеме модифицированного контактного элемента [1, 4, 5].

Расчеты несущей способности плотины выполнены при действии статических нагрузок основного сочетания: собственного веса плотины, гидростатического давления на напорную и низовую грани плотины и фильтрационного противодействия на подошву плотины. Расчеты производились в нелинейной постановке при уровне воды в верхнем бьефе, соответствующем нормальному подпорному уровню (НПУ = 113 м).

Метод изучения несущей способности физических и математических моделей плотины

Физические и математические модели доводились до разрушения путем увеличения горизонтальной сдвигающей нагрузки. Несущая способность плотины характеризуется коэффициентом перегрузки, который определяется как отношение предельной сдвигающей нагрузки к расчетной.

Коэффициент перегрузки рассчитывается по формуле [2, 3]:

$$n = Q_n / Q_p,$$

где n – коэффициент перегрузки; Q_n – предельная горизонтальная сдвигающая нагрузка (перегрузка достигалась за счет увеличения давления воды

со стороны верхнего бьефа); Q_p – расчетная горизонтальная сдвигающая нагрузка.

Наступление предельного состояния плотины при математическом моделировании определяется с помощью графика зависимости горизонтального перемещения гребня плотины от коэффициента перегрузки. После потери плотиной несущей способности зависимость горизонтального перемещения гребня плотины от коэффициента перегрузки имеет неза-
тухающий характер.

Результаты математического моделирования разрушения монолитной плотины

На рис. 2, а показана схема разрушения (состояние элементов) системы «монолитная плотина – основание» для математической модели № 1 при коэффициенте перегрузки $n = 2,03$ с количеством итераций 100. Разрушение монолитной плотины произошло за счет раскрытия горизонтального строительного шва на отметке 8 м и сдвига по оставшейся части этого шва с одновременным разрушением бетона низового клина плотины в нижней части в условиях сжатия.

Схема разрушения плотины, полученная на математической модели № 1 (рис. 2, а) была сопоставлена со схемой разрушения физической модели № 1 (рис. 2, б). Повышение сдвигающей нагрузки на физическую модель № 2 до $n = 1,3$ привело к образованию трещины в основании. При коэффициенте перегрузки $n = 1,7-1,8$ в конструкции плотины наблюдалось раскрытие шва с верховой стороны и появление отдельных трещин в теле сооружения. При коэффициенте перегрузки $n = 2$ произошел откол низового носка плотины, а затем при $n = 2,05$ – сдвиг конструкции по ступенчатой поверхности [3].

Характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) монолитной плотины при математическом моделировании ее разрушения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики НДС монолитной плотины при математическом моделировании ее разрушения

Характеристика	Величина
Максимальное горизонтальное перемещение гребня плотины по направлению X, U_x	8,1 см
Максимальное перемещение гребня плотины по направлению Y, V_y	1,6 см
Главное растягивающее напряжение, σ_1	0,78 МПа (показано на рис. 2)
Главное сжимающее напряжение, σ_2	– 10,18 МПа > $R_{с,6} = 7$ МПа (показано на рис. 2)

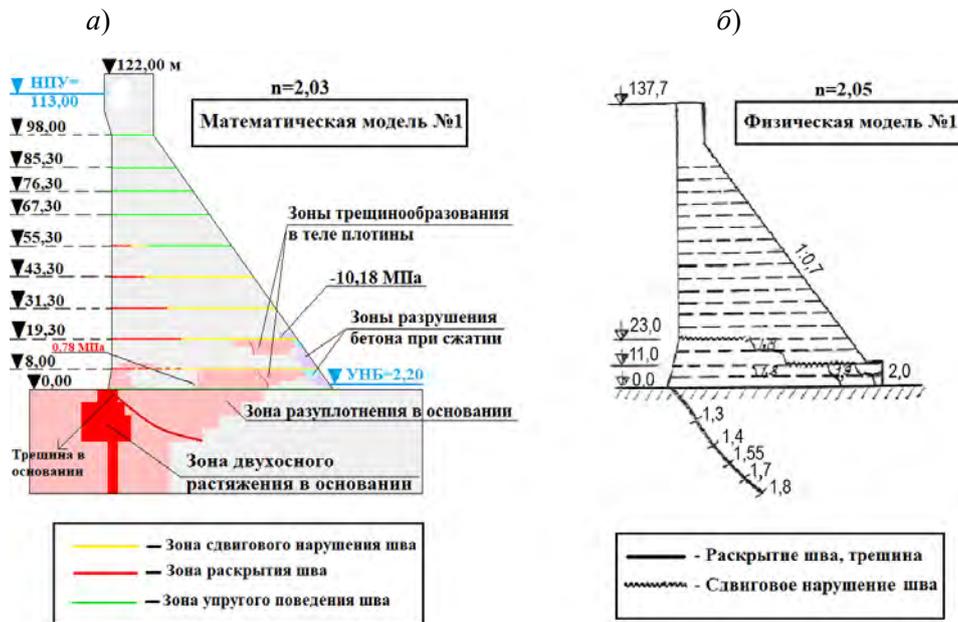


Рис. 2. Схема разрушения (состояние элементов) системы «монолитная плотина – основание»: а – для математической модели № 1 [авторы]; б – для физической модели № 1 [3]

Результаты математического моделирования разрушения недостаточно омоноличенной плотины

На рис. 3, а показана схема разрушения (состояние элементов) системы «недостаточно омоноличенная плотина – основание» для математической модели № 2 при коэффициенте перегрузки $n = 1,85$ с количеством итераций 200. Разрушение недостаточно омоноличенной плотины произошло за счет раскрытия горизонтального строительного шва на отметке 8 м и сдвига по оставшейся части этого шва с одновременным трещинообразованием в теле плотины и разрушением бетона низового клина плотины в нижней части в условиях сжатия.

Схема разрушения, полученная на математической модели № 2, (рис. 3, а) была сопоставлена со схемой разрушения физической модели № 2 (рис. 3, б). Увеличение коэффициента перегрузки на физическую модель № 2 до $n = 1,5$ привело к раскрытию горизонтальных швов на отметках 11,0 и 35 м. Дальнейшее повышение коэффициента перегрузки привело к появлению первых трещин в области низового носка и потере несущей способности – сдвигу по ступенчатой поверхности при $n = 1,82$ [3].

Характеристики НДС недостаточно омоноличенной плотины при математическом моделировании ее разрушения приведены в табл. 7.

График зависимости горизонтального перемещения гребня плотины от коэффициента перегрузки для математической модели

Графики зависимости горизонтального перемещения гребня плотины от коэффициента перегрузки для математических моделей монолитной и

недостаточно омоноличенной плотин показаны на рис. 4. Монолитная плотина теряет свою несущую способность при коэффициенте перегрузки $n = 2,03$, а недостаточно омоноличенная плотина – при коэффициенте перегрузки $n = 1,85$. Полученные результаты согласуются с результатами физического моделирования [3].

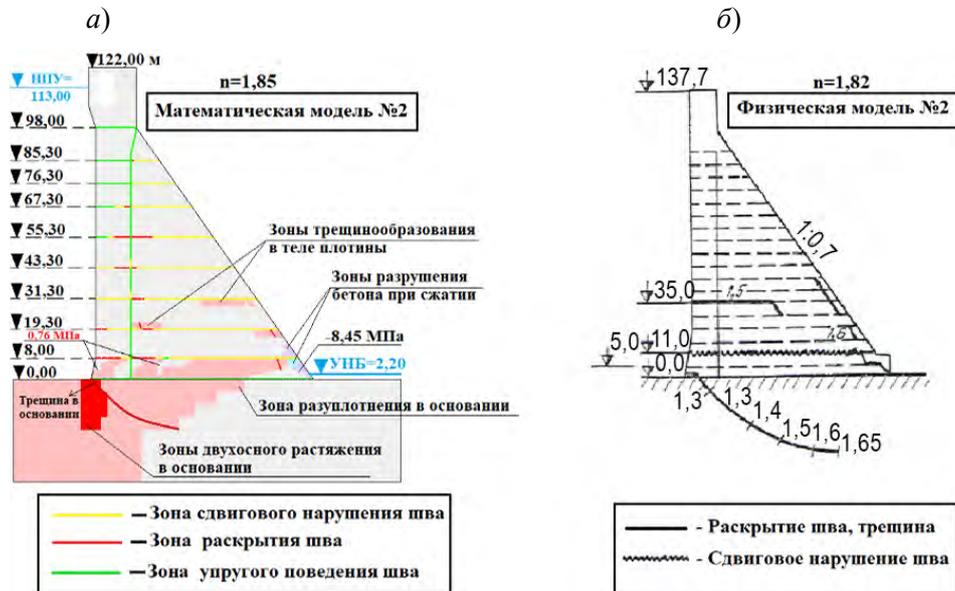


Рис. 3. Схема разрушения (состояние элементов) системы «недостаточно омоноличенная плотина – основание»: а – для математической модели № 2 [авторы]; б – для физической модели № 2 [3]

Таблица 7

Характеристики НДС недостаточно омоноличенной плотины при математическом моделировании ее разрушения

Характеристика	Величина
Максимальное горизонтальное перемещение гребня плотины по направлению X, u	11 см
Максимальное перемещение гребня плотины по направлению Y, v	1,4 см
Главное растягивающее напряжение, σ_1	0,76 МПа (показано на рис. 3)
Главное сжимающее напряжение, σ_2	-8,45 МПа > $R_{c,6} = 7$ МПа (показано на рис. 3)

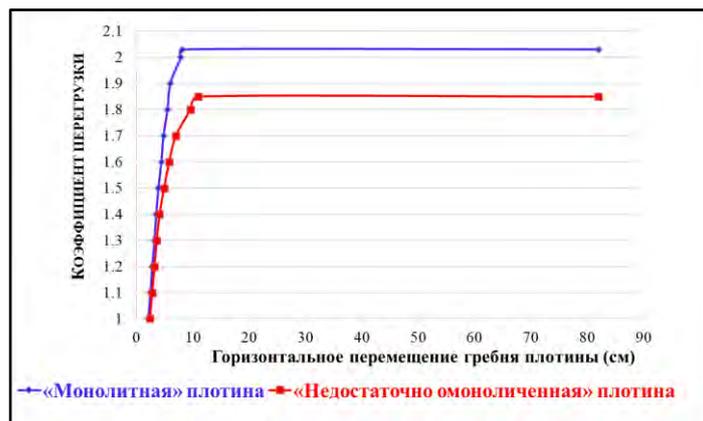


Рис. 4. Графики зависимости горизонтального перемещения гребня плотины (U_{\max}) от коэффициента перегрузки (n) для математических моделей монолитной и недостаточно омоноличенной плотин

Заключение

1. Математическое моделирование разрушения системы «бетонная гравитационная плотина Бурейской ГЭС – скальное основание» с помощью программного комплекса CRACK достоверно и позволяет надежно выполнять дальнейшие исследования.

2. Несущая способность недостаточно омоноличенной плотины математической модели оказалась ниже на 9 % по сравнению с монолитным вариантом (при коэффициенте перегрузки от $n = 2,03$ до $n = 1,85$), что хорошо согласуется с результатами физического моделирования, которые показали, что несущая способность недостаточно омоноличенной плотины оказалась ниже на 11 % по сравнению с монолитным вариантом (при коэффициенте перегрузки от $n = 2,05$ до $n = 1,82$).

3. При моделировании швов бетонной плотины, имеющих малую допустимую относительную деформацию (от 0,5 до 2 мм), необходимо в явном виде моделирование возможности смыкания швов, которую обеспечивает программный комплекс CRACK.

4. Метод конечных элементов с использованием соответствующих моделей поведения материалов системы «плотина – основание», а также моделей работы швов и трещин позволяет исследовать работу бетонной плотины в предельном состоянии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Толстиков В.В. Моделирование работы швов и трещин в расчетах напряженно-деформированного состояния бетонных плотин // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 123–132.

2. Tolstikov V., Youssef Ya.W. Impact of Construction Seams on the Bearing Capacity of a CVC-RCC Combined Dam // Proceedings of FORM 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 170. P. 371–382. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_35.

3. Орехов В.Г., Елизаров Е.Н., Шимельмиц Г.И., Ложкин А.Н. Экспериментальные исследования статической работы немоноличиваемой бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС // Энергетическое строительство. 1983. № 9. С. 71–73.

4. Зерцалов М.Г., Иванов В.А., Толстиков В.В. Реферат программы Crack («Трещина») // Механика грунтов, оснований и фундаментов. 1988. № 2.

5. Зерцалов М.Г., Толстиков В.В. Учет упругопластической работы бетонных плотин и скальных оснований в расчетах с использованием МКЭ // Гидротехническое строительство. 1988. № 8. С. 33–36.

REFERENCES

1. Tolstikov V.V. Simulation of the work of joints and cracks in the calculations of the stress-strain state of concrete dams. *Vestnik MGSU*. 2006;2:123-132. (In Russ.).

2. Tolstikov V., Youssef Ya.W. Impact of Construction Seams on the Bearing Capacity of a CVC-RCC Combined Dam. *Proceedings of FORM 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;170: 371-382. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_35.

3. Orekhov V.G., Elizarov E.N., Shimelmits G.I., Lozhkin A.N. Experimental studies of the static operation of the non-homologated concrete gravity dam of the Bureyskaya HPP. *Energeticheskoye stroitel'stvo*. 1983;9: 71-73. (In Russ.).

4. Zertsalov M.G., Ivanov V.A., Tolstikov V.V. Summary of the Crack program («Treshchina»). *Mekhanika gruntov, osnovaniy i fundamentov*. 1988;2. (In Russ.).

5. Zertsalov M.G., Tolstikov V.V. Accounting the elastic-plastic work of concrete dams and rock foundations in calculations using the finite element method. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 1988;8:33-36. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Толстиков – канд. техн. наук, доцент;

Я.В. Юссеф – аспирантка.

Information about the authors

V.V. Tolstikov – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor;

Ya.W. Youssef – postgraduate student.

Статья поступила в редакцию 15.01.2023; одобрена после рецензирования 07.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 15.01.2023; approved after reviewing 07.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 624.131.372/373:626/627

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ ГТС

Георгий Владимирович Охупкин

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, okhapingv@vniig.ru,
georgii@okhupkin.net

Аннотация. Обобщена и проанализирована информация по способам восстановления объемной структуры бетона. Определены рациональные технические решения по удалению бетона и по заполнению подготовленной полости ремонтными материалами. Предложен подход к выбору характеристик ремонтных материалов. Выделены типовые технические решения по восстановлению объемной структуры бетона конструкций гидротехнических сооружений. Предложена методика выбора технических решений и ремонтных материалов при восстановлении объемной структуры бетона гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: *восстановление, объемная структура бетона, гидротехнические сооружения, способ удаления бетона, способ ремонта бетона, технические решения, методика выбора*

Для цитирования: Охупкин Г.В. Совершенствование методов выбора технических решений по восстановлению объемной структуры бетона конструкций ГТС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 39–50.

Original article

IMPROVEMENT OF SELECTION METHODS OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR CONCRETE VOLUMETRIC STRUCTURE RESTORATION OF HYDRAULIC STRUCTURES

Georgy V. Okhupkin

JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, okhapingv@vniig.ru, georgii@okhupkin.net

Abstract. The information on the methods of restoration volumetric structure concrete was summarized and analyzed. Rational technical solutions for the removal of concrete and for filling the prepared cavity with repair materials were determined. An approach to the choice of characteristics of repair materials was proposed. Typical technical solutions for the restoration of the volumetric structure of the hydrotechnical facilities concretes have been identified. The selection method for choosing technical solutions and repair materials for the restoration of the volumetric structure of hydrotechnical facilities concrete was proposed.

Keywords: *restoration, concrete volumetric structure, hydraulic structures, concrete remounting method, concrete repair method, technical solutions, selection method*

For citation: Okhupkin G.V. Improvement of selection methods of technical solutions for concrete volumetric structure restoration of hydraulic structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;305:39-50. (In Russ.).

Многие гидротехнические сооружения (ГТС), построенные на территории Российской Федерации, эксплуатируются в течение длительных сроков в зачастую сложных природно-климатических условиях. Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ГТС крайне важным становится проведение грамотных ремонтно-восстановительных работ, особенно в зонах наиболее интенсивных воздействий, где происходит разрушение бетона ГТС. Чаще всего наблюдаются локальные и площадные разрушения объемной структуры бетона (ОСБ). Для зоны переменного уровня (ЗПУ) характерна деструкция бетона.

В Российской Федерации отсутствует единый нормативный документ, регламентирующий ремонтно-восстановительные работы на бетонных и железобетонных конструкциях ГТС. Для выбора технических решений по восстановлению бетона ГТС используются общие нормативные документы, не учитывающие специфику ГТС [1, 2].

В настоящее время не выработано единых подходов к выбору технических решений по восстановлению ОСБ конструкций ГТС, хотя и опубликовано значительное число исследований на эту тему. Благодаря анализу этого массива публикаций, а также данным натурных исследований, автором разработана классификация разрушений ОСБ конструкций ГТС. Примеры разрушений ОСБ конструкций ГТС приведены на рис. 1.

Классификация разрушений ОСБ конструкций ГТС:

группа 1 – разрушения ОСБ на вертикальных гранях конструкции ГТС, в том числе: без оголения арматуры (группа 1.1); с оголением арматуры (группа 1.2); без оголения арматуры, с арматурой, расположенной в зоне деструктивного или слабого бетона (группа 1.3);

группа 2 – разрушения ОСБ на горизонтальных или наклонных нижних гранях конструкций ГТС, в том числе: без оголения арматуры (группа 2.1); с оголением арматуры (группа 2.2); без оголения арматуры, с арматурой, расположенной в зоне деструктивного или слабого бетона (группа 2.3);

группа 3 – разрушения ОСБ на горизонтальных или наклонных верхних гранях конструкций ГТС, в том числе: без оголения арматуры (группа 3.1); с оголением арматуры (группа 3.2); без оголения арматуры, с арматурой, расположенной в зоне деструктивного или слабого бетона (группа 3.3) [3].

Параметры разрушений ОСБ конструкций ГТС:

геометрические параметры: X_1 – максимальная ширина видимого разрушения, м; Y_1 – максимальная высота видимого разрушения, м; X_2 – ширина деструкции бетона, м; Y_2 – высота деструкции бетона, м; S_1 – площадь видимого разрушения бетона, м²; P_1 – периметр видимого разрушения бетона, м; Z_1 – глубина видимого разрушения бетона, м; Z_2 – глубина деструкции бетона, м; Z_{12} – общая глубина разрушения, м; V_1 – объем видимого разрушения бетона, м³; V_2 – объем деструктивного бетона в полости разрушения, м³;

характеристики бетона на восстанавливаемом участке: B_1 – класс бетона восстанавливаемой конструкции; B_2 – класс деструктивного и слабого бетона;

параметры для существующего армирования: D_{CA} – диаметр существующей арматуры, м; Z_{CA} – существующая толщина защитного слоя арматуры, м [3].

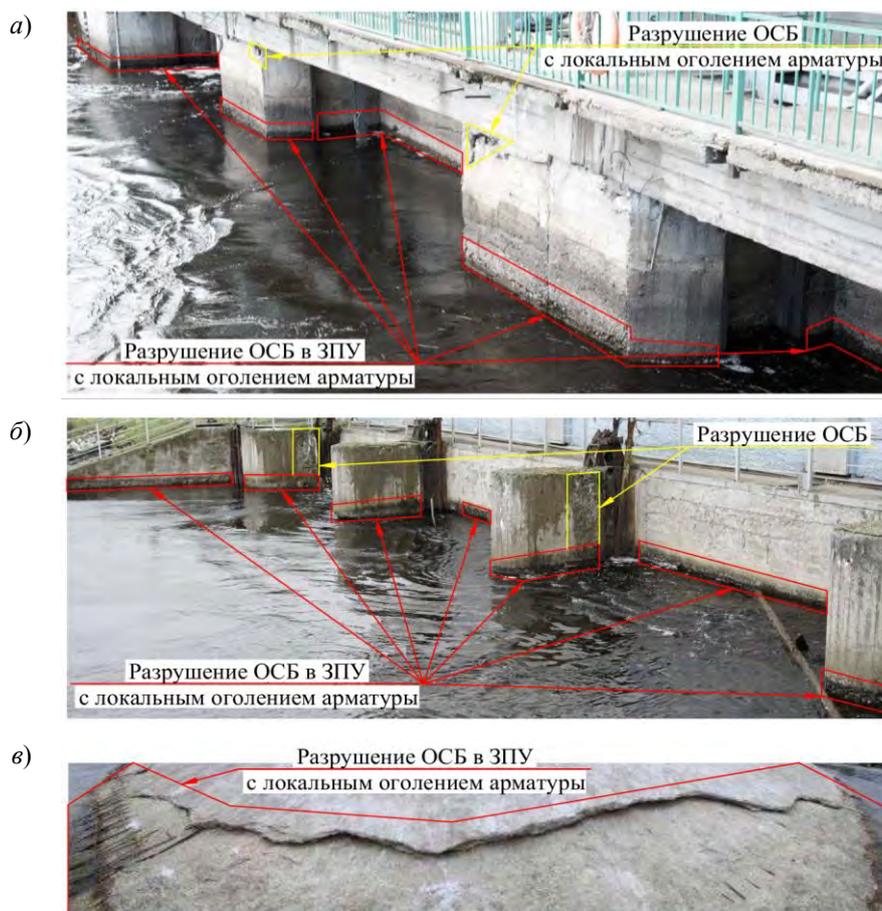


Рис. 1. Примеры разрушений ОСБ конструкций:
a – Маткожненская ГЭС; *б* – Выгостровская ГЭС; *в* – Саратовская ГЭС

Примеры разрушений ОСБ с оголением арматуры приведены на рис. 2.

В результате анализа литературных источников и данных натурных исследований по удалению бетона на конструкциях ГТС, определены преимущества применения гидродемонтажного способа удаления бетона и области рационального применения способов удаления бетона, а также предложены типовые технические решения по подготовке полости при производстве работ по восстановлению ОСБ конструкций ГТС [4–8].

Гидродемонтажный способ в сравнении с механическими ударными способами удаления бетона обладает следующими преимуществами:

в отдельных случаях приводит к значительному снижению показателей производства работ (так, сроки производства работ сокращаются до 47,9 %, стоимость производства работ – до 36,7 %, отмечены случаи сокращения сроков производства работ в 20 раз);

сокращает этапы производства подготовительных работ до одного, обеспечивающего все требуемые мероприятия, что позволяет сократить стоимость производства работ и их сроки, сохранить существующее армирование, в том числе практически исключить необходимость арматурных работ;

обеспечивает высокое качество подготовленной поверхности, повышает долговечность зоны контакта между слоем ремонтного материала и бетонным основанием и увеличивает сроки службы и надежность восстановленной конструкции;

позволяет проводить работы в подводной зоне и ЗПУ без установки дополнительных ограждающих устройств (например, кессонов, коффердамов, отсыпок и т. д.).

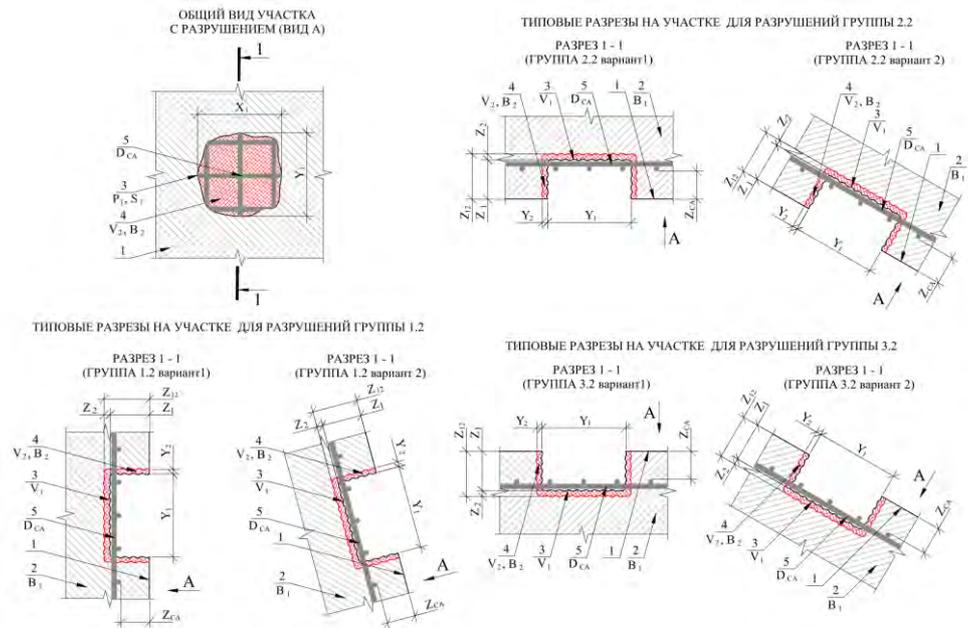


Рис. 2. Общий вид участка с разрушением ОСБ с оголением арматуры:
 1 – поверхность восстанавливаемой конструкции; 2 – бетон восстанавливаемой конструкции;
 3 – видимое разрушение ОСБ; 4 – деструктивный или слабый бетон; 5 – существующее армирование

В общих случаях рационален способ гидродемонтажного удаления бетона, в особых случаях (например, при отсутствии возможности установки оборудования, стесненных условиях и т. д.) предпочтительнее применять традиционные способы механического удаления бетона.

Типовые технические решения по подготовке полости при производстве работ по восстановлению ОСБ конструкций ГТС:

ТТР 1.1. Подготовка полости для производства работ по восстановлению с использованием механических ударных способов удаления бетона (отбойные молотки, перфораторы) с предварительным оконтуриванием восстанавливаемого участка безударными механическими способами алмазной резки.

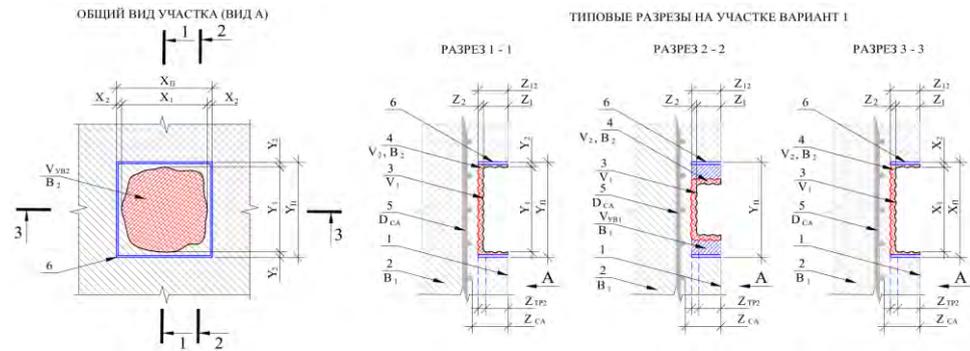
ТТР 1.2. Подготовка полости для производства работ по восстановлению с использованием гидродемонтажного способа удаления бетона.

Общие виды участка при подготовке полости приведены на рис. 3.

В результате анализа информации, приведенной в литературных источниках, определены области рационального применения способов нанесения или укладки ремонтных материалов и предложены типовые технические решения по заполнению подготовленной полости ремонтными мате-

риалами при производстве работ по восстановлению ОСБ конструкций ГТС [8–10].

ОКОНТУРИВАНИЕ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО УЧАСТКА БЕЗУДАРНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ АЛМАЗНОЙ РЕЗКИ



УДАЛЕНИЕ БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ УДАРНЫХ СПОСОБОВ УДАЛЕНИЯ БЕТОНА (ОТБойНЫЕ МОЛОТКИ, ПЕРФОРАТОРЫ) ИЛИ ГИДРОДЕМОНТАЖНОГО СПОСОБА УДАЛЕНИЯ БЕТОНА

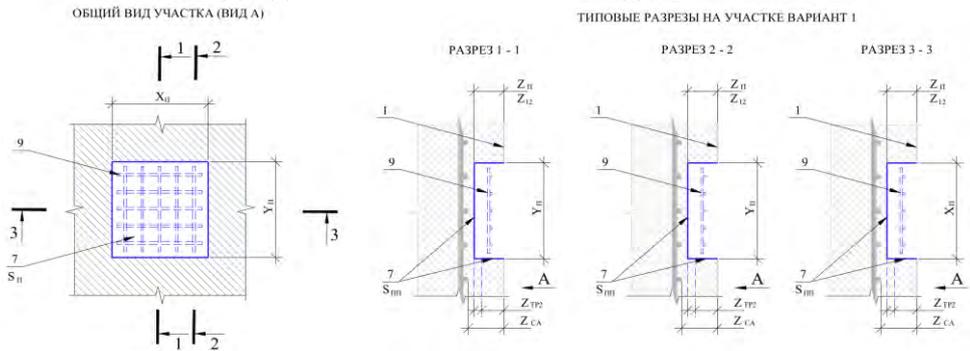


Рис. 3. Общий вид участка с разрушением ОСБ при подготовке полости:

1 – поверхность восстанавливаемой конструкции; 2 – бетон восстанавливаемой конструкции; 3 – видимое разрушение ОСБ; 4 – деструктивный или слабый бетон; 5 – существующее армирование; 6 – штраба; 7 – поверхность подготовленной полости; 9 – дополнительная арматурная сетка (для обеспечения трещиностойкости слоя ремонтного материала); Z_{CA} – существующий защитный слой арматуры; $Z_{П}$ – глубина подготовленной полости; Z_1 – глубина видимого разрушения бетона; Z_2 – глубина деструкции бетона; $Z_{ТР2}$ – минимальная требуемая толщина ремонтного материала при установке дополнительной арматурной сетки

В общих случаях при восстановлении ОСБ группы 1 рационален способ укладки или заливки ремонтных материалов с предварительной установкой опалубки в надводной зоне и с использованием заградительных устройств (кессон, коффердам и т. д.) в подводной зоне. При восстановлении ОСБ группы 2 целесообразно механизированное нанесение ремонтных материалов в надводной зоне и использование заградительных устройств в подводной зоне. При восстановлении ОСБ группы 3 рационален способ укладки или заливки ремонтных материалов без установки опалубки, с использованием виброреек в надводной зоне и с использованием заградительных устройств в подводной зоне. При отсутствии возможности меха-

низированного нанесения ремонтных материалов или укладки бетонных смесей, например, при стесненных условиях, невозможности установки оборудования (для торкретирования, набрызг бетона, бетононасоса и т. д.), предпочтительно ручное нанесение ремонтных материалов. При отсутствии возможности установки ограждающих устройств в подводной зоне и ЗПУ единственными вариантами восстановления ОСБ являются способы подводной укладки или заливки ремонтных материалов (например, способ вертикально перемещающейся трубы или восходящего раствора). В ряде случаев для конструкций со сложными геометрическими параметрами при восстановлении ОСБ группы 2 и 3 подходит способ механизированного нанесения ремонтных материалов.

Типовые технические решения по заполнению подготовленной полости ремонтными материалами при производстве работ по восстановлению ОСБ конструкций ГТС:

ТТР 2.1. Заполнение подготовленной полости ремонтным материалом с использованием способа ручного нанесения ремонтных материалов.

ТТР 2.2. Заполнение подготовленной полости ремонтным материалом с использованием способа механизированного нанесения ремонтных материалов.

ТТР 2.3. Заполнение подготовленной полости ремонтным материалом с использованием способа укладки или заливки ремонтных материалов в сухой зоне.

ТТР 2.4. Заполнение подготовленной полости ремонтным материалом с использованием способа укладки или заливки ремонтных материалов в подводной зоне или ЗПУ [11].

В результате анализа ряда исследований [12–20] определены основные этапы выбора ремонтных материалов для восстановления ОСБ конструкций ГТС:

Этап 1. Сбор и анализ информации о ГТС: об условиях эксплуатации, фактических характеристиках бетона, причинах разрушения ОСБ.

Этап 2. Определение требуемых физико-механических и эксплуатационных характеристик ремонтного материала. Выполнение расчетов для определения прочности ремонтного материала, совместимой с фактической прочностью бетона основания. На основании расчетной прочности ремонтного материала определяются подходящие по водонепроницаемости и морозостойкости марки.

Этап 3. Определение требований к эксплуатационным характеристикам ремонтных материалов по СП 41.13330.2012 [21] и ГОСТ Р 56378-2015 [2] на основании условий эксплуатации и причин разрушений ОСБ конструкций ГТС.

Этап 4. Анализ соответствия эксплуатационных характеристик ремонтных материалов (этап 2) требованиям, определенным на этапе 3. При их соответствии выбор ремонтного материала считается выполненным. В случае несоответствия необходимо выбрать дополнительные мероприятия, например, применение защитных покрытий, адгезионных материалов.

Развитие знаний в области технологии бетона позволило получить бетонные смеси с высокими эксплуатационными свойствами, в том числе с маркой по морозостойкости более F1000, по водонепроницаемости более

W20. Существуют подходы по назначению более высоких марок по морозостойкости бетона в сравнении с требованиями нормативно-технической документации, которые позволяют увеличить межремонтный период эксплуатации и повысить долговечность восстановленных конструкций. Изменение водонепроницаемости W и адгезии ремонтного материала A оказывает аналогичное морозостойкости F влияние на изменение межремонтного периода эксплуатации и долговечности восстановленной конструкции. Для возможности увеличения межремонтного периода эксплуатации и повышения долговечности восстановленных конструкций предложен подход [22] по выбору ремонтных материалов на основании показателя K_{expl} , показывающего стоимость одной единицы эксплуатационной характеристики I_{expl} и определяемого следующим образом:

$$K_{\text{expl}} = \frac{ST_{\text{mat}}}{I_{\text{expl}}} \quad (1)$$

где I_{expl} – эксплуатационная характеристика ремонтного материала, например: морозостойкость F , водонепроницаемость W , адгезия A и так далее; K_{expl} – стоимость одной единицы эксплуатационной характеристики I_{expl} ; ST_{mat} – стоимость 1 м³ ремонтного материала.

В результате проведенных исследований предложена методика выбора технических решений при восстановлении ОСБ конструкций ГТС, приведенная на рис. 4.

Предложенная методика использовалась в ходе выполнения регулярных (преддекларационных) обследований на ГТС филиалов «Карельский», «Кольский», «Невский» ПАО «ТГК-1». С учетом состояния конструкций ГТС методика в общих случаях актуальна при восстановлении бетона в зоне переменного уровня и на водосливных гранях конструкций.

Выбор рациональных технических решений неразрывно связан с технологической оснасткой и оборудованием, в том числе:

при восстановлении разрушений на вертикальных гранях конструкций применение методики актуально при объеме разрушений не менее объема готовой бетонной смеси, изготовленного с использованием бетоносмесителя: например, для гравитационного бетоносмесителя БГ-1800 объем разрушений должен быть не менее 1 м³;

при восстановлении разрушений на горизонтальных нижних гранях конструкций применение методики актуально при объеме разрушений не менее объема готового ремонтного материала, изготовленного с использованием оборудования для торкретирования: например, для шнекового расстворонасоса Putzmeister S5 объем разрушений должен быть не менее 0,1 м³.

Выбранные на основании предложенной методики технические решения позволяют исключить необоснованные затраты и выбрать оптимальные по стоимости ремонтные материалы и рациональные по срокам и стоимости технические решения по восстановлению ОСБ конструкций ГТС, обеспечить увеличение межремонтного периода эксплуатации и повышение долговечности восстановленных бетонных конструкций, снизить затраты на эксплуатацию при жизненном цикле ГТС.

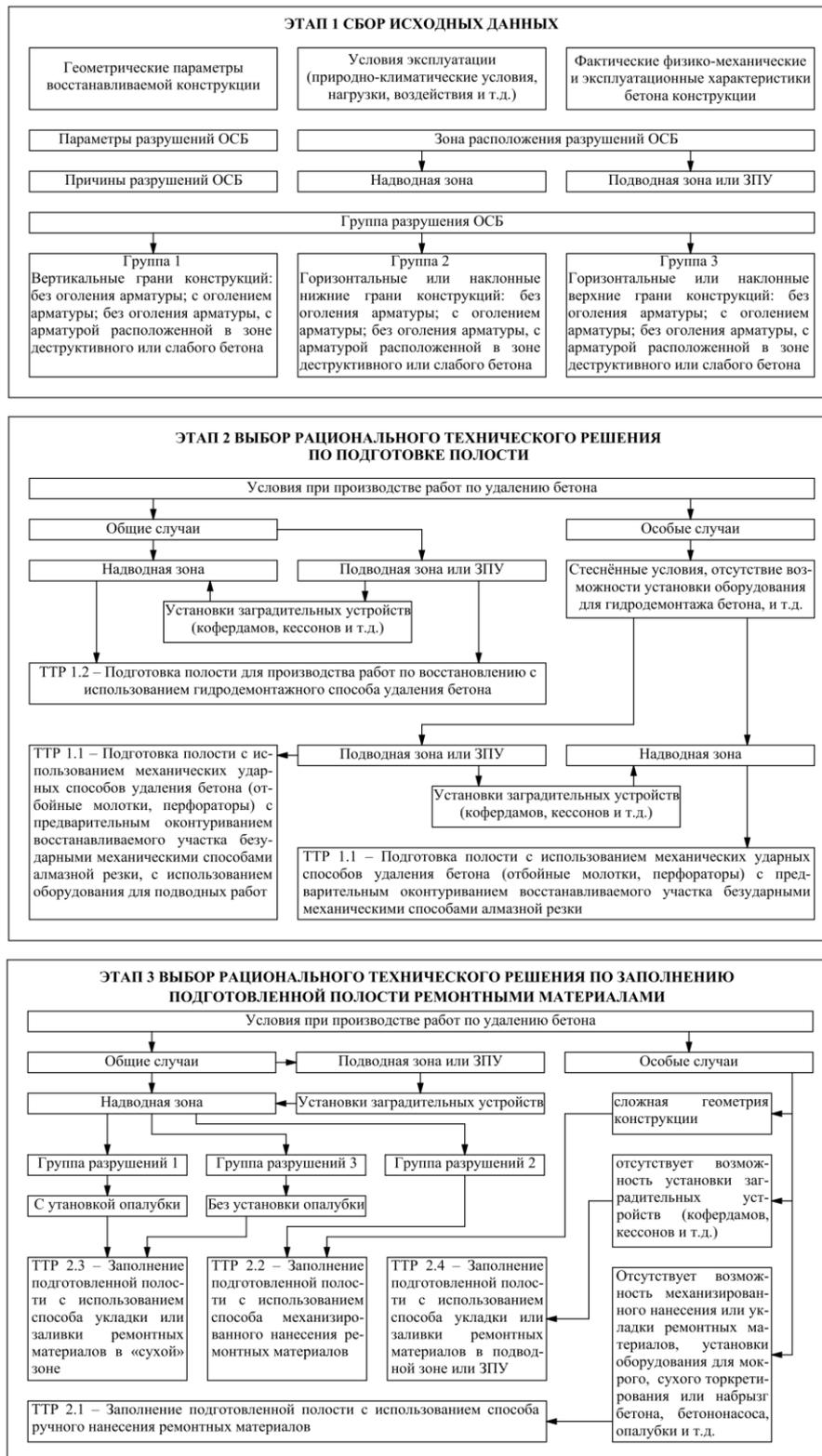


Рис. 4. Методика выбора технических решений по восстановлению ОСБ конструкций ГТС (начало)

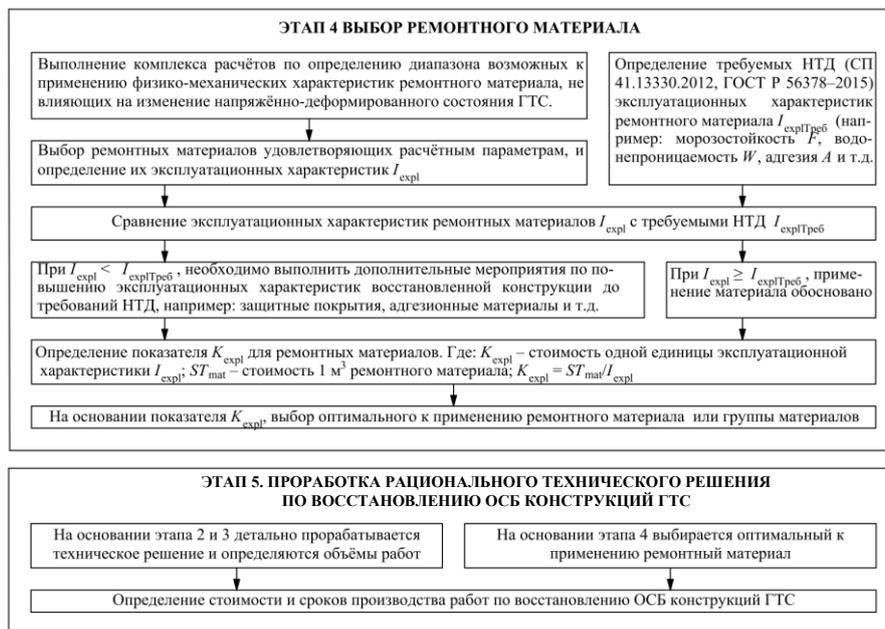


Рис. 4. Методика выбора технических решений по восстановлению ОСБ конструкций ГТС (продолжение)

Заключение

1. Обобщена и проанализирована информация по способам удаления бетона, способам нанесения или укладки ремонтных материалов, подходам к выбору ремонтных материалов при восстановлении объемной структуры бетона ГТС.
2. Предложена классификация разрушений объемной структуры бетона в зависимости от расположения на конструкции и расположения арматуры в области разрушения.
3. Определены области рационального применения типовых технических решений по восстановлению объемной структуры бетона ГТС.
4. Предложена методика выбора технических решений по восстановлению объемной структуры бетона ГТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ 32016-2012.** Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013.
2. **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.
3. **Охапкин Г.В., Василевская Л.С.** Анализ подходов к выбору способов нанесения или укладки ремонтных материалов при восстановлении бетона конструкций ГТС // Гидротехническое строительство. 2022. № 3. С. 39–45.
4. **Давиденко В.М., Охапкин Г.В., Бибина О.Е.** Современные методы подготовки поверхности бетонных конструкций гидротехнических сооружений к ремонту // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 289. С. 52–58.

5. **Охупкин Г.В.** Совершенствование методов выбора способов удаления бетона при восстановлении объемной структуры бетона ГТС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 50–60.
6. **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.
7. **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.
8. **Raupach M., Buttner T.** Concrete repair to EN 1504. Diagnosis, Design, Principles and Practice. 2014.
9. **Руководство по применению материалов торговой марки Marei на гидротехнических сооружениях /** ЗАО «МАПЕЙ», АО «НИИЭС». М., 2017.
10. **The repair and protection of reinforced concrete with Sika® in accordance with European Standards EN 1504.** Switzerland: Sika, 2014.
11. **Охупкин Г.В.** Подходы к восстановлению объемной структуры бетона гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 296. С. 13–21.
12. **Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г.** Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М.: Издательство литературы по строительству, 1965.
13. **Добшиц Л.М.** Пути повышения долговечности бетонов // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 4–9.
14. **Добшиц Л.М.** Морозостойкость бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения: автореферат ... дис. канд. техн. наук. М., 2000.
15. **Затворницкая Т.А., Матюшечкин С.Н., Затворницкая А.О., Шевкин А.Л., Кузнецов С.Ю.** Разработка технологий и составов бетона для ремонта ж.б. конструкций Саратовской ГЭС в зоне переменного уровня воды // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: тезисы докладов шестой научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2011. С. 80–81.
16. **Кузнецов С.Ю., Затворницкая Т.А.** Современный опыт реконструкции и ремонта железобетонных конструкций в зоне переменного уровня воды // Пятое всероссийское совещание гидроэнергетиков: доклады и выступления. М., 2013. С. 442–450.
17. **Стольников В.В.** Исследования по гидротехническому бетону. М.: Госэнергоиздат, 1962.
18. **Шейкин А.Е., Добшиц Л.М.** О назначении марки бетона по морозостойкости // Обеспечение качества железобетонных конструкций в суровых климатических условиях и вечномерзлых грунтах: тезисы докладов всесоюзной конференции. Якутск: ИПО ЦНТИ, 1988. С. 136–138.
19. **Шейкин А.Е., Добшиц Л.М.** Цементные бетоны высокой морозостойкости. М.: Стройиздат, 1989.
20. **Шестоперов С.В.** Долговечность бетона. М.: Автотрансиздат, 1960.
21. **СП 41.13330.2012.** Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 (с Изменением № 1).
22. **Охупкин Г.В.** Анализ подходов по выбору ремонтных материалов при восстановлении бетона ГТС // Гидротехническое строительство. 2021. № 12. С. 8–14.

REFERENCES

1. GOST 32016-2012. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. General requirements. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
2. 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.).
3. 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.).
4. 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.).
5. 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.).
6. 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.).
7. 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.).
8. Raupach M., Buttner T. Concrete repair to EN 1504. Diagnosis, Design, Principles and Practice. 2014.
9. Guidelines for the use of Mapei trademark materials on hydraulic structures. Moscow; 2017. (In Russ.).
10. The repair and protection of reinforced concrete with Sika® in accordance with European Standards EN 1504. Switzerland: Sika; 2014.
11. Okhapkin G.V. Technical solutions for restoring volumetric structure of hydraulic structures concrete. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2020;296:13-21.
12. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. Increasing the frost resistance of concrete in industrial and hydraulic structures. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1965. (In Russ.).
13. Dobshits L.M. Ways to improve the durability of concretes. *Stroitel'nye Materialy – Construction Materials*. 2017;10:4-9. (In Russ.).
14. Dobshits L.M. Frost resistance of concrete transport structures and ways to improve it: Abstract of the Cand. Sci. (Techn.). Moscow, 2000. (In Russ.).
15. Zdvornitskaya T.A., Matyushechkin S.N., Zdvornitskaya A.O., Shevkin A.L., Kuznetsov S.Yu. Development of technologies and compositions of concrete for repair of railway structures of Saratov HPP in the zone of variable water level. *Hydropower. New developments and technologies: abstracts of the sixth scientific and technical conference*. Saint-Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG»; 2011. P. 80-81. (In Russ.).
16. Kuznetsov S.Yu., Zdvornitskaya T.A. Modern experience of reconstruction and repair of reinforced concrete structures in the zone of variable water level. *Fifth All-Russian meeting of hydropower engineers: reports and speeches*. Moscow, 2013. P. 442-450. (In Russ.).
17. Stolnikov V.V. Research on hydraulic concrete. Moscow: Gosenergoizdat; 1962. (In Russ.).
18. Sheikin A.E., Dobshits L.M. On the purpose of the concrete grade for frost resistance. *Ensuring the quality of reinforced concrete structures in harsh climatic con-*

ditions and permafrost soils: abstracts of reports of the All-Union Conference. Yakutsk: IPO TsNTI; 1988. P. 136-138. (In Russ.).

19. Sheikin A.E., Dobshits L.M. Cement concretes of high frost resistance. Moscow: Stroyizdat; 1989. (In Russ.).

20. Shestoperov S.V. Durability of concrete. Moscow: Avtotransizdat; 1960. (In Russ.).

21. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.06.08-87 (with Change № 1). (In Russ.).

22. Okhapkin G.V. Analysis of approaches about repair materials' choice for the concrete's restoration of hydro-technical facilities. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2021;12: 8-14. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 25.10.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022; принята к публикации 19.03.2023.

The article was submitted 25.10.2022; approved after reviewing 16.11.2022; accepted for publication 19.03.2023.

Научная статья
УДК 621.224:621.313.322

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЭС НА БАЗЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Махсуд Мансурович Султанов¹, Наталья Васильевна Байдакова²,
Шушаник Мушеговна Милитонян³, Павел Дмитриевич Меньшиков⁴**

^{1, 2, 3, 4} Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Волжский, Россия

¹ sultanov_mm@mail.ru

² baydakovanv@mail.ru

³ militonyan_s@mail.ru

⁴ pavel-menshikov@mail.ru

Аннотация. Для оценки и прогнозирования показателей надежности энергетического оборудования предложено использовать нейросетевую модель расчета. Проведены сравнительные оценки надежности энергетического оборудования по представленным математическим зависимостям и данным, полученным на основе нейросетевого моделирования, а также оценка влияния ряда параметров узлов и элементов гидроагрегатов на его общее техническое состояние. Анализ результатов проведенного исследования показал, что наиболее подтвержденными являются совместное влияние увеличения разницы давлений в полостях сервомоторов и отсутствия синхронности разворота лопастей напорного агрегата, совместное влияние вибраций вала с развитием кавитационной эрозии лопастей.

Ключевые слова: надежность, безаварийная работа, энергоэффективность, прогнозирование, отказы, индекс технического состояния, нейросетевая модель

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Российской Федерации FSWF 2020-0025 «Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий» на оборудовании Центра коллективного пользования «Испытательный полигон технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» НТИ МЭИ.

Для цитирования: Султанов М.М., Байдакова Н.В., Милитонян Ш.М., Меньшиков П.Д. Оценка надежности энергетического оборудования ГЭС на базе методов машинного обучения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 51–60.

Original article

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE ENERGY HPP EQUIPMENT BASED ON METHODS MACHINE LEARNING

**Mahsud M. Sultanov¹, Natalia V. Baydakova², Shushanik M. Militonyan³,
Pavel D. Menshikov⁴**

^{1, 2, 3, 4} Volzhsky Branch of the National Research University «MPEI», Volzhsky, Russia

¹ sultanov_mm@mail.ru

² baydakovanv@mail.ru

³ militonyan_s@mail.ru

⁴ pavel-menshikov@mail.ru

Abstract. It is proposed to use a neural network model of calculation to assess and predict indicators of reliability of power equipment. The authors conducted a comparative assessment of the reliability of power equipment on the presented mathematical dependences and data obtained on the basis of neural network modeling, as well as assessing the impact of a number of parameters of nodes and elements of hydraulic unit on the overall technical condition. Analysis of the results of the study showed that the most confirmed are the joint influence of increasing pressure difference in the servomotor cavities and the lack of synchronicity of the rotation of the blades of the pressure unit, joint influence of shaft vibrations with the development of cavitation erosion of the blades.

Keywords: *reliability, trouble-free operation, energy efficiency, forecasting, failures, technical condition index, neural network model*

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the state task of the Russian Federation FSWF 2020-0025 «Development of methods and analysis of ways to achieve a high level of safety and competitiveness of energy system facilities based on digital technologies» on equipment of The Center for Collective Use «Testing ground of technologies for the transportation of electricity and distributed intelligent power systems» of NTI Centre at MPEI.

For citation: Sultanov M.M., Baydakova N.V., Militonyan Sh.M., Menshikov P.D. Reliability assessment of the energy HPP equipment based on methods machine learning. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:51-60. (In Russ.).

Введение

Определение допустимого интервала прогнозной безаварийной работы энергетического оборудования в большей степени позволяет определить стратегию текущего управления эксплуатацией.

Сложность составления прогноза изменения состояния энергетического оборудования имеет разные причины:

многоплановость и взаимосвязь различных процессов, протекающих в работающем оборудовании;

взаимосвязь физических процессов, протекающих в элементах, от условий эксплуатации и режимов работы энергетического оборудования в целом;

различную скорость изменения состояния оборудования на разных этапах эксплуатации, имеющую нелинейную зависимость от скорости развития и саморазвития дефектов [1–3].

Все вышеперечисленное показывает, что существующие модели не позволяют достоверно описать прогноз изменения состояния оборудования, так как достаточно велико влияние на результаты моделирования непрогнозируемых воздействий и скорости развития дефектов разного происхождения. Для поиска эффективного решения описанной задачи в данной работе проведен анализ прогнозирования надежности энергетического оборудования, полученного в результате использования нейросетевого моделирования.

Основная часть

Повышение надежности энергетического оборудования обеспечивается минимизацией технологических отказов в производственно-эксплуатационной деятельности человека, к которым относят как технические ошибки при проектировании объектов, связанные, например, с неверными исходными данными, так и неточности при изготовлении оборудования. Кроме этого, технологические нарушения могут возникать вследствие на-

рушений технических регламентов при эксплуатации энергетического оборудования, работающего в нерасчетных режимах, испытывающего перегрузки. Контроль технического состояния энергетического оборудования (ТСО) позволяет снизить вероятность возникновения технологических нарушений и отказов при работе оборудования.

В соответствии с программой цифровизации энергетики РФ для оценки технического состояния и определения физического износа энергетического оборудования используется единый интегральный показатель – индекс технического состояния (ИТС) [3].

Для оценки надежности объектов гидроэнергетики используются два показателя: коэффициент готовности K_r и коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$. Определение их фактического значения основано как на времени готовности агрегата к работе, так и на времени его простоя [4–9].

Авторами [10–16] были выполнены расчеты коэффициента оперативной готовности $K_{ог}$ для ряда ГЭС. В работе приведены типы турбин, страна-изготовитель, проектные параметры турбин, а также максимальные значения календарного времени работы гидротурбин и коэффициента генерации. Также приведены значения коэффициента генерации и коэффициента оперативной готовности на момент замены оборудования. Анализ данных показывает, что коэффициент $K_{ог}$ к моменту полной замены гидрооборудования может быть принят как базовое значение, при достижении которого на ГЭС целесообразно ставить вопрос о своевременной реконструкции гидромашин. В результате оценки ИТС энергетического оборудования рассчитываются значения с учетом их фактического технического состояния. При этом ТСО считается критическим, если ИТС менее 25, удовлетворительным, если ИТС равен 50 и более.

Последовательность выполнения расчета: вначале осуществляется оценка параметров технического состояния (ТС) узлов оборудования, затем осуществляется оценка параметров ТС группы оборудования.

Расчет индекса технического состояния функциональных узлов (ИТСУ) выполняется по зависимости (1):

$$\text{ИТСУ} = 100 \sum \frac{i(KB_i \times \text{ОГП}_i)}{4}, \quad (1)$$

где KB_i – значение весового коэффициента для i -й группы параметров оборудования; ОГП_i – балльная оценка i -й группы оборудования.

Расчет ИТС группы оборудования подобного типа (ИТС^э) осуществляется по следующей формуле:

$$\text{ИТС}^{\text{э}} = \frac{\sum_i (P_i \times \text{ИТС}_i)}{\sum_i P_i}, \quad (2)$$

где ИТС_i – ИТС i -й единицы оборудования в группе; P_i – показатель приведения, характерный для данного вида оборудования.

ИТС оборудования одной технологической цепочки, определяется исходя из минимального ИТС конкретного узла в данной системе.

Конкретные значения ИТС характеризуют текущее состояние энергетического оборудования, что позволит более точно определять сроки ремонтов, улучшить их качество, уменьшить вероятность аварийных остановов, снизить потребность в проведении плановых и аварийных ремонтов.

Формирование комплексного показателя энергетической безопасности и энергоэффективности энергетической кампании производится как среднеарифметическое балльных оценок характера ситуации по каждому индикатору энергетической безопасности. Для удобства обработки полученной информации может применяться визуализация уровня надежности и безопасности с учетом физического износа оборудования.

В современных условиях функционирования рынка огромное значение имеют факторы оперативности и точности получения прогноза надежности и безопасности оборудования, характеризующие состояние его элементов и узлов [9, 13]. Получение модели, наиболее точно прогнозирующей стратегию текущего управления эксплуатацией, является трудно реализуемой задачей, так как на любой стадии существует ряд факторов, влияние которых практически невозможно учесть или предсказать. В современных условиях развития методов и средств моделирования справиться с таким широким спектром условий решения поставленной задачи возможно с использованием нейросетевого подхода. Для построения предлагаемой нейронной сети разработана топология, определен механизм обучения и тестирования [14]. В процессе исследования создана выборка входных данных, построен алгоритм.

Предложенная нейросетевая модель основана на методике оценки надежности и расчета ИТС оборудования с учетом контролируемых параметров объекта. Для анализа показателей осуществлен выбор гидросилового оборудования – гидравлической турбины (ГТ), включающей следующие функциональные узлы (ФУ): направляющий аппарат (НА), крышку турбины, проточную часть, рабочее колесо, турбинный подшипник и вал. Для определения ТС выбранных функциональных узлов оборудования используются группы контролируемых параметров в соответствии с методикой [3]. При этом оценка ИТС выполняется поэтапно в соответствии с вышеприведенным алгоритмом нейросетевой модели. Ряд вычисляемых параметров приведен в таблице.

В процессе технического обслуживания оборудования измеряют параметры состояния, обуславливающие постепенные отказы. Для оценки показателей надежности авторами выявлены элементы и узлы, характеризующие работоспособность гидросилового оборудования, в соответствии с результатами оценки ИТС.

В связи с этим получены графические зависимости, которые позволяют получать прогнозные значения ИТС и показателей надежности в зависимости от условий и режимов работы гидрооборудования.

Все представленные графики визуально демонстрируют взаимосвязь ИТС (вероятность отказа оборудования) отдельных функциональных узлов гидротурбинного оборудования и ИТС гидросилового оборудования в целом как двух взаимозависимых параметров. Степень влияния отдельных параметров зависит от ряда факторов. В первую очередь, от весового коэффициента параметра, влияющего на ИТС данной группы оборудования. Во-вторых, от весового коэффициента самого функционального узла. И, в-третьих, от того, характеризуют ли выбранные параметры один функциональный узел или разные.

На рис. 1 представлено изменение вероятности отказа работы гидросилового оборудования в целом и функционального узла «Гидротурбина»

до критического при увеличении разницы давлений в полостях сервомоторов направляющего аппарата.

Таблица

Исходные данные для оценки технического состояния гидросилового оборудования. Класс «Гидравлическая турбина»

Параметр функционального узла	Ед. изм.	Фактическое значение параметра	Весовой коэффициент параметра ФУ	Весовой коэффициент ФУ
Вертикальная вибрация	мкм	0÷0,015	0,5	0,09
Кавитационная эрозия	г	0÷0,06	0,35	0,19
Разница в развороте лопастей при одном и том же открытии НА после отработки сигналов на «прибавить» и «убавить»	град	0÷1,1	0,3	0,09
Разность давлений в полостях сервомоторов	кгс/см ²	0÷0,12	0,2	0,09
Бой вала в зоне подшипника	мм	0÷0,025	0,4	0,09
Мощность	МВт	100÷120	0,2	0,15

Графическая зависимость *I* показывает влияние синхронности разворота перьев на общее техническое состояние направляющего аппарата, что подтверждается разностью давлений в полостях сервомотора и позволяет однозначно определить причину возникновения дефектов. В дальнейшем по показаниям разницы давлений можно судить о развитии дефекта и определить критическое состояние оборудования.

График на рис. 2 демонстрирует изменение ИТС гидроагрегата в целом и его функционального узла «Гидротурбина» при увеличении разницы давлений в полостях сервомоторов и отсутствии синхронности разворота лопастей НА.

Совместное влияние увеличения разницы давлений в полостях сервомоторов и отсутствия синхронности разворота лопастей значительно снижает ИТС НА, повышая вероятность отказа до 55 %.

Заметное комплексное влияние двух указанных параметров возникает из-за того, что оба показателя относятся к оценке одного функционального узла.

Для оценки влияния вибраций в турбинном подшипнике произведен расчет вероятности его безотказной работы в зависимости от технического состояния на примере ряда параметров, по которым определяется ИТС данного узла.

На рис. 3 приведены зависимости, которые характеризуют влияние состояния турбинного подшипника на вибрационные характеристики в зоне опорного подшипника (подпятника) при различных нагрузках гидроагрегата. В связи с тем, что выбранные параметры характеризуют разные функциональные узлы, на графике видно, что на ИТС узла мощность тур-

бины не оказывает влияния. Показано, что влияние состояния турбинного подшипника на бой вала при изменении мощности гидротурбины составляет от 83 до 100 %.

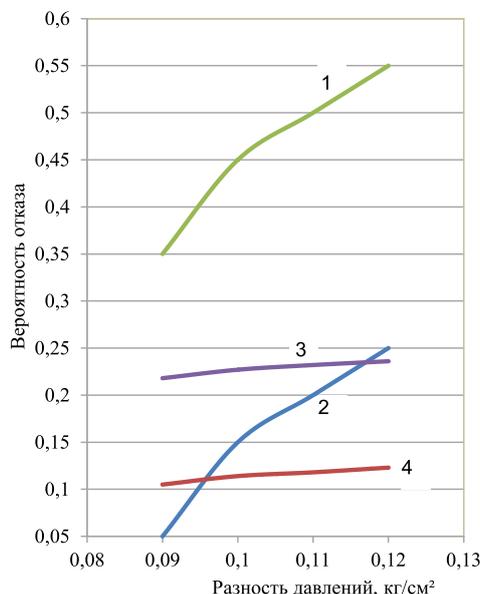


Рис. 1. Влияние разворота лопастей НА на изменение вероятности отказа работы гидросилового оборудования в целом и гидротурбины при одном и том же открытии НА после отработки сигналов на «прибавить» и «убавить»:

- 1 – вероятность отказа работы узла «Гидротурбина» при отсутствии разницы в развороте лопастей;
- 2 – вероятность отказа работы узла «Гидротурбина» при максимальной разнице в развороте лопастей;
- 3 – вероятность отказа работы гидросилового оборудования при отсутствии разницы в развороте лопастей;
- 4 – вероятность отказа работы гидросилового оборудования при максимальной разнице в развороте лопастей

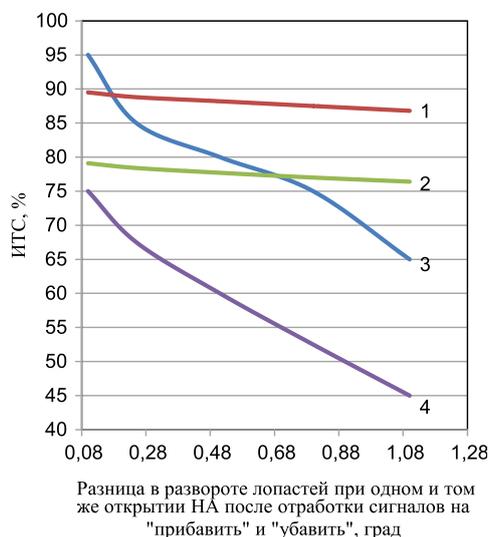


Рис. 2. Влияние разворота лопастей на изменение вероятности отказа работы гидросилового оборудования в целом и гидротурбины:

- 1 – ИТС узла «Гидротурбина» при отсутствии разницы давлений в полостях сервомоторов НА;
- 2 – ИТС узла «Гидротурбина» при недопустимой разнице давлений в полостях сервомоторов НА;
- 3 – ИТС гидросилового оборудования при отсутствии разницы давлений в полостях сервомоторов НА;
- 4 – ИТС гидросилового оборудования при недопустимой разнице давлений в полостях сервомоторов НА

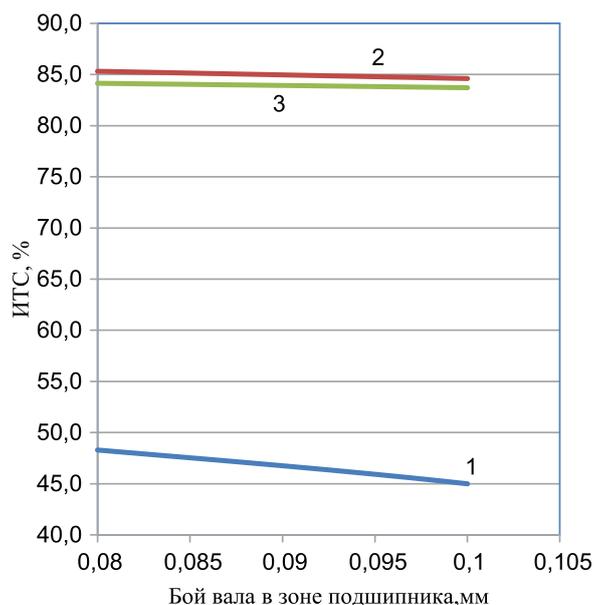


Рис. 3. Влияние боя вала на индекс технического состояния узла «Турбинный подшипник и вал»:
 1 – ИТС узла «Турбинный подшипник и вал»; 2 – ИТС гидросилового оборудования при мощности турбины 100 %; 3 – ИТС гидросилового оборудования при мощности турбины 83 %

При увеличении вибрации в зоне турбинного подшипника до максимально допустимого значения ИТС турбинного подшипника снижается.

Таким образом, предложенная нейросетевая модель позволяет оценивать влияние конкретных параметров на ИТС отдельных узлов и элементов энергетического оборудования, а также совместное влияние ряда узлов гидроагрегата на ИТС и общее техническое состояние гидроагрегата.

Заключение

1. Предложено для оценки и прогнозирования показателей надежности энергетического оборудования использовать нейросетевую модель расчета и с помощью нее оценивать их влияние на надежность генерирующей системы.

2. Проведены сравнительные оценки надежности энергетического оборудования по представленным математическим зависимостям и данным, полученным на основе нейросетевого моделирования.

3. Выполнены оценки влияния ряда параметров узлов и элементов гидроагрегата на их ИТС, на общее техническое состояние гидроагрегата, которые показали, что наиболее подтвержденными являются совместное влияние увеличения разницы давлений в полостях сервомоторов и отсутствия синхронности разворота лопастей НА, совместное влияние вибраций вала с развитием кавитационной эрозии лопастей. В этой связи, необходимо создавать современные цифровые системы контроля энергетического оборудования, необходимые для осуществления непрерывного сбора, хранения, архивации данных с учетом фактического состояния конкретного элемента гидроагрегата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ 27.002-2015.** Надежность техники. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.
2. **ГОСТ 20911-89.** Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.
3. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9556>.
4. **Байдюк М.А., Комарова Г.В.** Оценка технического состояния и надежности электрических машин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 78–84.
5. **Клюев В.В.** Глобализация технической диагностики и неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 3–6.
6. **Биргер И.А.** Техническая диагностика. М.: URSS, 2019. 240 с.
7. **Данилов А.С., Иванов Н.А.** Переход к техническому обслуживанию и ремонту по состоянию с помощью применения онлайн-расчета индекса технического состояния // Гидроэлектростанции в XXI веке: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. 2019. С. 219–222.
8. **Смунова Т.С.** Анализ методик определения индекса технического состояния оборудования // ЭНЕРГИЯ-2018: сборник тезисов докладов. Т. 3. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2018. С. 141–142.
9. **Смунова Т.С.** Сопоставление методик оценки индекса технического состояния оборудования // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГИЯ-2019: материалы конференции. Т. 3. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. С. 97.
10. **Седуш В.Я., Сидоров В.А., Сушко А.Е.** Современные подходы к организации технического обслуживания и ремонта механического оборудования. URL: <http://www.diatechnic.ru/attachments/3/2/3238b581f42775393d2af80957a15868.pdf>
11. **Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В.** Срок службы как параметр обобщенного узла при расчете индекса технического состояния энергетического оборудования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 4 (348). С. 43–50.
12. **Грабчак Е.П.** Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 10. № 4. С. 268–274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>.
13. **Богущ Б.Б.** О модернизации оборудования и внедрении современных информационных технологий для обеспечения энергобезопасности и энергоэффективности работы ГЭС и ГАЭС // Энергоэффективность и энергобезопасность гидроэнергетических объектов в контексте модернизации и цифровой трансформации. Москва, 2019.
14. **Султанов М.М., Курьянов В.Н., Шамигулов П.В., Шибитов В.С.** Планирование ремонтных работ ЛЭП на основании расчета индекса технического состояния, используя нейросетевую модель // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 6 (134). С. 69–73.
15. **Банникова В.Ю., Гарифуллин М.Ш.** Оценка надежности электрооборудования с помощью индекса технического состояния // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы международной молодежной научной конференции. Т. 1. Казань: ПК «Астор и Я», 2021. С. 7–9.
16. **Иванченко И.П., Топаж Г.И., Щур В.А.** Оценка надежности гидротурбин со сроком службы выше нормативного // Научно-технические ведомости

REFERENCES

1. GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2016. 28 p. (In Russ.).
2. GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2010. 11 p. (In Russ.).
3. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of July 26, 2017 No. 676 «On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power transmission lines of electric stations and electric networks». URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9556>. (In Russ.).
4. Baidiuk M.A., Komarova G.V. Evaluating technical condition and reliability of electrical machines. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2019;3:78-84. (In Russ.).
5. Kluev V.V. Globalization of technical diagnostics and non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2004;8:3-6. (In Russ.).
6. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow: URSS; 2019. 240 p. (In Russ.).
7. Danilov A.S., Ivanov N.A. Transition to maintenance and repair by condition using the online calculation of the technical condition index. *Hydroelectric power plants in the XXI century: a collection of materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of young scientists, specialists, undergraduate and graduate students*. Sayanogorsk; Cheryomushki: SShB SFU, 2019. P. 219-222. (In Russ.).
8. Smurova T.S. Analysis of methods for determining the index of technical condition of equipment. *Energiya-2018: collection of abstracts*. Vol. 3. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin; 2018. P. 141-142. (In Russ.).
9. Smurova T.S. Comparison of methods for assessing the index of technical condition of equipment. *Elektroenergetika. Energiya-2019: collection of abstracts*. Vol. 3. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin; 2019. P. 97. (In Russ.).
10. Sedush V.Ya., Sidorov V.A., Sushko A.E. Modern approaches to the organization of maintenance and repair of mechanical equipment. URL: <http://www.diatechnic.ru/attachments/3/2/3238b581f42775393d2af80957a15868.pdf> (In Russ.).
11. Georgievskaya E.V., Georgievsky N.V. Lifetime as a parameter of a generalized node under assessment of technical condition index of power equipment. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2021;4(348):43-50. (In Russ.).
12. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in conditions of digital economy. *Safety and Reliability of Power Industry*. 2017;10(4):268-274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274> (In Russ.).
13. Bogush B.B. On the modernization of equipment and the introduction of modern information technologies to ensure energy security and energy efficiency of HPP and PSPP // Energy efficiency and energy security of hydropower facilities in the context of modernization and digital transformation. Moscow; 2019. (In Russ.).
14. Sultanov M.M., Kuryanov V.N., Shamigulov P.V., Shubitov V.S. Planning of power line repair works based on the calculation of the technical condition index using a neural network model. *Energysaving and watertreatment*. 2021;6(134):69-73. (In Russ.).
15. Bannikova V.Yu., Garifullin M.Sh. Assessment of reliability of electrical equipment using the index of technical condition. *Tinchurin Readings – 2022 «Energy and Digital Transformation»: proceedings of the international youth scientific conference*. Vol. 1. Kazan: PK «Astor i Ya»; 2021. P. 7-9. (In Russ.).

16. Ivanchenko I.P., Topazh G.I., Schur V.A. Reliability estimation for hydro-turbines with prolonged lifetime. *St. Petersburg Polytechnic University Journal*. 2015; 2(219):7-15. DOI 10.5862/JEST.219.1. (In Russ.).

Информация об авторах

М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент, руководитель научно-исследовательской лаборатории Цифровых технологий;

Н.В. Байдакова – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник;

Ш.М. Милитонян – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории Цифровых технологий;

П.Д. Меньшиков – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории Цифровых технологий.

Information about the authors

M.M. Sultanov – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Digital Technologies;

N.V. Baidakova – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Lead Researcher;

Sh.M. Militonyan – Research Engineer of the Research Laboratory of Digital Technologies;

P.D. Menshikov – Research Engineer of the Research Laboratory of Digital Technologies.

Статья поступила в редакцию 11.10.2022; одобрена после рецензирования 29.10.2022; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 11.10.2022; approved after reviewing 29.10.2022; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 627.2

ВЫБОР КОНЦЕПЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Олег Михайлович Финагенов¹

¹ АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, finagenovom@vniig.ru

Аннотация. Проведен комплексный анализ возможных технических решений основных объектов разработки месторождений углеводородов в юго-западной части Карского моря, выбраны конкурентоспособные варианты для углубленного изучения на последующих этапах проектирования, выявлены критические технологии, необходимые для реализации выбранного концептуального решения, а также разработан график дальнейших работ.

Ключевые слова: *объект разработки, концептуальное решение, критерии, конструкции, проектирование*

Для цитирования: Финагенов О.М. Выбор концепции стационарной платформы с железобетонным опорным основанием для разработки месторождений арктического шельфа юго-западной части Карского моря // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 61–70.

Original article

CHOICE OF THE CONCEPT OF A STATIONARY PLATFORM WITH A REINFORCED CONCRETE BASE FOR THE DEVELOPMENT OF FIELDS ON THE ARCTIC SHELF IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE KARA SEA

Oleg M. Finagenov¹

¹ JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, finagenovom@vniig.ru

Abstract. A comprehensive analysis of possible technical solutions for the main objects of development of hydrocarbon fields in the southwestern part of the Kara Sea was carried out, competitive options were selected for in-depth study at subsequent design stages, critical technologies necessary for the implementation of the selected conceptual solution were identified, and a schedule for further work was developed.

Keywords: *development object, conceptual solution, criteria, constructions, design*

For citation: Finagenov O.M. Choice of the concept of a stationary platform with a reinforced concrete base for the development of fields on the arctic shelf in the south-western part of the Kara sea. *Proceedings of the VNIIG. 2023;307:61-70.* (In Russ.).

Введение

К основным объектам разработки месторождения относятся объекты, предназначенные для бурения, добычи, обработки и подготовки к транспортировке продукции. Как правило, эти объекты сосредоточены на морских нефтяных платформах, плавучих и стационарных.

Под концептуальным решением в работе понимается выбор типа (типов) сооружений и выбор оптимального варианта (оптимальных вариантов) конструкции среди полученного ряда сооружений, а также определение его основных габаритов, массы и проверка устойчивости на грунте (для сооружений, опирающихся на дно). Для плавучих сооружений проводится выбор типа райзеров и подбор основных характеристик якорных систем удержания.

Далее выбирается тип (или набор типов) сооружений и получаются основные технические характеристики оптимальных сооружений, выполняющих функциональные требования при заданных гидрометеорологических и грунтовых условиях. После чего из различных технически реализуемых вариантов с помощью ряда критериев, часть которых переведена в разряд ограничений, производится выбор оптимального варианта сооружения.

Для выбора оптимального сооружения необходимо разработать ряд критериев. К критериям, позволяющим определить оптимальное сооружение, можно отнести следующие [1]:

1. Апробированность технических решений.
2. Технологичность изготовления.
3. Состав материалов.
4. Материалоемкость каждого материала.
5. Соблюдение требований существующих нормативных документов.
6. Стоимость сооружения (учитывает 2, 3, 4).

Как правило, оптимальным является вариант сооружения и конструкции с наименьшей стоимостью. Следует отметить, что наиболее часто проводимый выбор оптимального сооружения исходя только из наименьшей материалоемкости, может приводить к ошибочным оценкам. Это происходит в связи с тем, что создание сооружения с наименьшей материалоемкостью может потребовать использования высокотехнологичных элементов с высокой стоимостью и операций по монтажу. Однако на этапе концептуального проектирования провести данную оценку затруднительно. Для того чтобы учесть все критерии, но упростить формальную процедуру учета всех критериев, их необходимо перевести в разряд ограничений.

Критерии выбора оптимального концептуального решения

На практике выбор концепции опорного основания обычно производится экспертным образом на основе гидрометеорологических условий, функциональных требований и ограничений (вопросов технологии строительства, транспортировки на место, установки и монтажа сооружения). В данном разделе будут представлены рекомендации по выбору типа сооружения на основе ряда факторов – «матрицы применимости». Необходимо отметить, что операция выбора может давать несколько решений.

Существуют различные варианты классификации морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений (МНГС) в зависимости от выбранного признака. Наибольшее распространение получила следующая классификация [1]:

1. По конструктивным материалам: грунтовые, ледовые, металлические, железобетонные, комбинированные.

2. По конструкционным особенностям: эстакады и приэстакадные площадки, дамбы и грунтовые площадки, стационарные платформы, погружные и полупогружные платформы, самоподъемные, маятниковые сооружения, на натяжных опорах (tension leg platform – TLP, рис. 1), платформы типа SPAR (рис. 2), буровые суда, технологические суда типа FPSO, FSRU (рис. 3).

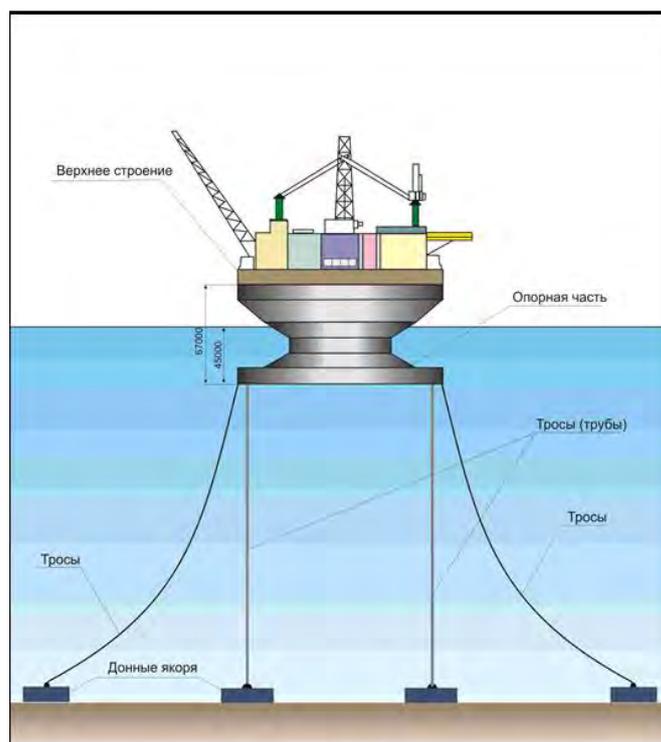


Рис. 1. Платформа на натяжных опорах (TLP)

3. По методам крепления к морскому дну: свайные, гравитационные, свайно-гравитационные, удерживающиеся с помощью якорных систем.

4. По признакам ледостойкости: ледостойкие, неледостойкие.

5. По функциональным признакам: для поисково-разведочного бурения, для бурения и эксплуатации скважин.

При выборе типа сооружения для участков незамерзающих и замерзающих морей необходимо также рассмотреть ряд факторов. К факторам, позволяющим выбрать тип сооружения, согласно [1] относятся:

- технологические;
- гидрометеорологические и географические;
- инженерно-геологические;
- производственные;
- экологические.

Выбор сооружения с использованием данных факторов представляет собой инструмент принятия решений.

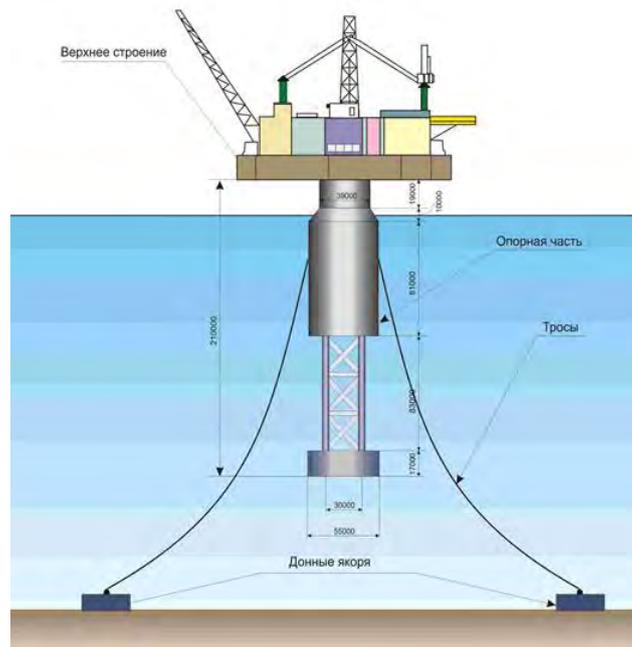


Рис. 2. Платформа типа SPAR



Рис. 3. Плавающая система для добычи, хранения и отгрузки (FPSO)

Технологические требования, предъявляемые к МНГС, являются определяющими. Основными факторами при этом являются: назначение скважин (разведочная, эксплуатационная, нагнетательная), количество скважин, длина скважин по стволу, технологическая схема подготовки продукции, объем материалов, требуемый для бесперебойной работы, вид добываемой продукции, тип транспорта (определяет требуемый объем нефтехранилища).

Основными гидрометеорологическими факторами при выборе типа сооружения являются глубина моря и наличие льда. Ледостойкость и учет возможности столкновения с айсбергами накладывает значительные ограничения на конструкцию, а глубина определяет тип сооружения.

Гидрометеорологические факторы определяют внешние нагрузки. Экстремальные высоты волн, толщины льда, а также изменение уровня воды (приливно-отливные и сгонно-нагонные явления) обуславливают клиренс сооружения.

К инженерно-геологическим факторам относятся: геологическое строение, тектонические процессы в районе строительства, физико-механические свойства грунтов, степень агрессивности морской воды по отношению к фундаменту. Сейсмичность района установки МНГС может стать определяющей при выборе типа опорного основания и оборудования верхнего строения.

Производственные факторы определяются наличием заводов, квалифицированной рабочей силы и береговой инфраструктуры, что, в свою очередь, обуславливает выбор материала для строительства опорной части сооружения. Производственные факторы также влияют на способ (технологию) транспортировки и монтажа сооружения.

Необходимо отметить, что производственные факторы следует перевести в разряд ограничений. Так, материал для изготовления опорного блока должен быть исходным параметром.

Экологические факторы учитываются путем разработки мероприятий по минимизации сбросов технологических и хозяйственно-бытовых отходов или обеспечения политики нулевого сброса в зависимости от действующего законодательства для акватории установки МНГС.

Основное отличие ледостойких сооружений – необходимость противостоять ледовым нагрузкам и возможным нагрузкам от айсбергов либо же иметь возможность уйти из опасного района, расположенного на пути дрейфа айсберга. Использование плавучих сооружений в мягких ледовых условиях возможно при детальном изучении ледовых нагрузок, которые приведены в [1]. В настоящее время рассматривается возможность строительства Floating Production Storage Offloading unit (FPSO) для условий арктического шельфа РФ.

В ледовых условиях для повышения надежности и эксплуатационной эффективности сооружения необходимо применять систему ледового менеджмента. Ледовый менеджмент – комплекс мероприятий, направленный на проведение ледового мониторинга, обработку полученных данных, выявление опасных ледовых образований, их отслеживание и в случае необходимости физическое воздействие на них (раскалывание ледяных полей, торосов, отклонение айсбергов от опасного курса дрейфа).

Глубина моря и ледовые условия – главные критерии. После выбора типа опорного основания и определения основных входных для проектирования данных, необходимо установить основные габаритные размеры конструкции.

При глубине более 40 м платформа находится, скорее всего, в транзитной зоне при частых подвижках льда.

Основными рекомендациями при выборе концепции платформы только по глубине моря являются: до 120 м – стационарные платформы, более 150 м – плавучие платформы, 120–150 м – в виду неопределенности возможных решений требуется более тщательное изучение [2].

На рис. 4 показаны возможные варианты МНГС в зависимости от глубины моря в месте установки сооружения.



Рис. 4. Варианты МНГС в зависимости от глубины моря

Ледорезная часть может быть с вертикальной и наклонной стенками, представлять собой прямой и обратный конический ледорез. Ледорезная часть может быть покрыта плакированной (двухслойной) сталью или может не иметь покрытия, но при этом должен учитываться износ материала поверхности.

Выбор типа платформ, обеспечивающего надежность эксплуатации, ограничен возможностью восприятия значительных ледовых нагрузок.

Оптимальная концепция МНГС для юго-западной части Карского моря

Условия работы на открытом воздухе в районе достаточно суровые, особенно зимой, когда температура наружного воздуха может понижаться до минус 40–50 °С, а ветер превышать 40 м/с [3]. Рассчитанный индекс ветрового охлаждения, характеризующий теплопотери человека и зависящий от сочетания температуры наружного воздуха и скорости ветра для этого района, составил летом 950–1000 единиц, а зимой почти в два раза больше – 1800 единиц.

Число дней с метелью и туманом, которые усложняют проведение работ на открытом воздухе за счет снижения видимости и создания других помех, составляет соответственно около 100 и 70–80 дней за год.

К неблагоприятным факторам в исследуемом районе относится значительная продолжительность полярной ночи (80–90 дней), в течение которой естественная освещенность в ноябре – январе близка к нулю.

Средняя продолжительность безледного периода изменяется в достаточно широких пределах – от 70 до 83 суток. Наибольшую повторяемость имеет диапазон 60–90 суток. Максимальная продолжительность безледного периода меняется в диапазоне от 116 до 158 суток. Оценки экстремальных значений продолжительности показывают, что 1 раз в 100 лет безледный период может достигать 155–182 суток, а 1 раз в 25–35 лет безледный период не наблюдается [3].

Осенью после начала устойчивого ледообразования происходит постоянное нарастание льда, которое заканчивается в течение мая. Толщина дрейфующих ровных льдов достигает максимальных значений в период с середины апреля до середины мая и составляет в среднем 1,5–1,8 м. Экстремальные значения толщины ровного льда могут достигать значений 2,1 м. Кроме того, дрейфующие ледяные поля обычно являются деформированными, имеют гряды торосов, существенно увеличивающие массу полей.

Айсберги по акватории юго-западной части Карского моря распределены крайне неравномерно. Максимальное их количество наблюдается вблизи Северного острова архипелага Новая Земля, то есть около очагов образования. Большая часть айсбергов так и не покидает заливов и бухт, медленно разрушаясь в них в течение летнего периода. Часть айсбергов выходит за пределы заливов и бухт и распространяется по акватории моря. У северной оконечности архипелага Новая Земля вероятность встречи с айсбергами доходит до 60 %. В южной части рассматриваемого района эта вероятность составляет 10 %. В среднем в каждом зимнем или летнем месяце может дрейфовать от 1 до 4 айсбергов или их обломков. В годы высокой концентрации айсбергов их количество возрастает до 10–15 дрейфующих объектов [3].

На основании анализа внешних условий юго-западной части Карского моря с использованием матрицы применимости морских сооружений можно сделать вывод, что наиболее перспективными для данных условий являются морские платформы, состоящие из стационарного железобетонного опорного основания и модулей верхнего строения, устанавливаемых на опорном основании.

Основными преимуществами применения стационарных железобетонных платформ являются [4]:

1. Относительно низкие капитальные и операционные затраты.
2. Устойчивость к внешним воздействиям.
3. Технологичность изготовления.
4. Технологичность транспортировки и установки на точке.

План-график выполнения работ

Для реализации выбранной концепции стационарной платформы с железобетонным опорным основанием гравитационного типа в соответствии с общемировой практикой представляется целесообразным выполнение работ по pre-FEED.

В рамках данных работ, продолжительность которых оценивается в 14–16 месяцев, предлагается реализация следующих задач.

Концептуальное проектирование опорного основания стационарной добычной платформы, включая:

- общее описание опорного основания и определение основных характеристик;
- предварительные чертежи общего расположения опорного основания;
- внешний облик опорного основания в 3D-модели;
- анализ воздействия ветро-волновых и ледовых нагрузок на опорное основание;

описание процесса строительства опорного основания, а также установки и интеграции с верхним строением (принципиальная технология строительства);

анализ остойчивости при транспортировке и установке платформы на точке;

оценочные расчеты устойчивости опорного основания на грунте;

оценочные расчеты веса опорного основания;

предварительные расчеты стоимости опорного основания;

рекомендации по изготовителям опорных оснований.

Концептуальное проектирование верхнего строения стационарной добычной платформы, включая:

краткую спецификацию верхнего строения стационарной добычной платформы;

перечень основного оборудования;

пояснительную записку по верхнему строению стационарной добычной платформы;

предварительные чертежи общего расположения;

внешний облик верхнего строения в 3D-модели;

описание и схемы производственного комплекса;

анализ воздействия нагрузок (ветровых, сейсмических, снеговых и от обледенения);

анализ вопросов по винтеризации платформы;

описание процесса строительства и ввода в эксплуатацию (принципиальная технология строительства);

оценочные расчеты веса верхнего строения;

оценочные расчеты стоимости верхнего строения;

рекомендации по изготовителям верхних строений.

Длительность последующих этапов работ (FEED, согласование, рабочее проектирование и строительство) определена экспертно с учетом уже реализованных проектов (таблица).

Таблица

План-график реализации дальнейших работ

Этап	14–16 месяцев	14–16 месяцев	10 месяцев	22–24 месяца	32–34 месяцев
pre-FEED					
FEED					
Согласование					
Рабочее проектирование					
Строительство					

Реализация выбранного концептуального решения

Для реализации выбранного концептуального решения необходимо следующее:

- новые технологии и оборудование для экспресс-анализа донных грунтов с автономных подводных комплексов;

- новые технологии отгрузки и транспортировки углеводородов танкерами;

- новые технологии и материалы для создания подводных коммуникаций (трубопроводы, силовые кабели, кабели связи);

- новые технологии и оборудование для мониторинга состояния объектов в процессе их эксплуатации;

- новые технологии по автоматизации процессов бурения и добычи углеводородов;

- новые технологии и оборудование для мониторинга и ликвидации разливов нефти во льдах;

- технологии, обеспечивающие надежное крепление к грунту (обеспечение устойчивости морских сооружений при воздействии льда);

 - металлокомпозитные материалы для опорных оснований платформ;

 - композитные материалы, обеспечивающие жизнедеятельность персонала и производственный цикл;

 - малогабаритные технологические установки по переработке нефти в традиционном морском и арктическом исполнении;

 - системы плавучих нефте- и газоперерабатывающих комплексов (плавучие заводы СПГ и GTL);

 - технологии бескранового монтажа верхних строений платформ (создание специализированной баржи для пересадки верхнего строения);

 - технологии создания временных сооружений в арктической зоне;

 - технологии укладки подводных трубопроводов в ледовой обстановке;

 - технологии мониторинга ледовой и метеорологической обстановки;

 - технологии обследования морского дна и подводного оборудования в условиях ледовой обстановки.

Заключение

Анализ показал, что выбор концепции базового сооружения основывается на морских условиях, функциональных требованиях и вопросах процесса строительства, транспортировки на площадку, установки и монтажа объекта и проводится с использованием действующего нормативного документа [5].

Определены факторы, позволяющие выбрать тип конструкции:

- технологические требования к МНГС имеют решающее значение;

- погодные воздействия определяют внешние нагрузки;

- сейсмическая активность в районе установки МНГС может стать решающей для выбора типа базовой конструкции и верхнего оборудования;

- производственные воздействия влияют на способ (технологию) транспортировки и установки объекта.

Анализ также показывает, что выбор типа платформ, обеспечивающих надежную работу при внешних воздействиях, ограничен способностью воспринимать значительные ледовые нагрузки.

Все эти факторы определяют продолжительность последующих этапов: FEED, согласование, рабочее проектирование и строительство.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мирзоев Д.А.** Основы морского нефтегазопромыслового дела. Том II: Морские нефтегазопромысловые инженерные сооружения – объекты обустройства морских нефтегазовых месторождений. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. 369 с.
2. **Мирзоев Д.А.** Основы оффшорной нефтегазовой отрасли. М.: Серебряный день, 2010. 73 с.
3. **Финагенов О.М.** Анализ природных условий юго-западной части Карского моря как района эксплуатации морских нефтегазопромысловых сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 297. С. 3–10.
4. **Финагенов О.М., Караев И.П.** Выбор рациональных вариантов стационарных нефтегазодобывающих платформ для обустройства месторождений Обской и Тазовской губ // Гидротехника. XXI век. 2013. № 4 (16). С. 57–61.
5. **СП 369.1325800.2017.** Платформы морские стационарные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018.

REFERENCES

1. Mirzoev D.A. Marine oil and gas business fundamentals. Том II. Offshore oil and gas field engineering constructions as an installation of offshore oil and gas field facilities. Moscow: Gubkin University; 2015. 369 p. (In Russ.).
2. Mirzoev D.A. Fundamentals of the offshore oil and gas industry. Moscow: Serebryany den'; 2010. 73 p. (In Russ.).
3. Finagenov O.M. Analysis of Environmental Conditions of South-West Part of the Kara Sea as an Area of Operation for Offshore Oil and Gas Field Structures. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2020;299:3-10. (In Russ.).
4. Finagenov O.M., Karaev I.P. The choice of rational options for stationary oil and gas production platforms for the development of the fields of the Ob and Taz bays. *Gidrotekhnika. XXI vek*. 2013;4(16):57-61. (In Russ.).
5. 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 20.03.2023.

The article was submitted 25.01.2023; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.

УДК 627.3

ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВАЙНЫХ НАБЕРЕЖНЫХ КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Владимир Сергеевич Назаров¹, Вячеслав Борисович Глаговский²

¹ «23 Государственный морской проектный институт» – филиал АО «31 ГПИСС», Санкт-Петербург, Россия, V.S.Nazaroff@gmail.com

² АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, GlagovskyVB@vniig.ru

Аннотация. Выполнены численные расчеты в программном комплексе PLAXIS для сравнения двух конструкций глубоководных свайных набережных: традиционного типа и комбинированной конструкции с частичной засыпкой грунтом пазухи под свайным ростверком и анкерровкой в береговом грунтовом массиве, показавшие эффективность комбинированной конструкции.

Ключевые слова: свайные набережные, комбинированная конструкция, численные расчеты, PLAXIS, эффективность

Для цитирования: Назаров В.С., Глаговский В.Б. Об оценке эффективности свайных набережных комбинированной конструкции // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 71–77.

Original article

ON EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF PILE QUAYS OF COMBINED STRUCTURE

Vladimir S. Nazarov¹, Vyacheslav B. Glagovsky²

¹ 23 State Marine Design Institute, branch of JSC «31 GPISS», V.S.Nazaroff@gmail.com

² JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, GlagovskyVB@vniig.ru

Abstract. Calculations to compare two structures of deep-water pile quays: a standard type and a combined structure with partial filling of the hollow under the pile grillage with soil and anchoring in a coastal soil mass were carried out using the PLAXIS program complex. Analysis showed the effectiveness of the combined structure.

Keywords: pile quays, combined structure, numerical calculations, PLAXIS, efficiency

For citation: Nazarov V.S., Glagovsky V.B. On evaluation of the efficiency of pile quays of combined structure. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:71-77. (In Russ.).

Сложность проектирования глубоководных набережных-стенок обусловлена значительными нагрузками от грунта, сила бокового давления которого увеличиваются пропорционально квадрату высоты набережной. Одной из основных сил, активно действующих на морские и речные портовые набережные, является распорное воздействие засыпки за сооружением с временной нагрузкой на них.

В технической литературе [1] разработаны общие конструктивные мероприятия в виде различных разгружающих устройств. Ранее в работе [2] авторами статьи на основе опыта строительства была предложена набережная комбинированной конструкции, включающая свайный ростверк, пазуха под которым засыпается грунтом лишь частично (рис. 1). Эти инженерные приемы реализуют уменьшение величины активных нагрузок, изменение их точки приложения и направления.

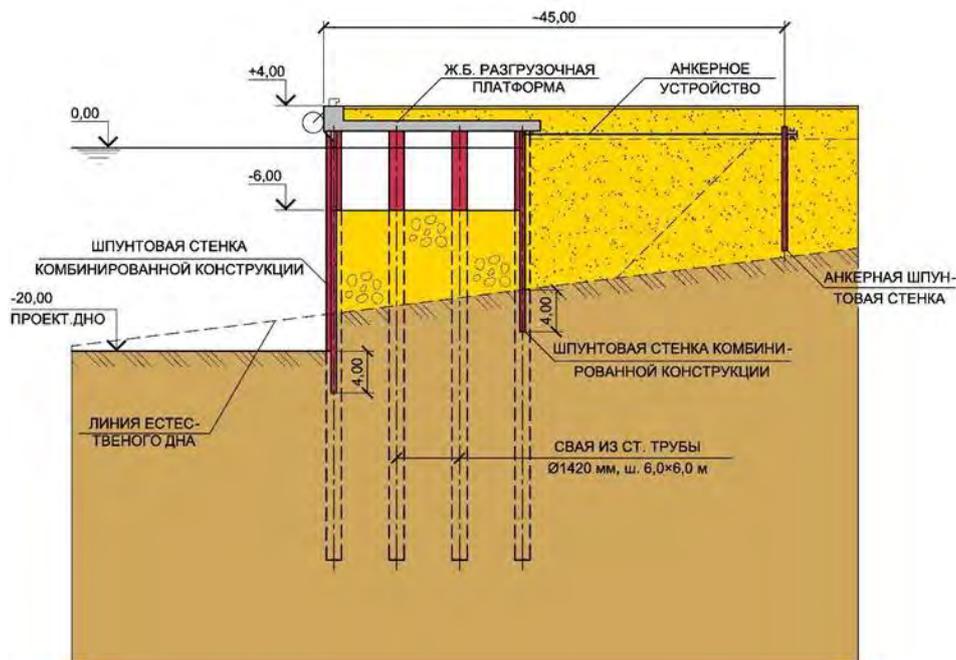


Рис. 1. Набережная комбинированной конструкции

Проектирование и расчет глубоководных набережных представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета совместной работы сооружения с грунтом основания и засыпкой. Сводом правил [3, п. 10.4] предписывается, что боковое давление грунта засыпки необходимо определять с учетом прочностных и деформационных характеристик грунта и ограждающей конструкции, условий на контакте грунта и сооружения, последовательности и характера нагружения системы «сооружение – основание», изменений уровней воды и прочих условий. Современные нормы расчета оснований гидротехнических сооружений ориентируют на расчет напряженно-деформированного состояния и устойчивости основания сооружения методом численного моделирования с использованием нелинейных моделей грунта [4].

Учитывая изложенное, исследование эффективности предложенной конструкции глубоководной набережной [2] выполняется на основе численного моделирования с использованием специализированной компьютерной программы PLAXIS, предназначенной для расчетов напряженно-деформированного состояния комплексных геотехнических систем методом конечных элементов (рис. 2). Известным специалистом по численным методам

расчета в геотехнике А.Б. Фадеевым [5] отмечается, что программный комплекс PLAXIS является авторитетным, международно признанным, эффективным инструментом численного моделирования геотехнических задач. Свобода программы от ряда допущений, характерных для инженерных методов, позволяет получить более достоверные результаты расчета.

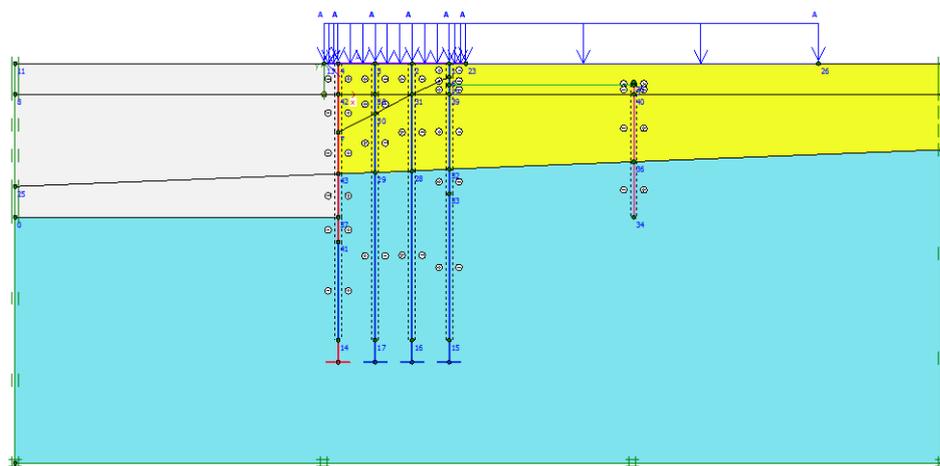


Рис. 2. Общий вид расчетной модели

Для расчета принимается морская глубоководная высоконагруженная набережная для условий Балтийского бассейна. Свободная высота стенки – 25 м, расчетная равномерно распределенная нагрузка на территории – 120 кПа.

Ледовые и волновые условия умеренные и не оказывают решающего влияния на выбор конструкции набережной. Это дает возможность во избежание загромождения расчетов не учитывать их на настоящем этапе расчета.

Расчеты выполняются для двух вариантов конструкций, оба из них представляют собой высокий свайный ростверк, верхнее строение которого является разгрузочной платформой. Свайное основание конструкции выполняется на основе труб $\text{Ø } 1420 \times 20$ мм, погружаемых либо в ряд, либо в виде стенки из трубошпунта. Анкеровка выполняется тягой за дополнительно устраиваемую в тыловой части сооружения анкерную стенку из шпунта корытного профиля.

По варианту 1 конструкция набережной традиционная [6, п. 2.5], в виде высокого свайного ростверка с передним шпунтом (рис. 3, а). Ростверк опирается на сплошную лицевую стенку и тыловые свайные опоры, погруженные с шагом 3,18 м, принятым кратным шагом трубошпунтовых элементов. Засыпка под ростверком выполняется песчаным грунтом на полную высоту.

По варианту 2 (рис. 3, б), в отличие от предыдущего варианта, каменная засыпка пазухи под ростверком не доводится до верха и образует подпричальный волногасящий откос неполного профиля. Лицевая стенка в зоне откоса выполняется проницаемой, а тыловой ряд свайных опор в месте примыкания откоса, напротив, представляет собой сплошную стенку.

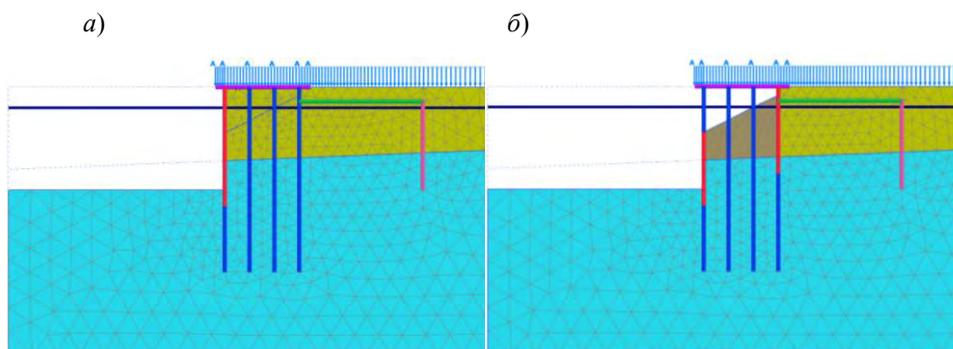


Рис. 3. Сетка конечных элементов для расчетов сооружений:
a – по варианту 1; *б* – варианту 2

Грунтовые условия средние: основание представлено глинистыми грунтами с углом внутреннего трения 17° , сцеплением 20 кПа, удельным весом $20,6 \text{ кН/м}^3$. Образование тыловой территории выполняется качественным песчаным грунтом, при этом по варианту 2 засыпка пазухи между стенками устраивается из камня. Перечисленные материалы отображаются на рис. 3, 4 соответственно желтым и коричневым цветами.

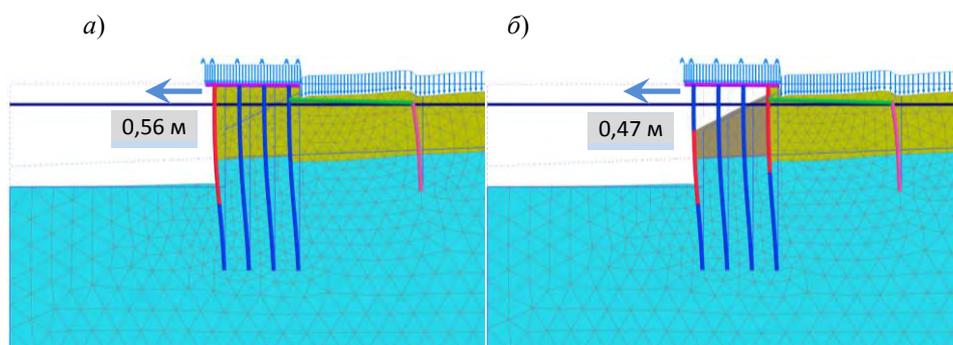


Рис. 4. Деформированная сетка конечных элементов при расчетах конструкции:
a – по варианту 1; *б* – варианту 2

Схематизация конструкций выполняется с учетом рекомендаций нормативно-технической литературы и опыта выполнения расчетов [5, 6, 7]. Грунт моделируется с использованием модели упрочняющегося грунта, что позволяет более достоверно описывать поведение грунтового основания. Для каждого элемента конструкций рассчитываются необходимые жесткостные и весовые характеристики, отображаемые на рис. 3–5 различными цветами.

Результаты расчета сооружения демонстрируются деформированной схемой системы (рис. 4), эпюрой усилий в элементах конструкций (рис. 5) и картиной приращений перемещений на последнем шаге расчета, характеризующей механизм разрушения основания сооружения (рис. 6). Во избежание загромождения схем на них не отображены интерфейсы, гидростатическое давление воды и упругие опоры под нижними концами свай, моделирующие податливость их опирания, при этом для наглядности деформации увеличены в 5 раз.

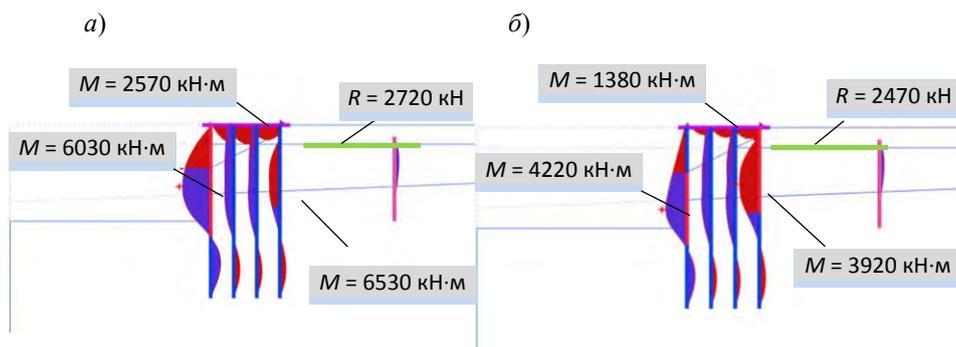


Рис. 5. Эпюры изгибающих моментов в системе M и значение растягивающей силы R в анкере при расчетах конструкции:
a – по варианту 1; *б* – варианту 2

Масштаб эпюры изгибающего момента (рис. 5) соответствует одному погонному метру длины сооружения для всех элементов конструкции без учета их шага. Значения усилий для трубошпунтовой сваи, сваи-оболочки и анкера приводятся в пересчете на элемент с учетом их шага по длине причала, усилие в верхнем строении соответствует погонному метру конструкции.

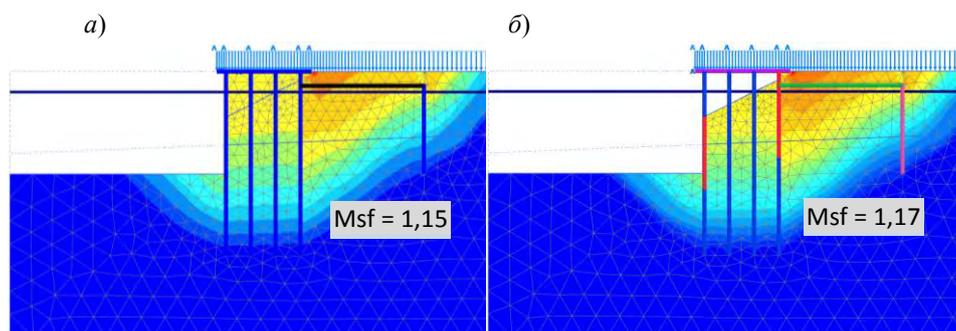


Рис. 6. Механизм разрушения грунтового основания при расчетах конструкции:
a – по варианту 1; *б* – варианту 2

В таблице приведены некоторые основные результаты выполненных расчетов для сопоставления двух вариантов конструкции.

Сопоставление результатов расчета (таблица, рис. 4–6) позволяет сделать следующие выводы:

предлагаемая конструкция позволяет на 30 % разгрузить свайные элементы и на 46 % разгрузить ростверк;

распределение усилий в свайных элементах по предлагаемому варианту достаточно равномерное, в отличие от традиционного варианта;

усилие в анкерной тяге уменьшается на 9 %;

горизонтальное перемещение ростверка для традиционной конструкции составляет 56 см, что превышает допустимое значение 50 см; для предлагаемой конструкции перемещение конструкции снижается до приемлемого значения 47 см;

коэффициент устойчивости увеличивается незначительно, до 2 %.

Сопоставление результатов расчета по вариантам

Расчетный показатель	Вариант 1	Вариант 2	Улучшение работы
Максимальное перемещение ростверка, см	56	47	16 %
Максимальный изгибающий момент в свайном элементе, кН·м	6030	4220	30 %
Максимальный изгибающий момент в ростверке, кН·м	2570	1380	46 %
Максимальное усилие в тяге, кН	2720	2470	9 %
Коэффициент общей устойчивости	1,15	1,17	2 %

Таким образом, для предлагаемой [2] конструкции реализуется более выгодное напряженное состояние по сравнению с традиционным вариантом конструкции [6]. Для заданных расчетных условий обеспечиваются допустимые перемещения и достигается разгрузка конструкции до 46 %, что позволяет сделать выводы о рациональности и экономичности конструктивного решения. Конструкция имеет перспективы применения для создания глубоководного причального фронта с высоконагруженной территорией. В дальнейшем предполагается выполнение расчетных исследований поведения конструкции при различных видах нагрузок (волновые, ледовые, от судов, неравномерная нагрузка на причал, динамические нагрузки).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Дуброва Г.А.** Методы облегчения и удешевления гидротехнических сооружений. М.: Речной транспорт, 1959. 340 с.
2. **Назаров В.С., Глаговский В.Б.** Свайные набережные комбинированной конструкции // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 91–96.
3. **СП 101.13330.2012.** Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095534>.
4. **Беллендир Е.Н. и др.** О новой редакции СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений» / Е.Н. Беллендир, В.Б. Глаговский, А.Л. Гольдин, В.С. Прокопович, Ю.Г. Смирнов, Т.Ю. Векшина // Гидротехническое строительство. 2011. № 6. С. 60–62.
5. **Фадеев А.Б.** Параметры модели упрочняющегося грунта программы «PLAXIS» // Численные методы расчетов в практической геотехнике: Сб. статей международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2012. С. 13–20.
6. **РД 31.31.55-93.** Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035462>.
7. **Brinkgreve R.B.J., Broere W., Waterman D.** Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: User Manual. Rotterdam: Balkema, 2012.

REFERENCES

1. Dubrova G.A. Methods of facilitating and reducing the cost of hydraulic structures. Moscow: Rechnoy transport; 1959. 340 p. (In Russ.).
2. Nazarov V.S., Glagovsky V.B. Pile quays with combined structure. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;302:91-96. (In Russ.).
3. SP 101.13330.2012. Retaining walls, navigation locks, fish passing and fish protection facilities. Updated version of the SNiP 2.06.07-87. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095534>. (In Russ.).
4. Bellendir E.N. et al. About the new edition of the SNiP 2.02.02-85 «Foundation of hydraulic structures». *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2011;6:60-62. (In Russ.).
5. Fadeev A.B. Parameters of the hardening soil model of the PLAXIS program. *Numerical methods of calculations in practical geotechnics*: Collection of articles of the International Scientific and Technical Conference. Saint Petersburg: SPbGASU; 2012. P. 13-20. (In Russ.).
6. RD 31.31.55-93. Instructions for the design of marine berthing and shore protection structures. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035462>. (In Russ.).
7. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Waterman D. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: User Manual. Rotterdam: Balkema, 2012.

Информация об авторах

В.С. Назаров – главный инженер проекта;

В.Б. Глаговский – доктор техн. наук, начальник отдела перспективных научно-исследовательских разработок.

Information about the authors

V.S. Nazarov – Chief Project Engineer;

V.B. Glagovsky – Dr. Sci. (Technology), Head of Department of Advanced Research and Development.

Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена после рецензирования 06.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 21.12.2022; approved after reviewing 06.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 624.131.65:626/627

МЕТОД УКРЕПЛЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПЛОТИН ИЗ МОРЕННОГО ГРУНТА

**Станислав Викторович Сольский¹, Валерий Александрович Клушенцев²,
Елена Владимировна Герасимова³**

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

¹ solsky@yandex.ru

² klushentsevva@vniig.ru

³ gerasimovaev@vniig.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросу повышения надежности эксплуатации однородных плотин из моренного грунта. На основе анализа конструктивных особенностей, специфики строительства и проблем эксплуатации предложены варианты повышения фильтрационной прочности и надежности работы однородных плотин из моренного грунта. Разработана и апробирована в лабораторных условиях методика укрепления плотин из моренного грунта для повышения их фильтрационной прочности.

Ключевые слова: *фильтрационная прочность, морена, грунтовые плотины, технологии ремонта плотин, замыв низового банкета*

Для цитирования: Сольский С.В., Клушенцев В.А., Герасимова Е.В. Метод укрепления однородных плотин из моренного грунта // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 78–88.

Original article

METHOD OF STRENGTHENING HOMOGENEOUS DAMS FROM MORAINЕ GROUND

Stanislav V. Solsky¹, Valery A. Klushentsev², Elena V. Gerasimova³

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

¹ solsky@yandex.ru

² klushentsevva@vniig.ru

³ gerasimovaev@vniig.ru

Abstract. The article is devoted to the issue of improving the reliability of the operation of homogeneous dams from moraine ground. The options for improving the filtration strength and operational reliability of homogeneous dams from moraine ground have been proposed based on the analysis of design features, construction specifics and operational problems. A method for strengthening dams from moraine ground has been developed and tested in laboratory conditions to increase their filtration strength.

Keywords: *filtration strength, moraine, ground dams, dam repair technologies, eroded orientation of downstream banked earth*

For citation: Solskiy S.V., Klushentsev V.A., Gerasimova E.V. Method of strengthening homogeneous dams from moraine ground. *Proceedings of the VNIIG. 2023;307:78-88.* (In Russ.).

Моренные грунты, представляющие собой геологические отложения (от валунов до суглинков и глин), образованные в результате перетирания обломков при движении ледника, широко представлены на территории Российской Федерации (Мурманская, Архангельская, Вологодская, Псковская и Ленинградская области, а также республика Карелия) [1].

Достаточный объем запасов и относительная простота добычи (открытым способом) делает этот материал довольно привлекательным и востребованным для строительства объектов различного назначения. Моренный грунт применяется и при возведении гидротехнических сооружений – однородных плотин и дамб.

На рис. 1 представлены типовые варианты конструкции плотин из моренного грунта на примере сооружений каскада Кемских ГЭС. Типовая плотина состоит из одного-двух упорных дренажных банкетов, сложенных крупнообломочным материалом, между которыми отсыпан с уплотнением моренный грунт, составляющий тело плотины [2].

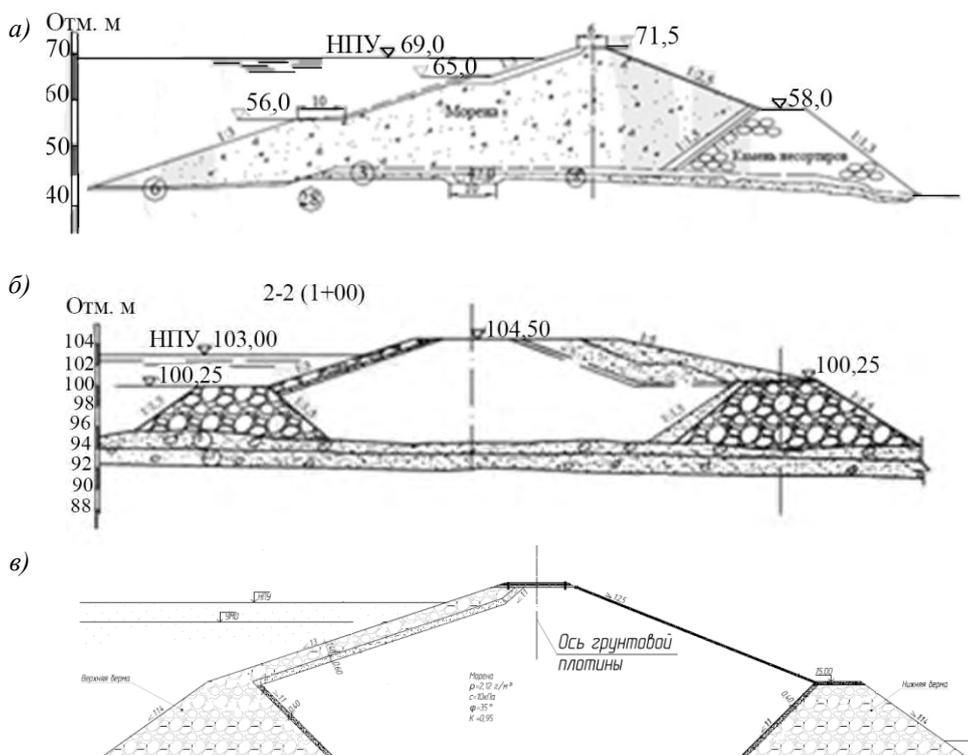


Рис. 1. Типовые конструкции грунтовых плотин из моренного грунта:
 а – Кривопорожская ГЭС; б – Юшкозерская ГЭС; в – Белопорожские МГЭС

Морены – ледниковые образования, которые характеризуются большим разнообразием гранулометрического состава. На основе анализа фондовых материалов было установлено, что около 60 % таких опробованных отложений – суглинки, более 33 % – супеси, менее 10 % – глины. Морен-

ные образования часто содержат единичные включения валунов различных размеров, реже в их толще встречаются скопления крупнообломочных включений [3].

Указанные характеристики моренного грунта в совокупности с недостаточным учетом этих особенностей в процессе строительства могут привести к следующим проблемам при эксплуатации плотин:

1. Наличие на контакте сопряжения плотины с основанием ослабленных в противодиффузионном отношении зон, ориентированных поперек плотины.

2. Сегрегация укладываемой морены тела плотины в процессе выравнивания на картах укладки с образованием прослоев различной водопроницаемости.

3. Недоуплотнение грунта на участках примыкания к бетонным сооружениям, скальным бортам и увалам, что также может привести к образованию своеобразных слабых «каналов», понижающих диффузионную прочность.

4. Наличие в моренном грунте включений размером более 20 см при укладке может приводить к образованию локальных скоплений крупных фракций, не полностью заполненных мелкоземом, что также ослабляет противодиффузионные характеристики грунтового массива.

5. Переходные зоны на контакте грунтов тела плотины и низового банкета являются слабой зоной с точки зрения диффузионно-суффозионной устойчивости (при некачественном их выполнении возможно развитие сквозного выноса диффузионным потоком частиц грунтового материала из тела плотины).

6. Сложность точного соблюдения требуемых проектом характеристик моренного грунта тела плотины на всем ее протяжении и объеме, в связи с большим их разбросом в карьерах местных грунтовых материалов.

Как правило, большинство этих проблем можно решить путем ужесточения требований геотехконтроля в процессе строительства [4]. Так, для возведения основной части тела земляной насыпной плотины непригодны:

грунты, содержащие водорастворимые включения в виде солей хлоридных в количестве более 5 % по массе или солей сульфатных и хлоридно-сульфатных в количестве более 10 % по массе;

грунты, содержащие не полностью разложившиеся органические вещества (остатки растений) в количестве более 5 % по массе или полностью разложившиеся органические вещества, находящиеся в аморфном состоянии, в количестве более 8 % по массе.

Указанные грунты могут применяться только в исключительных случаях при наличии соответствующего обоснования и при условии (в случае необходимости) проведения инженерных мероприятий, указанных в проектной документации.

При соответствующем обосновании в проектной документации для возведения тела плотины могут быть использованы суффозионные и пучинистые грунты. В теле плотины из суффозионных грунтов следует предусматривать создание противодиффузионных устройств, снижающих скорости фильтрации. При использовании грунтов, склонных к морозному пучению, необходима отсыпка защитных слоев из песка (средней круп-

ности, крупного и гравелистого), крупнообломочных грунтов и мелко-го камня.

Наилучшими грунтами для образования основной части тела плотины являются:

грунт достаточно водонепроницаемый (например, имеющий коэффициент фильтрации $k = 10^{-4} \div 10^{-2}$ см/с);

грунт, легко приспособляющийся к деформациям тела плотины (деформирующийся без образования трещин и зон разрыхления);

грунт достаточно прочный, т. е. характеризующийся большими значениями угла внутреннего трения и величиной удельного сцепления;

грунт легко уплотняемый (с небольшой затратой работы грунтоуплотняющих механизмов).

Указанным требованиям удовлетворяют супесчаные и суглинистые грунты, а также песок мелкой и средней крупности.

Для плотин, возводимых из грунта неоднородного состава, содержащего в виде включений крупнообломочный материал, устанавливается допустимый размер крупных фракций, который не должен превышать половины толщины отсыпаемого слоя грунта в уплотненном состоянии.

При появлении в процессе эксплуатации проблем с состоянием грунтовых плотин, построенных из моренного грунта, возникает необходимость их укрепления. Для этого могут быть применены различные методы и конструктивные решения, которые различаются по возможности их реализации:

1. Полный вывод сооружения из эксплуатации и ведение работ насухо (рис. 2).

2. Без вывода объекта из эксплуатации или работа на пониженных напорах (рис. 3).

Также возможна комбинация нескольких из перечисленных способов. Все эти мероприятия направлены на обеспечение фильтрационной прочности, суффозионной устойчивости сооружения и удлинение пути фильтрации в теле плотины.

Из всех перечисленных выше способов замыв низового банкета представляется наиболее перспективным, так как он наименее экономически затратен, эффективен по фильтрационным показателям и наиболее пригоден в качестве ремонтных работ. Однако на сегодняшний день практически отсутствует опыт его применения в гидротехническом строительстве.

Исследованиям авторов в области проработки этого варианта повышения фильтрационной прочности плотин из моренного грунта посвящена данная статья. Нами сформулированы следующие требования к замываемому грунтовому материалу [5, 6].

1. Замываемый песчано-гравелистый материал должен свободно проникать сквозь поры низового банкета на всю его мощность и заполнять поровое пространство на максимально возможный объем.

2. Замываемый песчано-гравелистый материал должен обеспечивать фильтрационно-суффозионную устойчивость грунта тела плотины и быть суффозионно устойчивым.

3. Материал должен обладать фильтрационной прочностью и не вымываться из тела банкета под воздействием формирующегося в нем филь-

традиционного градиента при пропуске фильтрационного расхода плотины в поперечном и продольном направлениях и при колебании уровня воды.

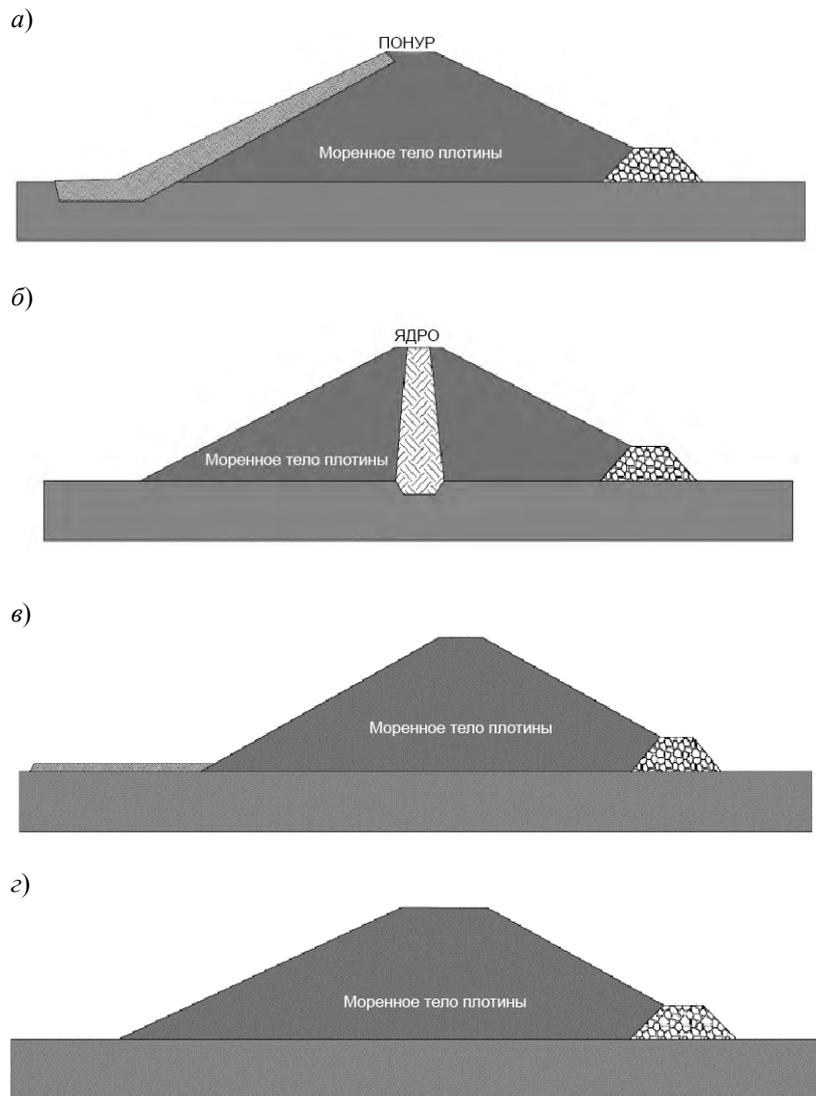


Рис. 2. Способы повышения надежности и живучести однородных плотин из моренного грунта путем повышения их фильтрационной прочности с полным выводом из эксплуатации и ведением работ насухо:
a – противофильтрационный экран; *б* – ядро; *в* – понур; *г* – изменение очертания плотины с расширением ее габаритных размеров

В лаборатории фильтрационных исследований им. акад. Н.Н. Павловского авторами данной статьи был разработан метод реализации замысла, включающий в себя следующие шаги:

1. Определение максимального размера частиц, проникающих в поровое пространство грунта, образующего низовой банкет (оценка просыпаемости грунтовых частиц) [8].

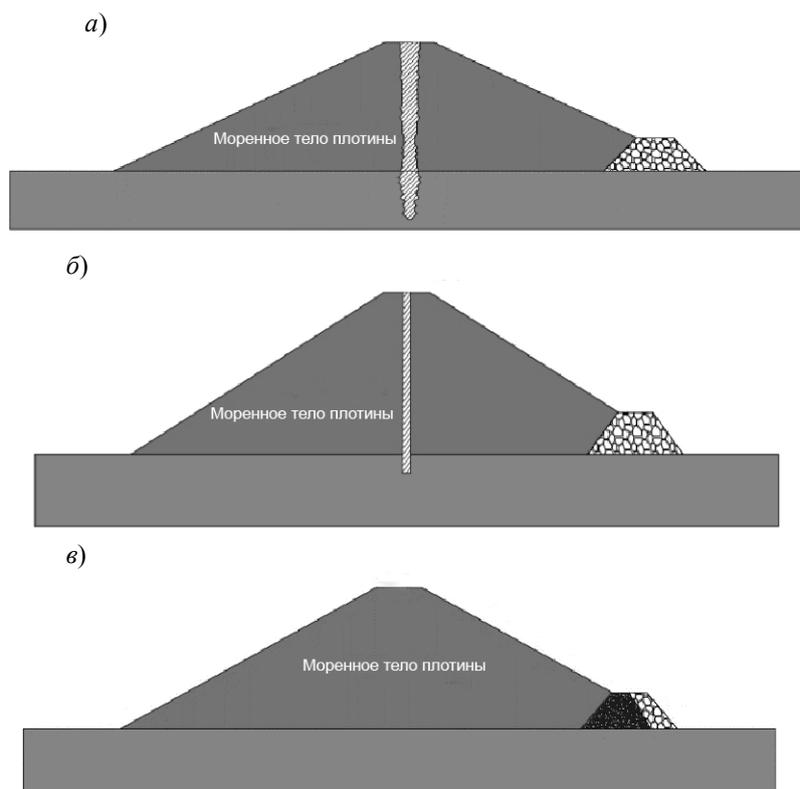


Рис. 3. Способы повышения надежности и живучести однородных плотин из моренного грунта путем повышения их фильтрационной прочности без вывода объекта из эксплуатации или при работе на пониженных напорах [7]:

a – цементационная завеса; *б* – стена в грунте или ГЦБД; *в* – замыв низового банкета

2. Определение предельной крупности колюматизирующих частиц.
3. Расчет сопряжения материала тела плотины с материалом замываемого банкета.
4. Определение гранулометрического состава материала обратного фильтра, обеспечивающего устойчивое сопряжение с ним грунта тела плотины.
5. Определение фильтрационной прочности материала состава обратного фильтра с учетом наличия в нем крупных частиц, обеспечивающих его устойчивое нахождение в теле банкета.
6. Подбор соотношения мелких частиц обратного фильтра, обеспечивающих контакт с телом плотины, и крупных, обеспечивающих фильтрационную прочность обратного фильтра в теле банкета.
7. Расчет максимального выходного градиента, обеспечивающего фильтрационную прочность материала замыва низового банкета.
8. Оценка раскладки замываемого материала в теле низового банкета.
9. Оценка интенсивности замыва.

Апробация разработанного метода в лабораторных условиях была проведена на примере грунтовой плотины Белопорожских МГЭС, входящих в каскад Кемских ГЭС. По результатам полевых исследований установлено, что переходный слой контакта «моренное тело грунтовой плотины – низовой банкет из крупнообломочного материала» не в полной мере

обеспечивает защиту тела плотины от фильтрационных деформаций (суффозионного выноса моренного материала в тело банкета и далее в нижний бьеф). В качестве одного из вариантов решения данной проблемы был проработан вопрос создания на эксплуатирующемся объекте в теле низового банкета своеобразного обратного фильтра методом замыва.

В результате определения сопряжения материала тела плотины с материалом замываемого банкета получен гранулометрический состав замываемого грунтового материала и определена фракция его частиц 0,02–15 мм (рис. 4).

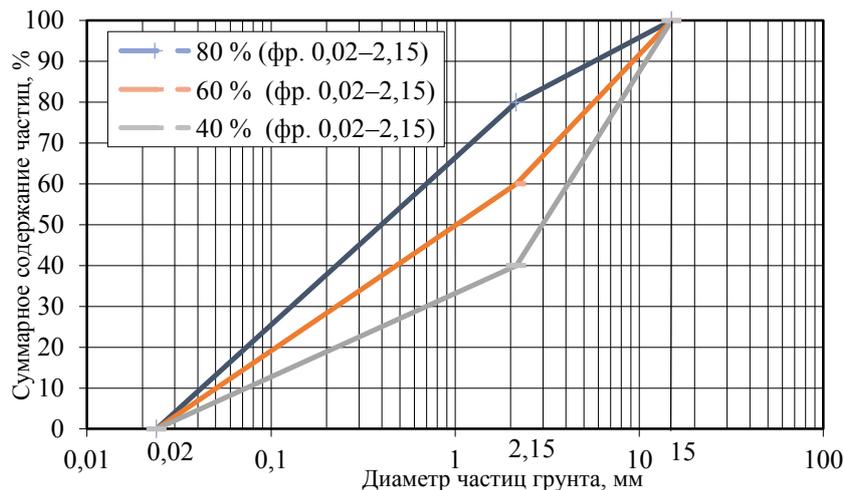


Рис. 4. Подбор пропорции содержания в замываемом грунте мелких (от 0,02 до 2,15 мм) и более крупных (от 2,15 до 15 мм) фракций, обеспечивающих фильтрационно-суффозионную устойчивость грунта тела плотины [9]

Подобрана пропорция содержания в замываемом грунте мелких (от 0,02 до 2,15 мм) и более крупных (от 2,15 до 15 мм) фракций (рис. 5), обеспечивающих фильтрационно-суффозионную устойчивость грунта тела плотины, которая достигается при использовании смеси, состоящей на 80 % из фракций 0,02–2,15 мм.

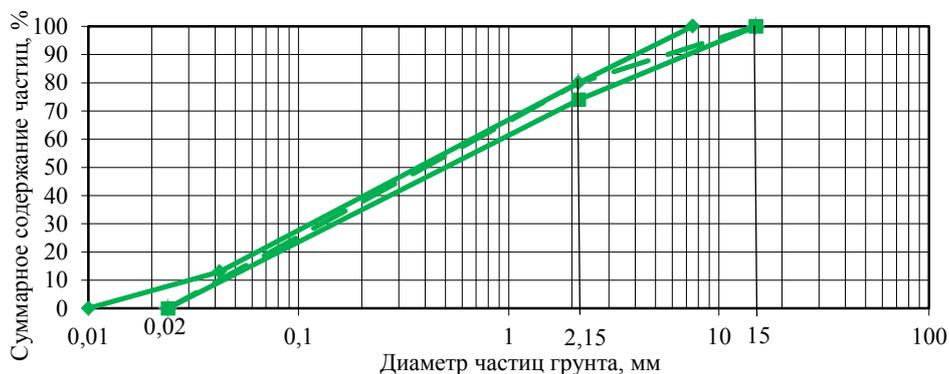


Рис. 5. Допустимые границы грансостава замываемого грунта в банкет

Для визуализации происходящих процессов выполнено имитационное моделирование фильтрационно-суффозионных процессов при замыве модельного грунта банкета (щебень фракцией 20–40 мм). Результаты моделирования в вертикальном фильтрационно-суффозионном приборе [10], при проведении которого были зафиксированы признаки существенного замыва грунта, приведены на рис. 6.

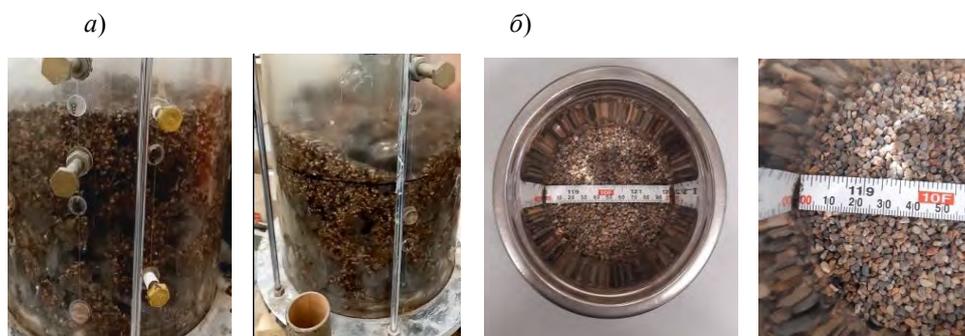


Рис. 6. Моделирование фильтрационно-суффозионных процессов при замыве частиц в модельный грунт банкета (фракция 20–40 мм) в вертикальном фильтрационно-суффозионном приборе:
а – замыв грунта в поровое пространство тела; *б* – грунт, просыпавшийся в песколовку в ходе опыта

При определении характеристик распределения материала засыпки (замыва) в теле низового банкета в горизонтальном фильтрационно-суффозионном приборе были зафиксированы признаки существенного замыва грунта в модельный грунт банкета (рис. 7).

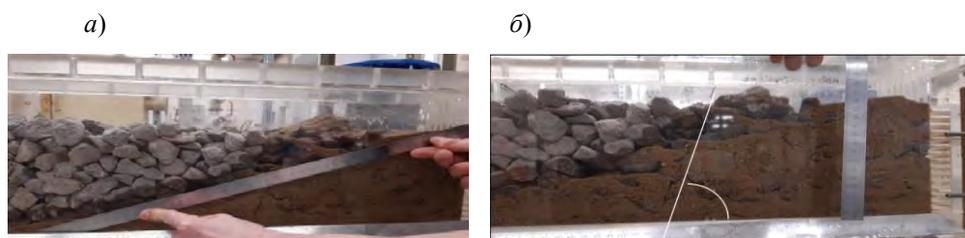


Рис. 7. Определение характеристик распределения материала засыпки (замыва) в теле низового банкета в горизонтальном фильтрационно-суффозионном приборе:
а – угол заложения откоса, сформировавшийся в результате замыва кольматирующих частиц в модельный грунт банкета, 1:5; *б* – угол заложения откоса, сформировавшийся в результате просыпания сухих частиц в модельный грунт банкета, 1:2

Также в лабораторных условиях были определены углы заложения откоса, сформировавшиеся в результате просыпания сухих кольматирующих частиц и в результате замыва в модельный грунт банкета (рис. 8).

Угол естественного откоса крупного песка в воздушно-сухом состоянии составляет $36,5^\circ$, под водой $32,3^\circ$. Угол естественного откоса дрсвяного грунта фракцией 2–2,5 мм в воздушно-сухом состоянии $36,8^\circ$, под водой 35° .

На основании проведенных лабораторных исследований авторами разработано предложение по организации опытного полигона для проведе-

ния опытно-производственной проверки технологии замыва пор каменного банкета в натуральных условиях. Опытный участок (полигон) организуется на площадке строительства с целью уточнения характеристик замываемого в тело банкета грунтового материала (рис. 9).

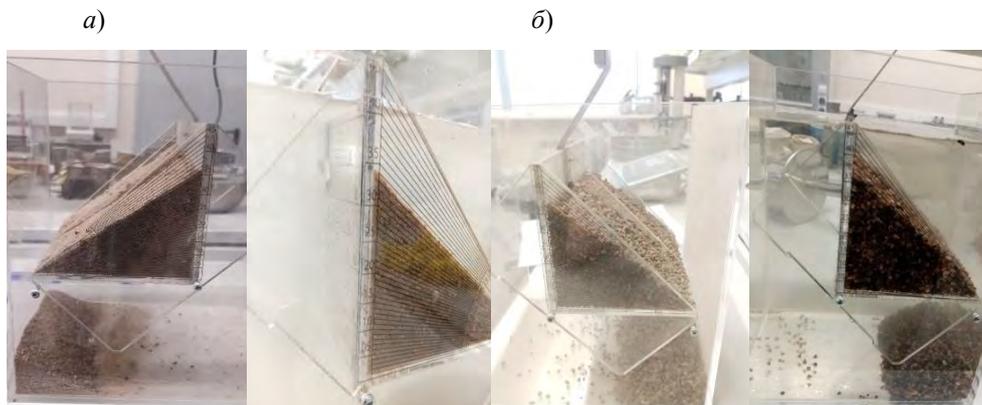


Рис. 8. Определение угла естественного откоса материала засыпки (замыва) в теле низового банкета в воздушно-сухом состоянии и под водой для крупного песка и дровяного грунта фракцией 2–2,5 мм:
a – угол откоса песка; *б* – угол откоса дровяного грунта

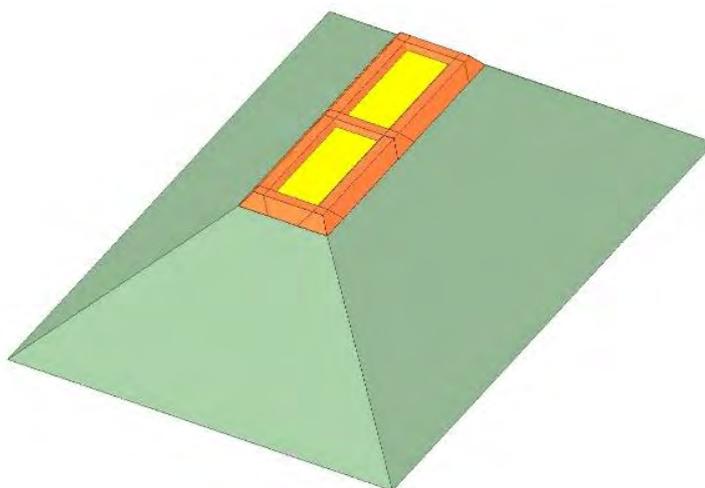


Рис. 9. Макет-схема опытного полигона

На опытном участке (полигоне) можно провести замыв 2–3 различных вариантов смеси и подобрать оптимальную интенсивность замыва с последующей проверкой созданной конструкции путем шурфования.

Заключение

1. Разработана и апробирована в лабораторных условиях методика укрепления плотин из моренного грунта для повышения их фильтрационной прочности и надежности работы путем замыва низового банкета.

2. На примере конструкции и материалов грунтовой плотины Белопорожских МГЭС, входящих в каскад Кемских ГЭС, получены оптимальные физико-механические характеристики материала для замыва.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Каган А.А., Солодухин М.А.** Моренные отложения Северо-Запада СССР (инженерно-геологические характеристики). М.: Недра, 1971. 139 с.
2. **Инструментальный контроль** за состоянием гидротехнических сооружений / [Э.К. Александровская, В.Н. Жиленков, М. Павич и др.]. М.: Энергопрогресс, 2001. 101 с.
3. **Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В.** Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. Вып. 1. С. 1–47.
4. **СТО ВНИИГ 05.12.01-1.2022.** Руководство по геотехническому контролю при подготовке оснований и возведении насыпных грунтовых плотин. СПб.: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2022. 123 с.
5. **Буренкова В.В., Буренков П.М.** Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания // Природообустройство. 2020. № 4. С. 84–91.
6. **Праведный Г.Х.** Проектирование и подбор гранулометрического состава фильтров переходных зон высоких плотин. М.; Л.: Энергия. 1966. 83 с.
7. **Орищук Р. Н.** Новые конструкции грунтовых плотин с глиноцементобетонными диафрагмами // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 292. С. 21–29.
8. **П 92-80/ВНИИГ.** Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1981. 105 с.
9. **ГОСТ 12536-2014.** Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
10. **П 12-83/ВНИИГ.** Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1983. 64 с.

REFERENCES

1. Kagan A.A., Solodukhin M.A. Moraine deposits of the North-West of the USSR (engineering and geological characteristics). Moscow: Nedra; 1971. 139 p. (In Russ.).
2. Instrumental monitoring of the condition of hydraulic structures. Moscow: Energoprogress; 2001. 101 p. (In Russ.).
3. Dashko R.E., Alexandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Features of engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2011;1:1-47. (In Russ.).
4. STO VNIIG 05.12.01-1.2022. Guidelines for geotechnical control in the preparation of foundations and the construction of bulk soil dams. Saint Petersburg: Publishing House of JSC «Vedeneev VNIIG»; 2022. 123 p. (In Russ.).
5. Burenkova V.V., Burenkov P.M. Domestic experience of assessing the filtration strength of non-cohesive soils of dam body and base. *Prirodoobustroytvo – Environmental Engineering*. 2020;4:84-91. (In Russ.).
6. Pravedny G.Kh. Design and selection of granulometric composition of filters of transition zones of high dams. Moscow; Leningrad: Energiya; 1966. 83 p. (In Russ.).

7. Orishchuk R.N. New designs of soil dams with clay-cement-concrete diaphragms. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;292:21-29. (In Russ.).

8. P 92-80/VNIIG. Recommendations for the design of reverse filters of hydraulic structures. Leningrad: Vedeneev VNIIG; 1981. 105 p. (In Russ.).

9. GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standartinform, 2019. 19 p. (In Russ.).

10. P 12-83/VNIIG. Recommendations on the methodology of laboratory testing of soils for water permeability and suffusion resistance. Leningrad: Vedeneev VNIIG; 1983. 64 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С.В. Сольский – доктор техн. наук, главный научный сотрудник;

А.В. Клушенцев – научный сотрудник;

Е.В. Герасимова – ведущий инженер.

Information about the authors

S.V. Solsky – Dr. Sci. (Techn.), Chief Researcher;

V.A. Klushentsev – Researcher;

E.V. Gerasimova – Leading Engineer.

Статья поступила в редакцию 28.12.2022; одобрена после рецензирования 21.01.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 28.12.2022; approved after reviewing 21.01.2023; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 624.131.372/373:626/627

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ГРУНТОВЫХ ГТС С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕМБРАНЫ В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Светлана Анатольевна Соснина¹, Надежда Ивановна Юрова²

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

¹ sosninas@vniig.ru

² yurovani@vniig.ru

Аннотация. На примере ограждающей дамбы хвостового хозяйства было проведено сравнение результатов расчетов фильтрационного режима и устойчивости сооружения при разных способах моделирования повреждения геомембраны. Расчеты дамбы шламоохранилища выполнялись методом конечных элементов с использованием программного комплекса PLAXIS 2D. На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости разработки нормативных требований и методики по учету возможного повреждения геомембран, учитывая их широкое применение в грунтовых ГТС и опыт эксплуатации.

Ключевые слова: *ограждающая дамба, геомембрана, фильтрация, устойчивость*

Для цитирования: Соснина С.А., Юрова Н.И. Особенности расчета грунтовых ГТС с применением геомембраны в качестве противofильтрационного элемента // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 89–99.

Original article

FEATURES OF CALCULATION OF HYDRAULIC EARTH STRUCTURES WITH GEOMEMBRANE AS AN IMPERVIOUS ELEMENT

Svetlana A. Sosnina¹, Nadezhda I. Yurova²

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

¹ sosninas@vniig.ru

² yurovani@vniig.ru

Abstract. The results of filtration regime and stability calculations of the structure at different methods of geomembrane damage modeling were compared by the example of the enclosing dam of the tail facility. Calculations of the sludge storage dam were carried out by the finite element method using the PLAXIS 2D software package. On the basis of the obtained results the conclusion about the necessity of development of normative requirements for considering possible damage of geomembranes, taking into account their wide application in hydraulic earth structures and operating experience was made.

Keywords: *enclosing dam, geomembrane, filtration, stability*

For citation: Sosnina S.A., Yurova N.I. Features of calculation of hydraulic earth structures with geomembrane as an impervious element. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:89-99. (In Russ.).

Введение

При проектировании грунтовых гидротехнических сооружений промышленных предприятий (дамб шламохранилищ, золоотвалов) в последние годы в качестве противофильтрационных элементов широко используются полимерные пленки – геомембраны. Использование геомембран предполагает обеспечение полной водонепроницаемости бортов и ложа сооружения. Однако в действительности зачастую этого не происходит вследствие многочисленных нарушений при производстве строительно-монтажных работ по обустройству геомембран. Наиболее распространенными нарушениями являются: неправильная укладка и сварка геомембраны, замена марки и толщины геомембраны, грунтов защитного и подстилающего слоев без согласования с проектировщиком, механические воздействия от строительной техники на незащищенную поверхность геомембраны [1]. При этом если происходящая фильтрация существенно не влияет на режим работы сооружения, его эксплуатация продолжается, а в некоторых случаях производится и дальнейшее наращивание (развитие).

При расчетном обосновании проектов требованиями нормативных документов предусматривается выполнение расчетов с учетом проектного, то есть неповрежденного состояния противофильтрационных геомембран. Указания о необходимости учета возможного повреждения и методики учета отсутствуют. Расчеты устойчивости откосов дамб проводятся в соответствии с СП 39.13330.2012 [2], где в п. 9.12 приведен перечень основных и особых расчетных случаев для низового и верхового откосов. В данном СП отсутствует описание расчетных случаев, связанных с использованием противофильтрационных элементов (геомембран).

Таким образом, рассмотрение расчетных случаев с учетом нарушения целостности геомембраны производится на усмотрение проектировщика. При этом методы моделирования повреждений, вопрос отнесения этого расчетного случая к основному или особому сочетанию нагрузок также являются неопределенными.

Особенности расчетов рассмотрены ниже на примере дамбы шламохранилища хвостового хозяйства калийного комбината.

Сравнение результатов расчетов фильтрационного режима и устойчивости сооружения при разных способах моделирования повреждения геомембраны

Дамба шламохранилища является гидротехническим сооружением II класса, особо опасное и технически сложное сооружение, имеющее повышенный уровень ответственности.

Расчеты проводились для двух сечений дамбы: 1–1 и 2–2. Расположение расчетных сечений показано на плане (рис. 1). В сечении 2–2 под дамбой шламохранилища предусмотрены площадки под вертикальные дренажи, представляющие собой слои высокопроницаемого грунта и выполняющие роль горизонтального дренажа.

Тело ограждающей дамбы представлено песками мелкими и средней крупности. В геологическом строении основания дамбы принимают участие пески мелкие и суглинки от текучепластичных до полутвердых,

подстилаемые алевролитами и песчаниками низкой прочности. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов, использованные при расчете устойчивости, принимались по результатам инженерно-геологических изысканий и представлены в табл. 1.

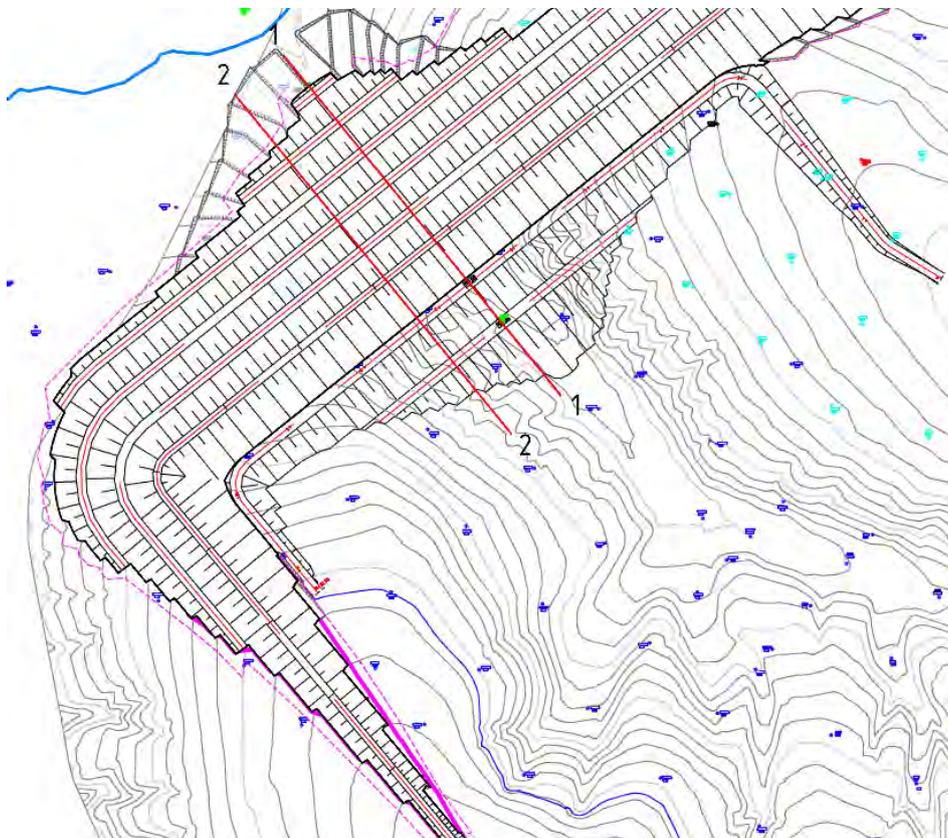


Рис. 1. План размещения расчетных створов

Разработка расчетных моделей

Для расчета устойчивости дамбы шламоохранилища использовался программный комплекс PLAXIS 2D [3], реализующий метод конечных элементов (КЭ). В основном расчетном случае (период нормальной эксплуатации с учетом неповрежденной геомембраны) геомембрана моделировалась с помощью интерфейсных элементов, исключая фильтрацию и выполняющих роль противофильтрационного экрана. Разработанные расчетные модели для сечений 1–1 и 2–2 с указанием инженерно-геологических элементов (ИГЭ) приведены на рис. 2–3. На нижних границах моделей принимались условия жесткой заделки, на боковых границах – условия отсутствия горизонтальных перемещений.

Учитывая опыт эксплуатации сооружений с геомембранами, при выполнении расчетного обоснования проектов ГТС, наряду с основным расчетным случаем, существует необходимость рассматривать случай прорыва геомембраны. При этом характер повреждения геомембраны и вопрос отнесения этого расчетного случая к основному или особому сочетанию

Расчетные характеристики грунтов тела и основания ограждающей дамбы шламохранилища

Характеристики грунтов, ед. изм.	Наименование грунтов										
	Песок мелкий, карьер 1	Песок средней крупности, карьер 2	ИГЭ-1а Песок мелкий	ИГЭ-2 Суглинок тугоплас- тичный	ИГЭ-3 Суглинок мягкоплас- тичный	ИГЭ-3а Суглинок текучеплас- тичный	ИГЭ-3б Суглинок полу- твердый	ИГЭ-6а Алевролит низкой прочности	ИГЭ-7а Песчаник низкой прочности	ИГЭ-8 Песок мелкий	ИГЭ-13 Суглинок дресвяный полутвердый
Плотность грунта, кН/м ³	18,2	19,3	19,1	19,5	19,4	18,8	19,8	22,1	22,6	18,8	19,4
Плотность насыщен- ного грунта, кН/м ³	20,3	20,5	20,6	19,9	19,7	19,1	20,3	22,5	23,0	19,9	20,0
Модуль деформации, МН/м ²	38,1	16,4	38,6	12,1	6,2	3,6	21,6	200	200	26,6	13,4
Коэффициент филь- трации, м/сут	1,8	18,8	2,5	0,002	0,01	0,02	0,0001	1,3	1,3	0,2	0,03
Удельное сцепление, кН/м ²	4	8	0	21	16	14	30	150	150	0	47
Угол внутреннего трения, град.	36	32	36	21	18	16	23	37	37	32	27

нагрузок являются неопределенными. Так как в соответствии с СП 58.13330.2019 [4] основное сочетание в период нормальной эксплуатации включает нагрузки годовой вероятностью более 0,01, случай прорыва геомембраны возможно отнести и к основному, и к особому сочетанию на усмотрение проектировщика.

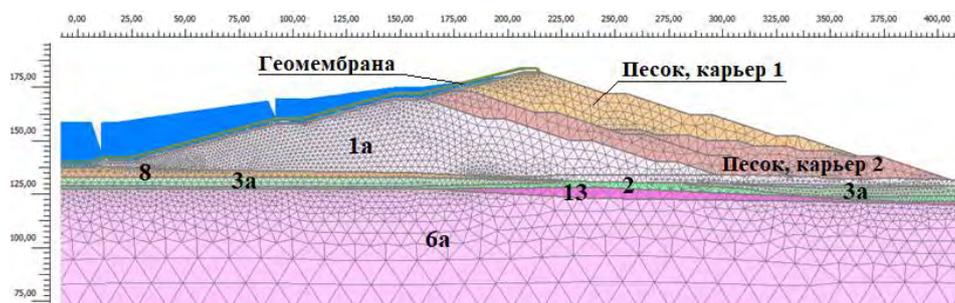


Рис. 2. Расчетная КЭ-модель дамбы шламохранилища в сечении 1–1

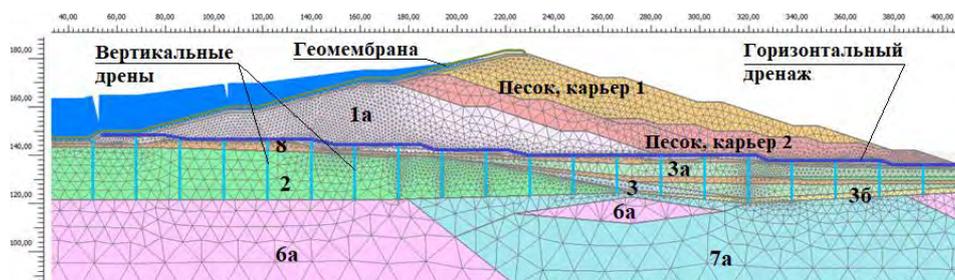


Рис. 3. Расчетная КЭ-модель дамбы шламохранилища в сечении 2–2

В данной работе использовались следующие способы учета (моделирования) повреждения геомембран:

- прорыв геомембраны длиной 2–3 м в верхней части откоса дамбы;
- прорыв геомембраны длиной 2–3 м в нижней части откоса дамбы;
- полная непригодность геомембраны;
- геомембрана с большим количеством мелких повреждений, моделируемая слоем КЭ с коэффициентом фильтрации, подобранным на основании данных натуральных наблюдений за положением кривой депрессии в теле сооружения.

Методика расчетов

Расчеты устойчивости откосов дамбы выполнялись методом моделирования разрушения. Рассматривались задачи о плоской деформации поперечных сечений сооружений и их оснований. Для учета деформационных свойств грунтов основания и дамбы использовалась модель упругопластической грунтовой среды – модель Мора – Кулона, для каждого ИГЭ принималась постоянная средняя жесткость.

Для поиска наиболее опасной поверхности сдвига и определения коэффициентов устойчивости применялся реализованный в программе

PLAXIS метод снижения прочности грунта. Принцип метода снижения прочности при анализе устойчивости на основе метода конечных элементов состоит в том, чтобы понижать c и φ , применяя определенный коэффициент ρ , до момента разрушения. Прогноз разрушения выполняется с одновременным понижением обоих показателей сдвиговой прочности:

$$c_k = c/\rho, \quad \text{tg}\varphi_k = \text{tg}\varphi/\rho, \quad (1)$$

где ρ – коэффициент снижения прочности на сдвиг.

В качестве коэффициента устойчивости k_s принимается величина ρ в момент разрушения.

Нормативные коэффициенты устойчивости

Расчеты устойчивости выполнялись в соответствии с СП 58.13330.2019 [4] и СП 23.13330.2018 [5].

Согласно [4] при расчетах гидротехнических сооружений надлежит соблюдать следующее условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний первой группы:

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{R}{\gamma_n}. \quad (2)$$

Для определения расчетного коэффициента устойчивости k_s это условие записывается в следующем виде:

$$k_s = \frac{R}{F} \geq k_{s,n} = \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c}, \quad (3)$$

где F – расчетное значение обобщенного силового воздействия; R – расчетное значение обобщенной несущей способности, устанавливаемое нормами проектирования отдельных видов гидротехнических сооружений; γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения: для ГТС II класса равен 1,20; γ_{lc} – коэффициент сочетаний нагрузок: для основного сочетания нагрузок и воздействий в период эксплуатации $\gamma_{lc} = 1,0$, для особого сочетания нагрузок годовой вероятностью 0,001 и менее $\gamma_{lc} = 0,90$; γ_c – коэффициент условий работы; $k_{s,n}$ – нормативный коэффициент устойчивости.

Для сооружения II класса значение коэффициента устойчивости k_s не должно быть меньше $k_{s,n} = 1,20$ при основном сочетании нагрузок и $k_{s,n} = 1,08$ для особого сочетания нагрузок.

Результаты расчетов

Результаты расчетов устойчивости для сечений 1–1 и 2–2 представлены в табл. 2 и на рис. 4–13.

Результаты расчетов показали, что расчетный коэффициент устойчивости сооружения и выводы о его эксплуатационной надежности существенно зависят от способа моделирования повреждения геомембраны.

Например, для сечения 1–1 наиболее схожим с фактическим состоянием сооружения расчетным случаем является способ моделирования повреждения геомембраны слоем конечных элементов с учетом подобранно-

го коэффициента фильтрации на основе натуральных данных. Если относить случай прорыва геомембраны к основному сочетанию нагрузок, то расчетный коэффициент устойчивости не удовлетворяет нормативным требованиям. При полной непригодности геомембраны для сечения 1–1 происходит обводнение низового откоса, устойчивости также ниже нормативной.

В сечении 2–2 устойчивость для всех способов моделирования повреждения геомембраны обеспечивается ввиду наличия системы горизонтального дренажа.

На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости разработки единых нормативных требований по учету возможного повреждения геомембран, учитывая их широкое применение в грунтовых ГТС и опыт эксплуатации.

Таблица 2

Результаты расчетов устойчивости

№ сечения	Расчетный случай		Коэффициент запаса устойчивости	
			расчетный k_s	нормативный $k_{s,n}$
1–1	Основной		1,75	1,20
	Прорыв геомембраны	Вверху откоса	1,16	1,20/1,08
		Внизу откоса	1,43	
		Полная непригодность (деактивация) геомембраны	1,05	
		Геомембрана, моделируемая слоем КЭ с учетом подобранного коэффициента фильтрации	1,12	
2–2	Основной		1,67	1,20
	Прорыв геомембраны	Вверху откоса	1,62	1,20/1,08
		Внизу откоса	1,63	
		Полная непригодность (деактивация) геомембраны	1,45	
		Геомембрана, моделируемая слоем КЭ с учетом подобранного коэффициента фильтрации	1,63	

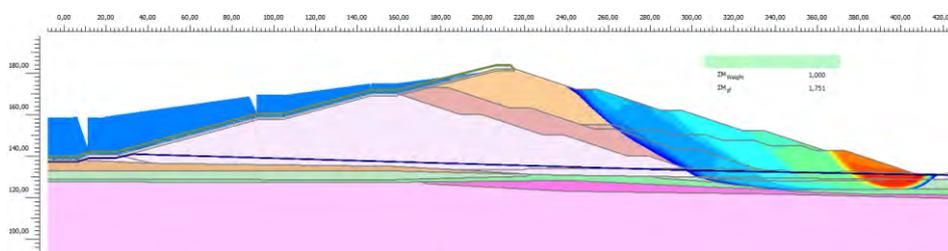


Рис. 4. Сечение 1–1. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,75$ (основной случай)

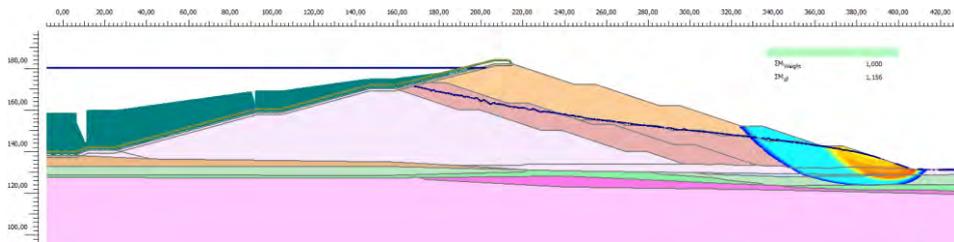


Рис. 5. Сечение 1–1. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,16$ (прорыв геомембраны вверх откоса)

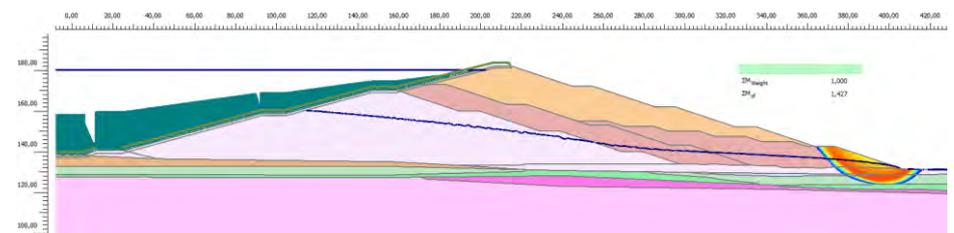


Рис. 6. Сечение 1–1. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,43$ (прорыв геомембраны вниз откоса)

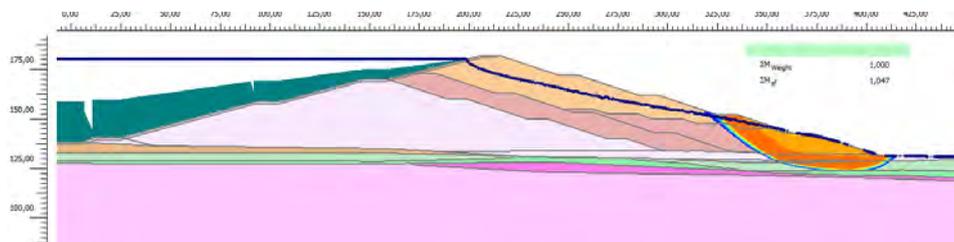


Рис. 7. Сечение 1–1. Полная непригодность геомембраны. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,05$

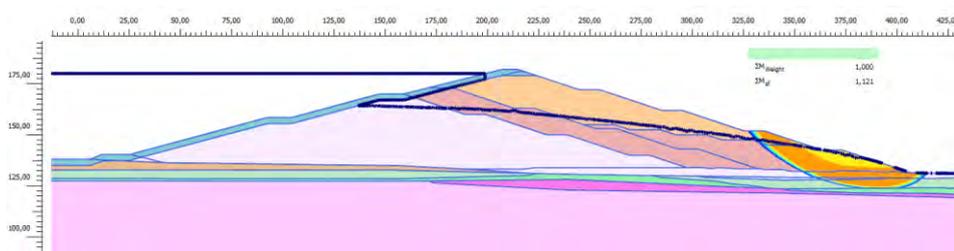


Рис. 8. Сечение 1–1. Геомембрана, моделируемая слоем КЭ с учетом подобранного коэффициента фильтрации, равного $K_{\phi} = 0,001$ м/сут. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,12$

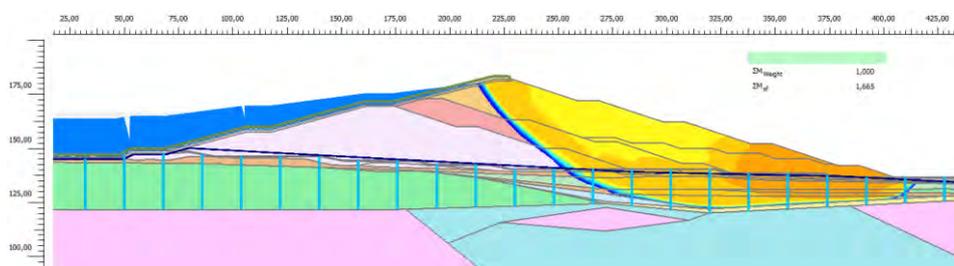


Рис. 9. Сечение 2–2. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,67$ (основной случай)

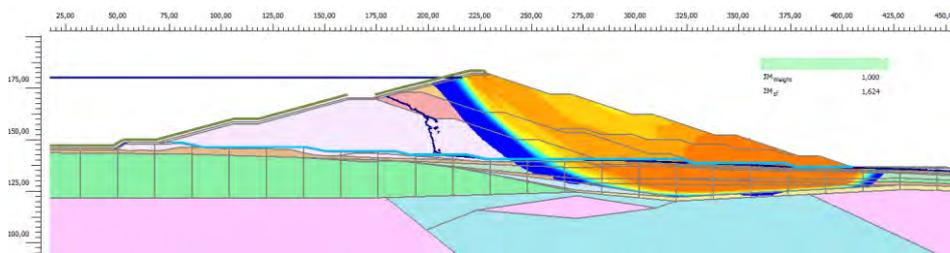


Рис. 10. Сечение 2–2. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,62$ (прорыв геомембраны вверх откоса)

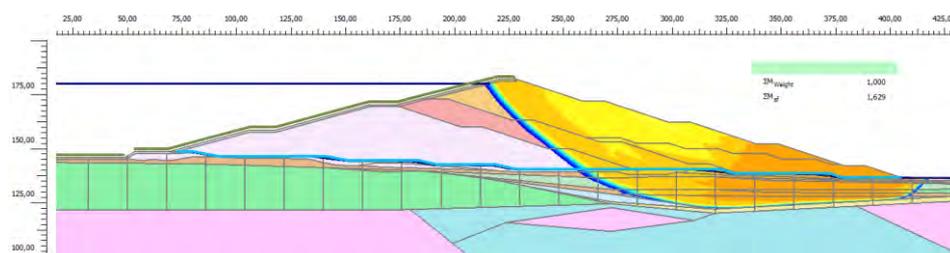


Рис. 11. Сечение 2–2. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,63$ (прорыв геомембраны вниз откоса)

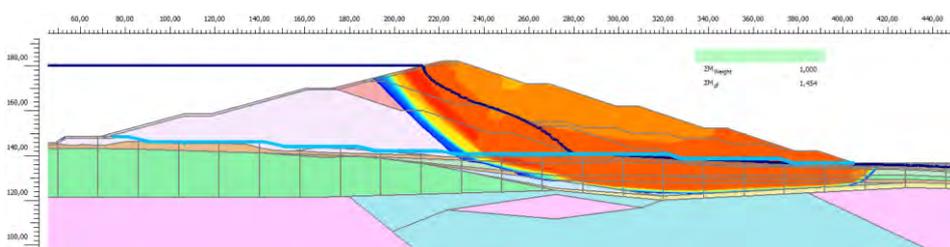


Рис. 12. Сечение 2–2. Полная деактивация геомембраны. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,45$

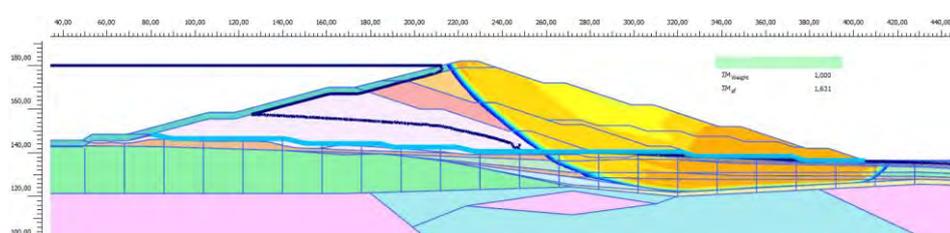


Рис. 13. Сечение 2–2. Геомембрана, моделируемая слоем КЭ с учетом подобранного коэффициента фильтрации, равного $K_{\phi} = 0,001$ м/сут. Потенциальная поверхность обрушения откоса дамбы с коэффициентом устойчивости $k_s = 1,63$

Заключение

1. Результаты расчетов показали, что расчетный коэффициент устойчивости сооружения существенно зависит от способа моделирования повреждения геомембраны. Наименьшими коэффициентами устойчивости характеризуются расчетные случаи с повреждением геомембраны в верхней части и полной деградации геомембраны. При полной непригодности геомембраны для сечения 1–1 происходит обводнение низового откоса.

2. Интерпретация результатов и выводы об эксплуатационной надежности сооружения в ряде случаев (например, для сечения 1–1) зависят от того, относить ли расчет с поврежденной геомембраной к основному или особому сочетанию нагрузок.

3. Как видно из результатов по сечению 2–2, создание резервной дренажной системы существенно повышает эксплуатационную надежность сооружения с противофильтрационным элементом в виде геомембраны. Учитывая опыт эксплуатации сооружений с геомембранами, а также фактическую невозможность ремонта геомембраны в теле дамбы заполненного хвостохранилища, рекомендуется предусматривать устройство резервной (аварийной) дренажной системы на стадии проектирования сооружения для контроля состояния и повышения надежности сооружения.

4. На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости разработки единых нормативных требований и методики по учету возможного повреждения геомембран, принимая во внимание их широкое применение в грунтовых ГТС и опыт эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Сольский С.В., Лопатина М.Г., Быковская С.А., Клушентцев В.А.** Проблемы применения геосинтетических материалов (геомембран) в конструкции противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 296. С. 22–43.
2. **СП 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>.
3. **PLAXIS 2D.** Tutorial Manual. CONNECT Edition V20.04. Bentley. 2020. 239 p.
4. **СП 58.13330.2019.** Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542210>.
5. **СП 23.13330.2018.** Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553863425>.

REFERENCES

1. Solskiy S.V., Lopatina M.G., Bykovskaya S.A., Klushentsev V.A. Issues of geosynthetic materials (geomembranes) application in structure of hydraulic structures watertight elements. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2020;296:22-43. (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. PLAXIS 2D. Tutorial Manual. CONNECT Edition 20.04. Bentley. 2020. 239 p.
4. SP 58.13330.2019. Hydraulic structures. Basic statements. Updated version of the SNiP 33-01-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542210>. (In Russ.).
5. SP 23.13330.2018. Foundation of hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.02.02-85*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553863425>. (In Russ.).

Информация об авторах

С.А. Соснина – канд. техн. наук, начальник отдела «Статика и динамика сооружений и оснований»;

Н.И. Юрова – ведущий инженер отдела «Статика и динамика сооружений и оснований».

Information about the authors

S.A. Sosnina – Cand. Sci. (Techn.), Head of Department «Statics and dynamics of structures and foundations»;

N.I. Yurova – Lead Engineer of Department «Statics and dynamics of structures and foundations».

Статья поступила в редакцию 25.12.2022; одобрена после рецензирования 28.01.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 25.12.2022; approved after reviewing 28.01.2023; accepted for publication 20.03.2023.

Научная статья
УДК 550/834

ВОЛНЫ РЕЛЕЯ – ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

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 данных изысканий методом инженерной сейсмозведки о скоростях распространения поперечных V_s и релеевских V_R волн в техногенных и природных дисперсных грунтах верхней части геологических разрезов (до 20 м). Рекомендованы средние (нормативные) значения отношения V_s/V_R , которые могут быть востребованы при сейсмомикрорайонировании, а также на сложных техногенными грунтами гидротехнических (плотины, дамбы) и дорожных (насыпи) сооружениях. Значения V_R и V_s , практически не зависящие от влажности грунта, качественно характеризуют плотность тела грунтовых сооружений.

Ключевые слова: инженерная сейсмозведка, скорости распространения релеевских и поперечных волн, эмпирические соотношения скоростей релеевских и поперечных волн, техногенные и природные грунты, грунтовые плотины, дамбы, насыпи

Для цитирования: Воронков О.К., Кондратенко П.В., Ушакова Л.Ф. Волны Релея – дополнительный источник информации при инженерной сейсмозведке // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 307. С. 100–111.

Original article

RAYLEIGH WAVES AS AN ADDITIONAL SOURCE OF INFORMATION FOR ENGINEERING SEISMIC EXPLORATION

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. A generalization of survey data by the method of engineering seismic exploration on the propagation speeds of transverse V_s and Rayleigh V_R waves in technogenic and natural dispersed soils of the upper part of geological sections (up to 20 m) has been performed. The average (normative) values of the V_s/V_R ratio, which may be in demand during seismic micro-zoning and also on hydrotechnical (dams, dams) and road (embankments) structures built with technogenic soils, are recommended. The values of V_R and V_s , which are practically independent of soil moisture, qualitatively characterize the density of the body of ground structures.

Keywords: engineering seismic exploration, propagation speeds of Rayleigh and transverse waves, empirical relations of speeds of Rayleigh and transverse waves, technogenic and natural soils, ground dams, dikes, embankments

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

For citation: Voronkov O.K., Kondratenko P.V., Ushakova L.F. Rayleigh waves as an additional source of information for engineering seismic exploration. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:100-111. (In Russ.).

Для решения большинства инженерно-геологических задач изысканий сейморазведкой корреляционным методом преломленных волн (КМПВ) необходимо и достаточно охарактеризовать геологический разрез значениями скорости распространения продольной V_p и поперечной V_s упругих волн. Для определения значений V_p выполняют наблюдения по схеме ZZ (вертикальные сейсмоприемники и вертикальное возбуждение колебаний ударом кувалды по стальной подложке, лежащей на грунте). Затем для определения значений V_s волны SH, используя схему YY, вертикальные приборы заменяют горизонтальными, а удар наносится горизонтально, перпендикулярно линии расстановки сейсмоприемников. Качество записи волн SH зависит от опыта оператора. При значительных усилениях регистрирующей аппаратуры (или при большом количестве накоплений), помимо волн SH, записываются и другие волны (прямая, преломленная, звуковая), что осложняет обработку сейсмограмм и определение фазовой скорости V_s .

При наблюдениях по схеме ZZ такого осложнения не возникает, и чем больше усиление полезного сигнала на фоне шумов и больше число накоплений (в пределах 30), тем материал для интерпретации будет более качественным. Регистрируются в первых вступлениях продольные (прямая и преломленные) волны, а в последующей части записи – поверхностные волны Релея (R). Они наиболее интенсивные по сравнению с продольными волнами (в 3–10 раз), характеризуются более низкими видимыми частотами (рис. 1).

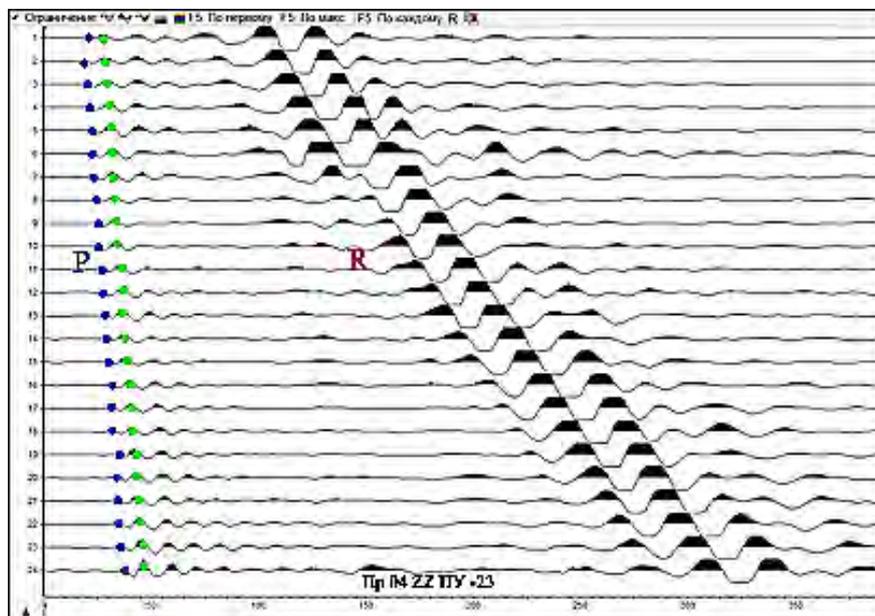


Рис. 1. Основание Гунибской ГЭС. Запись продольной P и релейской R волн при наблюдениях по схеме ZZ; профиль 04; шаг сейсмоприемников 2,5 м

В разведочной геофизике поверхностные волны, в частности волны Релея, обычно рассматриваются как волны-помехи при интерпретации материалов сейсморазведки корреляционным методом преломленных волн и методом отраженных волн (МОВ). Будучи наиболее интенсивными и занимая значительную часть сейсмограммы, поверхностные волны «забивают» вступления и фазы полезных продольных, преломленных и отраженных волн. Что же касается инженерной сейсморазведки, то геофизики давно оценили практическую пользу волн Релея, например, при наблюдениях на обнажениях скальных пород, в штольнях и туннелях [1], при оконтуривании в криолитозоне поверхностных таликов [2, 3], при оценке деформационных и прочностных характеристик дисперсных грунтов [4, 5]. Интересные возможности также связаны с применением нового метода многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) [6, 7] для определения скоростного разреза по V_R релеевских волн.

О «глубине захвата» H_3 релеевских волн. В.И. Бондарев и В.Н. Агеев [4, 5] рекомендуют для однородного полупространства значение $H_3 \approx \lambda$, (где λ – длина волны Релея), а при слоистом или слоисто-градиентном разрезе значение V_R относить к середине слоя, вовлеченного в колебательный процесс, т. е. для водонасыщенных разрезов – к глубине $0,45\lambda$, а для сухих – к $0,35\lambda$.

При наличии низкоскоростного слоя (рыхлые отложения на высокоскоростном полупространстве – скальных породах) рекомендации следующие [3]:

1) если V_{s2} (в полупространстве) больше, чем V_{s1} (в слое) на порядок и более, то $H_3 \approx (0,2-0,3)\lambda$;

2) если $V_{s2} / V_{s1} = 5-10$, то $H_3 \approx (0,3 - 0,5)\lambda$;

3) если $V_{s2} / V_{s1} = 3-5$, то $H_3 \approx (0,3 - 0,8)\lambda$;

4) если $V_{s2} / V_{s1} = 1,1-2,0$, то $H_3 \approx \lambda$, что совпадает с указанным выше значением H_3 для однородного полупространства.

Согласно теории упругости для полупространства $V_s / V_R = 1,04-1,14$, что позволяет по значению V_R контролировать порядок величин V_s , получаемых при работах по схеме YY. Более того, в случае отсутствия наблюдений по схеме YY, значения V_R можно использовать для приближенной оценки V_s . Однако применительно к техногенным и природным грунтам верхней части разреза (ВЧР) до настоящего времени отсутствовало экспериментальное обоснование рекомендаций по такой оценке.

Во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева при участии авторов были выполнены полевые сейсморазведочные исследования с использованием схем наблюдений ZZ и YY на ряде инженерных объектов: Братская ГЭС на р. Ангаре, Эзминская, Гизельдонская, Дзауджикауская ГЭС в бассейне р. Терек, дамба Отказненского водохранилища в Ставропольском крае, дамба золошлаконакопителя (ЗШН) в г. Темиртау, Жайремский ГОК в Казахстане, автодорога в г. Бологое, Гунибская ГЭС в Дагестане. Ниже приведены краткое описание объектов, методика и результаты этих работ с акцентом на полученные характеристики V_s и V_R техногенных и природных грунтов ВЧР разного состава и состояния.

Объекты и методика исследования

Братская ГЭС. Правобережная плотина возрастом более 50 лет возведена преимущественно из песка намывным способом и отсыпкой. Грунт уплотнялся нагруженными самосвалами при 4–5 проходках по единому следу. Верхняя часть геологического разреза представлена: 1) приповерхностными (≈ 6 м) техногенными аэрированными песками плотностью $\rho_{\text{ест}} \approx 1,6$ г/см³; 2) уплотненными (глубже 6 м) техногенными аэрированными песками с плотностью $\rho_{\text{ест}} \approx 1,7$ г/см³.

Эзминская ГЭС. Изучены природные крупнообломочные отложения Эзминской террасы, представленные валунно-глыбовым и валунно-галечниковым материалом различной степени цементации. В пойме р. Терек работы выполнялись на природном гравийно-галечниковом аллювии, аэрированном и водонасыщенном.

Гизельдонская ГЭС. Работы выполнялись: а) на древнем (7 тыс. лет) известняковом глыбовом завале Кахты-Сар; б) на щебенисто-дресвяных техногенных грунтах; в) на природных глинах в берегах Гизельдонского водохранилища.

Дзауджикауская ГЭС. Исследовалась трасса деривационного канала: а) гравий, галька с суглинком аллювия р. Терек, аэрированная и водонасыщенная; б) суглинок техногенный и природный, аэрированный и водонасыщенный.

Дамба Отказненского водохранилища сложена техногенным слабоуплотненным суглинком, аэрированным. Основание – природный песок, плотный, водонасыщенный.

Жайремский ГОК. Работы выполнены: а) на природной водонасыщенной твердой супеси с гравием и галькой; б) на техногенном щебне с песком, аэрированном.

Дамба золошлаконакопителя в г. Темиртау имеет высоту до 20 м. Сложена техногенными глинистыми грунтами (глина, суглинок) и золошлаковыми отходами. Основание – природные глины неогена.

Автомобильная насыпь (г. Бологое) отсыпана среднезернистым песком, приповерхностная часть неуплотненная, аэрированная ($\rho_{\text{ест}} \approx 1,55$ – $1,58$ г/см³), ниже – среднеуплотненная, также аэрированная (средние значения $\rho_{\text{ест}} \approx 1,66$ г/см³).

Гунибская ГЭС. Четвертичные отложения представлены природными аллювиальными и делювиально-коллювиальными крупнообломочными грунтами: валунами, галькой, гравием с песчаным заполнителем ($\rho_{\text{ест}} \approx 2,0$ г/см³).

При сейсморазведочных работах использовалась 24-канальная сейсмостанция с накоплением «Лакколит Х-МЗ» и сейсмоприемники (СП) «ОУО-GEO IMPULSE». Их шаг по профилю равнялся 5 м. Применялись схемы ZZ и YY, о которых сказано выше. При работах по схеме ZZ было 5 пунктов удара (ПУ): 3 в пределах расстановки СП и 2 выносных в 20 м от крайних СП для получения нагоняющих годографов. Число накоплений на каждом ПУ составляло 10–20. Наблюдения по схеме YY выполнялось без выносных ПУ. По полученным сейсмограммам с использованием программы обработки «Лакколит» строились годографы вступлений и фаз волн; известным способом t_0 определялись границы сейсмогеологического

разреза [6]. Погрешность определения значений V_p не превышала 5–7 %, а разброс значений кажущейся скорости V_s и V_R по одиночным годографам фаз, как правило, был не менее 10 %, что обусловило погрешность отношения V_s/V_R не менее 20 %. С целью снизить эти ошибки применялось осреднение частных значений кажущихся скоростей V_s и V_R в пределах всей расстановки сейсмоприемников, поскольку погрешность среднего снижается пропорционально \sqrt{n} , где n – число частных значений. В наших работах как для значений V_s , так и V_R число n варьировалось от 4 до 10.

Результаты исследований

1. Данные полевых, определенных сейсморазведкой значений V_p , V_s , V_R были сгруппированы по подвидам и разновидностям техногенных и природных дисперсных грунтов: крупнообломочных (табл. 1), песков (табл. 2) и глинистых – супесей, суглинков и глин (табл. 3). Указанные в этих таблицах экспериментальные значения V_s/V_R в ряде случаев отличаются от «разрешенного» теорией упругости диапазона, равного 1,04–1,14. Пока трудно судить о причинах этого отличия, поскольку оно в большинстве случаев не превышало 10–16 % (лишь в одном случае было 22 %), то есть могло быть связано с погрешностью определения значений V_s и V_R по одиночным годографам фаз.

2. На основе табл. 1–3 были получены и рекомендованы нормативные значения динамических деформационных характеристик техногенных и природных дисперсных грунтов (табл. 4).

3. Парная корреляция всех полученных натуральных значений V_s и V_R (табл. 1–3) дисперсных грунтов (рис. 2) свидетельствует о тесной связи этих величин для всех грунтов, независимо от их состава и состояния:

$$V_s = 1,07 V_R, \quad (1)$$

причем значение достоверности аппроксимации $R^2 = 0,96$, т.е. близко к 1,0.

Если же имеется дополнительная информация о классе, составе и состоянии грунтов, то используя данные табл. 4, можно рекомендовать уточненные связи V_s и V_R :

для техногенных приповерхностных ($h < 5–7$ м) аэрированных грунтов разного состава

$$V_s = 1,052 V_R, \quad (2)$$

для природных аэрированных грунтов разного состава ($h > 7$ м)

$$V_s = 1,083 V_R, \quad (3)$$

для природных водонасыщенных грунтов разного состава ($h > 7$ м)

$$V_s = 1,12 V_R. \quad (4)$$

Отметим, что приведенные выше коэффициенты пропорциональности скоростей не противоречат диапазону V_s/V_R , «разрешенному» теорией упругости.

4. Динамический модуль упругости E_d приповерхностных (до 5–7 м) техногенных аэрированных грунтов растет в следующей последовательности: глина (101 МПа) – песок (134 МПа) – суглинок (252 МПа) – крупнообломочные грунты (405 МПа).

Таблица 1

Скорости упругих волн в крупнообломочных грунтах ВЧР по данным инженерной сейсморазведки

Объект	Грунты	V_p , м/с	V_s , м/с	V_R , м/с	V_s / V_R
Эзминская ГЭС	Валуны с супесью, природные, аэрированные	1075	700	625	1,12
	Валуны, гравий, галька, природные, аэрированные	1100	560	510	1,10
	Гравий, галька, природные, аэрированные	850	560	525	1,07
Гизельдонская ГЭС	Известняковый глыбовый древний завал Кахты-Сар с суглинистым заполнителем, аэрированный	1070	630	600	1,05
	Верхняя часть завала Кахты-Сар (до 5 м), аэрированная	500	308	250	1,23
	Щебень, дресва с суглинком, техногенная, аэрированная	420	207	–	–
Дзауджикауская ГЭС	Гравий, галька с суглинком, природные, верхняя зона (до 5 м), аэрированные	600	250	233	1,07
		640	260	220	1,18
Жайремский ГОК	Щебень с песком и суглинком, техногенные, аэрированные, верхняя зона (до 5 м)	480	295	283	1,04
		480	288	278	1,04
Эзминская ГЭС	Гравий, галька с суглинком, природные, плотные, водонасыщенные	1550	650	–	–
Дзауджикауская ГЭС		1600	640	550	1,16
		1450	690	560	1,23
		1600	580	550	1,06
Гунибская ГЭС	Валуны, гравий, галька с песчаным заполнителем, природные, аэрированные	1070	450	410	1,10
		960	525	475	1,10
		980	425	450	0,94

Таблица 2

Скорости упругих волн в техногенных и природных песках ВЧР по данным инженерной сейсморазведки

Объект	№ профиля	Грунты	V_p , м/с	V_{ss} , м/с	V_R , м/с	V_s / V_R
г. Бологое, автодорожная насыпь	1	Приповерхностный (до 5 м) техногенный песок, аэрированный	230	138	132	1,05
	2	То же, слабоуплотненный, аэрированный	317	174	175	0,99
Братская ГЭС	15	Приповерхностный (до 5 м) слабоуплотненный техногенный песок, аэрированный	360	205	181	1,13
	14		330	188	173	1,09
	1		310	166	158	1,05
	2		320	185	154	1,20
	3		340	165	–	–
	4		340	190	–	–
	5		315	185	184	1,01
	6		334	176	173	1,02
	7		350	180	181	0,99
	9		350	203	196	1,04
	10		356	206	194	1,06
	11		295	169	152	1,11
	12		330	203	190	1,07
13	302	–	177	–		
Братская ГЭС	15	Песок техногенный, аэрированный, уплотненный при $h > 5$ м	450	244	236	1,03
	14		410	261	218	1,20
	1		410	243	241	1,01
	2		414	246	235	1,05
	3		340	190	–	–
	4		410	230	230	1,00
	5		430	242	238	1,02
	6		416	232	236	0,98
	7		435	243	242	1,00
	8		411	223	216	1,03
	9		450	258	219	1,18
	10		450	272	254	1,07
Дамба Отказненского водохранилища	1а	Песок природный, плотный, водонасыщенный	1490	333	324	1,03
	1в		1500	354	375	0,94
	2а		1500	330	300	1,10
	2в		1900	380	336	1,13
	2с		1500	–	317	–
	3в		1700	347	310	1,12

Таблица 3

**Скорости упругих волн в техногенных и природных глинистых грунтах
верхней части разреза (ВЧР) по данным инженерной сейсморазведки**

Объект	№ профиля	Грунты	V_p , м/с	V_s , м/с	V_R , м/с	V_s / V_R
Дзауджикаус- кая ГЭС	9s	Суглинок техноген- ный, слаборазуп- лотненный, аэриро- ванный	510	225	260	0,87
	10s		450	288	260	1,10
Дамба Отказненского водохранили- ща	1a		440	260	214	1,22
	1в		510	–	234	–
	1с		470	–	250	–
	2a		400	248	230	1,08
	2в		440	228	244	0,93
	2с		400	–	220	–
	3a		410	183	188	0,97
	3в	440	255	182	1,40	
Дамба ЗШН, г. Темиртау	4	Глина техногенная, слабоуплотненная, аэрированная	332	140	138	1,01
	5		324	142	127	1,12
	7		409	159	152	1,05
	8		333	125	116	1,08
	10		352	146	134	1,09
	11		333	172	180	0,96
Дамба ЗШН, г. Темиртау	8	Глина оползневая, влажная	700	198	168	1,18
Гизельдонская ГЭС	5		930	175	170	1,03
Жайремский ГОК	1	Супесь твердая, природная с грави- ем, галькой, водона- сыщенная	1435	451	363	1,24
	2		1435	422	390	1,08
Дзауджикаус- кая ГЭС	9s	Суглинок плотный, природный, водона- сыщенный	1200	630	600	1,05
	10s		1600	680	650	1,05
Дамба ЗШН, г. Темиртау	4	Глина природная, водонасыщенная	1800	218	202	1,08
	5		1400	218	181	1,20
	11		1730	227	235	0,97
Гизельдонская ГЭС	5		1480	262	236	1,11

Таблица 4

Нормативные значения динамических упругих характеристик техногенных и природных дисперсных грунтов по данным инженерной сейсморазведки

Грунт, состояние	$\rho_{\text{сст}}, \text{г/см}^3$	$V_p, \text{м/с}$	$V_s, \text{м/с}$	$V_R, \text{м/с}$	V_s / V_R	μ_d	$E_d, \text{МПа}$
Техногенные грунты							
Крупнообломочные приповерхностные (до 5–7 м), аэрированные (выше УГВ)	2,0	520	280	253	1,07	0,29	405
Пески приповерхностные (до 5–7 м), слабоуплотненные, аэрированные	1,6	324	182	173	1,05	0,27	134
Пески уплотненные (на глубине $h > 7$ м), аэрированные	1,75	416	241	231	1,04	0,24	252
Суглинки приповерхностные (до 5–7 м), слабоуплотненные, аэрированные	1,75	447	241	228	1,06	0,29	262
Глины приповерхностные (до 5–7 м), слабоуплотненные, аэрированные	1,70	345	147	141	1,04	0,38	101
Природные грунты							
Валунно-глыбовые с супесчано-суглинистым заполнителем ($h > 7$ м), аэрированные	2,10	1024	612	565	1,08	0,21	1903
Глины природные, влажные (выше УГВ)	1,75	815	186	169	1,10	0,47	178
Крупнообломочные с суглинистым заполнителем, $h > 7$ м, плотные, водонасыщенные	2,15	1550	640	553	1,16	0,39	2448
Пески плотные, $h > 7$ м, аэрированные	1,9	1600	349	327	1,07	0,47	680
Супеси твердые, с галькой и гравием, $h > 7$ м, водонасыщенные	1,8	1435	436	375	1,16	0,45	992
Суглинки плотные, $h > 7$ м, водонасыщенные	1,85	1400	655	625	1,05	0,36	2160
Глины, $h > 7$ м, водонасыщенные	1,9	1602	231	214	1,10	0,47	298

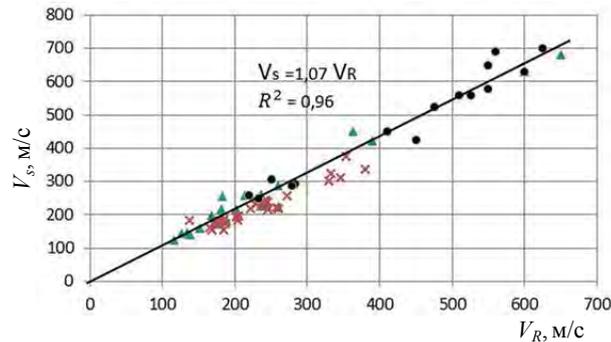


Рис. 2. Связь скорости V_s поперечной (SH) волны со скоростью V_R поверхностной волны Релея (R) в техногенных и природных дисперсных грунтах:
 ● – крупнообломочные грунты, ✕ – пески, ▲ – глинистые грунты (супеси, суглинки, глины)

Значения E_d природных уплотненных аэрированных грунтов ($h > 7$ м) растут в сходной последовательности: глина (178 МПа) – песок (680 МПа) – валунно-глыбовые отложения с суглинистым заполнителем (1903 МПа).

Значения E_d природных уплотненных водонасыщенных грунтов ($h > 7$ м) растут в последовательности: глина (298 МПа) – супесь (992 МПа) – суглинок (2160 МПа) – крупнообломочные грунты с суглинистым заполнителем (2448 МПа).

5. Динамический коэффициент Пуассона μ_d как функция отношения V_s / V_p определен по номограмме Кнопва – Коптева [1]. Для техногенных аэрированных грунтов он в большинстве случаев находится в узких пределах 0,24–0,29 и лишь для глин выше уровня грунтовых вод (УГВ) он равен 0,38.

Значение μ_d природных грунтов выше УГВ может варьироваться в значительных пределах: от 0,21 (валунно-глыбовые отложения) до 0,47 (глины).

Значение μ_d природных водонасыщенных грунтов ($h > 7$ м) изменяется от 0,36 (плотные суглинки) до 0,47 (глины).

6. Учитывая очень тесную корреляционную связь (1) значений V_s и V_R дисперсных грунтов, допустимо, на наш взгляд, при сейсмомикрорайонировании (СМР), а также на грунтовых плотинах и дамбах часть сейсморазведочных работ по схеме УУ не проводить, если при схеме ZZ получены достаточно хорошие записи R -волн, позволяющие определить V_R .

Заключение

Выполнено обобщение данных изысканий методом инженерной сейсморазведки о скоростях распространения поперечных V_s и релеевских V_R волн в техногенных и природных дисперсных грунтах верхней части геологических разрезов (до 20 м). Рекомендованы средние (нормативные) значения отношения V_s / V_R :

1,07 – для всех дисперсных грунтов независимо от состава, состояния (аэрированного, водонасыщенного) и глубины залегания;

1,052 – для техногенных приповерхностных (до 7 м) аэрированных дисперсных грунтов разного состава;

1,083 – для природных (глубже 7 м) аэрированных дисперсных грунтов разного состава;

1,12 – для природных (глубже 7 м) водонасыщенных дисперсных грунтов разного состава.

Эти рекомендации позволят более обоснованно оценивать значения скоростей поперечных волн по скоростям волн Релея, что может быть востребовано, например, при сейсмомикрорайонировании, а также на сложенных техногенными грунтами гидротехнических (плотины, дамбы) и дорожных (насыпи) сооружениях. Значения V_R (или V_s), практически не зависящие от влажности грунта, качественно характеризуют плотность тела грунтовых сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г.** Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969. 239 с.
2. **Воронков О.К.** Методика и результаты изучения малых глубин методом КМПВ в условиях многолетней мерзлоты // Геология и геофизика. 1965. № 4. С. 114–124.
3. **Воронков О.К.** Инженерная сейсмика в криолитозоне. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.
4. **Бондарев В.И., Агеев В.Н.** Об эффективной толщине слоя, вовлеченного в движение поверхностной волной Релея // Вопросы разведочной геофизики. Труды Свердловского горного института. 1972. Вып. 83. С. 97–99.
5. **Бондарев В.И.** Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М.: Госстрой РСФСР, 1974. 142 с.
6. **Никитин В.Н.** Основы инженерной сейсмики. М.: Изд-во МГУ, 1981. 176 с.
7. **Park C.B., Miller R.D., Xia J.** Multichannel Analysis of Surface Waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. № 3. P. 800–808.
8. **Park C.B., Carnevale M.** Optimum MASW Survey – Revisit after a Decade of Use // Proceedings of GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. West Palm Beach: American Society of Civil Engineering, 2010. P. 1303–1312. [https://doi.org/10.1061/41095\(365\)130](https://doi.org/10.1061/41095(365)130).

REFERENCES

1. Savich A.I., Koptev V.I., Nikitin V.N., Yaschenko Z.G. Seismoacoustic methods for studying rock massifs. Moscow: Nedra; 1969. 239 p. (In Russ.).
2. Voronkov O.K. Methodology and results of the study of shallow depths by the KMPV method in permafrost conditions. *Geologiya i geofizika*. 1965; 4:114-124. (In Russ.).
3. Voronkov O.K. Engineering seismic in cryolithic zone. Saint Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva Publ.; 2009. 401 p. (In Russ.).
4. Bondarev V.I., Ageev V.N. On the effective thickness of a layer involved in motion by a Rayleigh surface-wave. *Voprosy razvedochnoj geofiziki. Trudy Sverdlovskogo gornogo instituta*. 1972;83:97-99. (In Russ.).
5. Bondarev V.I. Recommendations on the use of seismic exploration to study the physical and mechanical properties of loose soils in natural occurrence for construction purposes. Moscow: Gosstroy RSFSR, 1974. 142 p. (In Russ.).

6. Nikitin V.N. Basics of engineering seismic survey. Moscow: MSU Press; 1981. 176 p. (In Russ.).
7. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geophysics*. 1999;64(3):800-808.
8. Park C.B., Carnevale M. Optimum MASW Survey – Revisit after a Decade of Use. *Proceedings of GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. West Palm Beach: American Society of Civil Engineering; 2010. P. 1303-1312. [https://doi.org/10.1061/41095\(365\)130](https://doi.org/10.1061/41095(365)130).

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 24.01.2023; одобрена после рецензирования 08.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Сольский С.В., Котлов О.Н., Зеленский И.Г., Биканасова К.Р.</i> Конструктивные решения по консолидации намывных накопителей грунтовых материалов	3
<i>Тахерифард А., Елистратов В.В.</i> Численное моделирование эрозии в трубе при многофазном потоке нефти и газа	16
<i>Толстиков В.В., Юссеф Я.В.</i> Оценка достоверности математического моделирования бетонной плотины Бурейской ГЭС с учетом строительных швов	29
<i>Охапкин Г.В.</i> Совершенствование методов выбора технических решений по восстановлению объемной структуры бетона конструкций ГТС	39
<i>Султанов М.М., Байдакова Н.В., Милитонян Ш.М., Меньшиков П.Д.</i> Оценка надежности энергетического оборудования ГЭС на базе методов машинного обучения	51
<i>Финагенов О.М.</i> Выбор концепции стационарной платформы с железобетонным опорным основанием для разработки месторождений арктического шельфа юго-западной части Карского моря	61
<i>Назаров В.С., Глаговский В.Б.</i> Об оценке эффективности свайных набережных комбинированной конструкции	71
<i>Сольский С.В., Клушенцев В.А., Герасимова Е.В.</i> Метод укрепления однородных плотин из моренного грунта	78
<i>Соснина С.А., Юрова Н.И.</i> Особенности расчета грунтовых ГТС с применением геомембраны в качестве противодиффузионного элемента	89
<i>Воронков О.К., Кондратенко П.В., Ушаков Л.Ф.</i> Волны Релея – дополнительный источник информации при инженерной сейсморазведке	100

CONTENT

<i>Solsky S.V., Kotlov O.N., Zelensky I.G., Bikanasova K.R.</i> Structural solutions for the consolidation of alluvial reservoirs of soil materials	3
<i>Taherifard A., Elistratov V.V.</i> Numerical simulation of erosion in a pipe under a multi-phase oil and gas flow	16
<i>Tolstikov V.V., Youssef Ya.W.</i> Reliability assessment of mathematical modeling of Bureyskaya HPP's concrete dam with consideration of construction joints	29
<i>Okhapkin G.V.</i> Improvement of selection methods of technical solutions for concrete volumetric structure restoration of hydraulic structures	39
<i>Sultanov M.M., Baydakova N.V., Militonyan Sh.M., Menshikov P.D.</i> Reliability assessment of the energy HPP equipment based on methods machine learning	51
<i>Finagenov O.M.</i> Choice of the concept of a stationary platform with a reinforced concrete base for the development of fields on the arctic shelf in the south-western part of the Kara sea	61
<i>Nazarov V.S., Glagovsky V.B.</i> On evaluation of the efficiency of pile quays of combined structure	71
<i>Solsky S.V., Klushentsev V.A., Gerasimova E.V.</i> Method of strengthening homogeneous dams from moraine ground	78
<i>Sosnina S.A., Yurova N.I.</i> Features of calculation of hydraulic earth structures with geomembrane as an impervious element	89
<i>Voronkov O.K., Kondratenko P.V., Ushakova L.F.</i> Rayleigh waves as an additional source of information for engineering seismic exploration	100

**Перечень организаций, представивших статьи
для опубликования в сборнике научных трудов
«Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», т. 307**

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

«23 Государственный морской проектный институт» – филиал
АО «31 ГПИСС», Санкт-Петербург, Россия;

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия;

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

ООО «АйДи Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия;

ООО «НПК Проектводстрой», Санкт-Петербург, Россия;

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Волжский, 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 24.03.2023.

Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 1. Печать цифровая.
Печ.л. 7,25. Усл.печ.л. 10,15. Уч.-изд.л. 8,75. Тираж 300 (100). Заказ 7.

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