Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 305
Proceedings of the VNIIG. 2022. Vol. 305

Научная статья
УДК 624.131.372/373:626/627

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОСТРУКТУРНОЙ СМОЛЫ ПРИ СОЗДАНИИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ В ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЕ

Михаил Евгеньевич Михайлов[1], Евгений Николаевич Захарьин[2]

[1, 2] ООО «Эм-Си Баухеми», Санкт-Петербург, Россия
[1] Mikhail.Mikhailov@mc-bauchemie.ru
[2] Evgeny.Zakharin@mc-bauchemie.ru

Аннотация. Грунтовая плотина испытывает деформации от массива плотины, напора воды, климатических условий (длительного морозного периода и частых ливневых осадков), режимов сработки водохранилища, сейсмических нагрузок. Эти условия влияют на напряженно-деформированное состояние грунтовой плотины, ее фильтрационную стойкость и суффозионную устойчивость. Противофильтрационные устройства являются одними из основных конструктивных элементов грунтовых плотин. Мировой опыт показывает, что развитие фильтрации и суффозии может происходить по пути экспоненциального роста, вызывая прорывы и разрушения в теле плотины, что может приводить к катастрофическим последствиям. Учитывая различные типы плотин и условия эксплуатации сооружений, возведение противофильтрационной завесы методом «стена в грунте» может быть выполнено различными способами, к которым относятся шпунтовые, траншейные технологии, буросекущие сваи (БСС), струйная цементация и метод пропитки грунта гидроструктурной смолой (гидрогели). Метод пропитки грунта гидроструктурной смолой для противофильтрационной завесы плотины – это новый способ, который может быть применен в период возведения плотины и при ее капитальном ремонте.

Ключевые слова: *противофильтрационные устройства, гидроструктурная смола на акрилатной основе, грунтовые плотины*

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

Original article

APPLICATION OF HYDROSTRUCTURAL RESIN TO CREATE GROUT CUTOFF CURTAIN IN A GROUND DAM

Mikhail E. Mikhailov[1], Evgeny N. Zakharin[2]

[1, 2] MC-Bauchemie, Saint Petersburg, Russia
[1] Mikhail.Mikhailov@mc-bauchemie.ru
[2] Evgeny.Zakharin@mc-bauchemie.ru

Abstract. The ground dam have deformations from the dam mass, water pressure, climatic conditions (duration of the frost period and frequent heavy rainfall), water reservoir operation modes, seismicity. These conditions affect the stress-strain state of the soil dam, its filtration resistance and suffusion stability. Anti-filtration systems are one of the main structural elements of ground dams. World experience shows that the development of filtration and suffusion can occur along the path of exponential growth, causing breakthroughs and destroying the body of the dam, which

© Михайлов М.Е., Захарьин Е.Н., 2022

leads to catastrophic consequences. Taking into account the different types of dams and the operating conditions of the structure, the construction of an anti-filtration curtain by the «diaphragm wall» method can be performed in various ways. The main are: sheet piles, trench, drilling piles, spray cementation and hydrostructural resin injection method. The hydrostructural resin injection method for a grout cutoff curtain is a new method that can be applied during the construction period and major renovation of the dam.

Keywords: *anti-filtration curtain, hydrostructural acrylate-based resin, ground dams*

For citation: Mikhailov M.E., Zakharin E.N. Application of hydrostructural resin to create grout cutoff curtain in a ground dam. *Proceedings of the VNIIG.* 2022;305:20-32. (In Russ.).

Грунтовая плотина является напорным сооружением, структура полтины обеспечивает ее прочность и устойчивость. Противофильтрационные элементы (ядра, экраны, диафрагмы) обеспечивают фильтрационную стойкость и суффозионную устойчивость.

По данным Международной комиссии по большим плотинам, в мире построено свыше 45000 больших плотин, из них 60 % составляют грунтовые плотины.

По данным Министерства природных ресурсов, зарегистрировано около 30000 водоподпорных гидротехнических сооружений, из них грунтовые плотины составляют 80 %. В более 50 % от всех аварий на плотинах разного типа приходятся на грунтовые плотины [1].

Плотины из грунтовых материалов в зависимости от материала их тел и противофильтрационных устройств, а также способа возведения подразделяют на типы, указанные в табл. 1 [2].

Таблица 1

Типы плотин

Тип плотины	Отличительные признаки грунта
Земляная насыпная	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; отсыпают насухо с уплотнением или в воду
Земляная намывная	Грунты от глинистых до песчано-гравийных и гравийно-галечниковых; намывают средствами гидромеханизации
Каменно-земляная	Грунты тела – крупнообломочные, противофильтрационных устройств – от глинистых до мелкопесчаных
Каменно-набросная	Грунты тела – крупнообломочные; противофильтрационные устройства из негрунтовых материалов или комбинированные: грунт + инъекция

В нормативном стандарте [2] определены основные требования к противофильтрационным устройствам (ПФУ) при использовании слабопроницаемых грунтов в виде верховой или центральной противофильтрационной призмы, экрана, диафрагмы, ядра, понура, шпунта, стенки, в том числе создаваемой методом «стена в грунте».

В работе [1] проведен анализ эксплуатационного состояния грунтовых плотин в зависимости от типа противофильтрационных устройств. Для анализа выбрано 73 плотины, расположенных по всему миру.

На рис. 1 представлена диаграмма состояния ПФУ.



Рис. 1. Диаграмма состояния ПФУ

Приведенные случаи указывают, что в исправном состоянии находятся 59 % плотин, а в неисправном 41 %, что обязывает устранять недостатки.

Лаборатория фильтрационных исследований им. Н.Н. Павловского АО «ВНИИГ им. Б.Е Веденеева» внесла весомый вклад в отечественную школу гидротехнического строительства, с 1935 г. проводя фильтрационно-суффозионные исследования грунтовых сооружений. Эксперты лаборатории отмечают, что для проектирования плотин и выбора противофильтрационных элементов (ПФЭ) грунтовых плотин необходимы данные фильтрационных характеристик и водно-физических свойств грунтов, видов и характера фильтрационных деформаций грунтовых материалов, определяющие значения фильтрационных нагрузок и прочности. Все это влияет на выбор ПФЭ и дальнейшую безопасность сооружения, требования к которой закреплены федеральным законом [3].

На основании федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» определена ответственность, критерии безопасности и нарушений: ухудшение показателей прочности и водонепроницаемости материалов, из которых возведены гидротехнические сооружения, и пород основания, неудовлетворительные условия эксплуатации, технического оснащения гидротехнических сооружений и организации контроля (мониторинга) за их безопасностью [4]. В соответствии с предписаниями ФЗ № 117, необходимо своевременно устранять недостатки в грунтовой плотине для поддержания устойчивости сооружения, несущей способности основания.

Учитывая, что грунтовая плотина находится под постоянным напором воды, своевременный мониторинг ее состояния способен обеспечить безопасность сооружения и предотвратить нежелательные последствия. Аварийные процессы способны развиваться стремительно. Это демонстрирует случай, который произошел в 1976 г. на грунтовой плотине Титон (США). Высота плотины составляла 93 м, при наполнении водохранилища появились ключи, расход увеличился до 20 м^3/с, на гребне появилась воронка, через 1 час с водой унесло 3000 м^3 грунта и плотина разрушилась [5].

Причиной аварий грунтовых плотин зачастую являются ошибки при строительстве (неправильный подбор грунтовых материалов, недостаточное уплотнение и выбор ПФУ), которые приводят к нарушениям фильтрационной прочности. Так, в 1993 и 1994 гг. на плотинах Киселевского и Тирлянского водохранилищ произошли прорывы по этой причине [12].

Анализ типа и конструкции ПФУ является ключевым фактором при капитальном ремонте грунтовой плотины. Основными критериями выбора служат: гидрогеологические условия; сейсмичность; климатические условия (длительность морозного периода и частота ливневых осадков); скорость и простота выполнения; логистические этапы поставки оборудования, механизмов и материалов; технико-экономические обоснования.

В работе [8] отмечено, что деформируемость противофильтрационных стен и завес должна быть выше деформируемости среды грунта не более чем в 2 раза. На работоспособность ПФЭ оказывают влияние изгибные деформации, которые ведут за собой появление растягивающих напряжений и трещинообразование. Растягивающим напряжения могут быть подвержены зоны ослабленного грунта, а также зоны сопряжения со скальным основанием. В свою очередь, повышенная жесткость стен ведет к увеличению напряжений и снижению запаса прочности. Рекомендации ICOLD (1985 г.) устанавливают, что модуль упругости материала ПФЭ не должен превышать модуль деформации грунта более чем в 5 раз [8].

Необходимо учитывать, что в естественном залегании грунт находится в условиях трехосного напряженного состояния из-за давления вышележащих слоев грунта, бокового давления и напряжений, вызванных действием сооружения и воды [20].

Противофильтрационные завесы (ПФЗ) методом «стена в грунте» были выполнены, в частности, в основании плотин Даулиганга (Индия), Мерове (Эфиопия), Перибонка (Канада), Сильвенштейн (Германия), Сялонди (Китай), Сангтудинской ГЭС (Таджикистан), Керхе (Иран), Курейской ГЭС (Россия), в дамбе Герберта Гувера (США) [6]. В работе [6] отмечено, что «стены в грунте» воспринимают деформации грунтового массива и испытывают не только изгиб, но и сжимающие усилия.

Часто поднимается вопрос об избрании метода восстановления ПФУ в сжатые сроки. В табл. 2 представлены варианты по устройству «стены в грунте» при капитальном ремонте плотины.

Далее вкратце описаны основные противофильтрационные устройства, устроенные методом «стена в грунте».

Шпунтовые ограждения

Шпунтовые ограждения могут быть деревянными, железобетонными, металлическими. Деревянные (погружение до 5–6 м) ограждения не извлекаются и в настоящий момент уже не применяются. Железобетонный шпунт (погружается молотом с большой энергией удара) редко применим. Металлический шпунт широко применяется в ГТС, он извлекаемый**.** Металлические шпунты образуют сплошную тонкую стену из отдельных элементов, жестко закрепленных в пазах**.** На Серебрянской ГЭС-2 в плотине применена шпунтовая стенка [9].

В 1933–1934 гг. по предложению создателя и руководителя лаборатории гидроизоляции ВНИИГ Глебова П.Д. на правобережной дамбе Нижне-Свирской ГЭС был установлен металлический шпунт и по обе стороны залит асфальтовым раствором [10].

Таблица 2

Варианты устройства «стены в грунте»

Критерии	«Стена в грунте»				
	шпунтовые сооружения	траншейный способ	БСС из ГЦБ	струйная цементация	методом пропитки гидроструктурной смолой
Допустимая *h* (глубина в метрах) при ремонте	До 10 м	До 10 м	До 30 м	До 30 м	До 20 м
Наличие напорной фильтрации на существующей плотине	Допустимо	Недопустимо, возможны обрушения грунта	Допустимо	Недопустимо	Допустимо, регулируется скоростью реакции
Средняя прочность на сжатие, ПФУ воспринимает нагрузки в сутках	Через 1 сутки (установленного по фронту)	От 0,5 до 10 МПа, через 14 суток	От 0,5 МПа до 3,1 МПа через 14 суток	От 5 до 15 МПа через 14 суток	От 0,5 до 1,0 МПа через 1 сутки
Крупный камень в грунтах (валуны)	Недопустимо	Допустимо	Допустимо	Недопустимо	Допустимо
Выполнение в зимний период	Недопустимо	Допустимо (до –20 °С)	Допустимо (до –20 °С)	Допустимо (до минус 20 гр)	Ограниченно допустимо
Мерзлые грунты	Недопустимо	Допустимо	Допустимо	Недопустимо	Недопустимо
Выполнение на откосах	Не выполняется	Не выполняется	Допустимо	Допустимо	Допустимо
Вертикальная стена под углом в сторону бьефа	Невыполнимо	Невыполнимо	Допустимо	Допустимо	Допустимо

Траншейный метод

Устройство монолитной траншейной «стены в грунте» подразделяют на следующие виды: с пересекающими секциями (захватками); с разделительными трубами; с последовательным заполнением захваток бетонной смесью; с непрерывным заполнением захваток бетонной смесью [19].

Траншейным способом выполнены завесы в основаниях верхового зуба понура Воткинской ГЭС на р. Каме и Сионской ГЭС (Грузия). Завеса Сионской плотины создавалась заполнением бетоном траншеи шириной 0,6 м и длиной 168 м, имеющей глубину от 17,5 до 26,4 м [9]. Из траншеи порода удалялась при помощи эрлифта.

Также траншейные завесы выполняются с применением ковшовых и бурофрезерных машин. После того как экскавация грунта закончена, укрепляются стены захватки и секционно заполняется противофильтрационным элементом (бетон, бетон с добавлением бентонитовой глины), в который может погружаться металлический каркас. Дополнительно на стенку траншеи с напорной стороны возможно установить геомембрану. Для нового строительства возможно создать ПФЗ глубиной до 50–70 м, для ремонта глубина траншеи до 15 м. Укладка бетона в грунтовые выработки (независимо от их глубины и заполнения раствором) должна осуществляться методом вертикально перемещаемой трубы (ВПТ).

Траншейные стенки-диафрагмы выполнены на плотинах Вади-Тануф (Оман) и Хадита (Ирак), на плотине гидроузла Боулдерхэд (Великобритания) в 1968 г., на плотине Фонтенель (США) в 1964 г. с помощью гидрофрезы на площади 16 тыс. м^2 [11].

Метод буросекущих свай из глиноцементобетона

Метод буровых свай в виде сплошной стены для противофильтрационных завес был разработан «Гидроспецстроем» и применен впервые в 1959 г. в основании плотины Шерубай-Нуринского водохранилища Карагандинской ГРЭС-2 позже – в основании плотин Ереванской и Сионской ГЭС. Сущность метода заключается в создании перекрывающих скважин диаметром 60–100 см и заполнении их бетоном, что образует сплошную свайную стену [9]. С развитием технологии бурения больших диаметров совершенствовались и составы с добавлением бентонитового порошка и цемента.

Технология буросекущих свай позволяет создать сплошную стену в грунте. Для грунтовых плотин в период ремонта она применима с разными грунтами, в том числе обводненными и насыщенными крупным обломочным камнем (валунами). Технологией предусмотрено бурение скважин диаметром 0,6–1,2 м, выемка грунта и заполнение глиноцементобетонной смесью.

Необходимо учитывать, что при наполнении водохранилища действие воды снижает давление, передаваемое плотиной на основание. Вертикальные сжимающие усилия, передаваемые на стену, уменьшаются в 2 раза. С учетом снижающихся нагрузок бокового давления на «стену в грунте» применимы составы из глиноцементобетона (ГЦБ), их прочность составляет от 0,57 до 3,05 МПа [8].

В работе [14] отмечена эффективность применения БСС из глиноцементобетона и приводится сравнение размещения диафрагм в плосковертикальном и наклонном направлении. Возведенная «стена в грунте» испытывает горизонтальные смещения в пределах 0,2–0,5 м, номинальное смещение тела диафрагмы в сторону нижнего бьефа отмечается у плоской

наклонной диафрагмы и максимальные растягивающие напряжения для расчетных случаев находятся в пределах 0,2–0,3 МПа, не вызывая трещинообразования.

Метод струйной цементации

Струйная цементация – это метод закрепления грунтов, широко применяемый для закрепления подпорных стен и ограждений котлованов, усиления фундаментов, укрепления откосов и склонов, создания противофильтрационных завес.

Струйная цементация предусматривает выполнение работ в два этапа: прямой и обратный ход буровой колонны и подача водоцементного раствора с перемешиванием грунта под давлением (Jet grouting). Применяются одно-, двух- и трехкомпонентные технологии. В результате последующего гидратационного твердения цемента получается укрепленный грунтобетон.

В работе [17] приведены данные о прочности укрепленного грунта на сжатие после выполнения струйной цементации грунтов. Так, в суглинистых грунтах прочность грунтобетона составляет 3–10 МПа, в супесях 5–14 МПа, в песках 15–20 МПа, в гравийных песках > 20 МПа. Эти значения важны для понимания совместной работы грунта и противофильтрационной завесы, устроенной способом «стена в грунте».

В работе [7] приводятся прочностные показатели грунта после экспериментальных работ традиционной и перекрестной гидроструйной цементации. Так, для глинистого грунта средняя прочность составила 5,4 МПа, для песчаного грунта – 11,1 МПа, для гравийного грунта – 7,3 МПа.

На Сангтудинской ГЭС (Таджикистан) была проведена оценка фильтрационного состояния, которая показала, что грунтобетонная стена, выполненная методом струйной цементации, совместно с глубинной цементацией основания, обеспечивает эффективное гашение напора до 87 % [13].

На каменно-земляной плотине Сиаолангди (Китай) противофильтрационная стенка-диафрагма выполнена в виде 408 свай (колонн) глубиной до 52 м [11], надежно сопряженных между собой и со скальным основанием.

Метод пропитки

В СП 45.13330.2012 [15] установлен один из способов химического закрепления грунтов методом пропитки путем нагнетания под давлением водных растворов полимеров неорганических и органическим смол. В пособии [16] указано, что недостатком смолизации является выделение карбамидными смолами токсичного формальдегида. При силикатизации происходит защелачивание грунтов. Эти способы с применением жидкого стекла, слабых растворов кислот и карбамидных смол могут повлиять на экологическое состояние грунтовых вод.

Практика силикатизации и смолизации широко применима в строительстве. Для выполнения работ используются забивные инъекторы, молоты и гидродомкраты. В условиях обводненных грунтов с коэффициентом фильтрации до 1 м/сут нагнетается жидкое стекло сверху вниз, а затем раствором хлористого кальция снизу вверх. При скорости более 3 м/сут работа выполняется уже в две очереди. Эти процессы в производстве работ подразумевают применение крупногабаритных машин, механизмов и станции

приготовления растворов. Все эти процессы влияют на скорость проведения работ.

В стандарте EN 12715:2000 [19] регламентируются основные принципы и методы выполнения специальных геотехнических работ, которые предусматривают также режим пропитки грунтов. Для режима пропитки применяются растворы. Особо отмечено, что силикатные растворы не являются стабильными и их применение может привести к росту микроорганизмов в грунте. Для метода пропитки предлагаются растворы (смолы) на акрилатной основе, уменьшающие водопроницаемость и повышающие прочность. Также возможно использование смол на полиуретановой, фенольной и эпоксидной основе.

Применение гидроструктурной смолы на акрилатной основе целесообразно для метода пропитки и является экологически безопасным. При производстве работ используется мобильное оборудование, которые позволяет оптимизировать выполнение работ в сжатые сроки. Учитывая, что структура грунта имеет трехфазную основу (частицы, воздух и вода) при пропитке происходит вытеснение воды и воздуха и заполнение пор гидроструктурной смолой в условиях естественного залегания без разрушения структуры в сложных инженерно-геологических условиях.

Имеется новый опыт реализации метода пропитки грунта, отличающийся использованием забивных составных металлических пик малого диаметра (от 14 до 26 мм) с теряемым наконечником и инъекцией полимерной смолы на акрилатной основе (гидрогель). Инъекция производится восходящим потоком с постепенным подъемом пики из нижней отметки до требуемой согласно установленному режиму выполнения работ и геологическим условиям. Гидрогели представляют собой многокомпонентные композиции, которые предварительно приготавливаются на объекте с учетом требуемых параметров из субкомпонентов в заданных пропорциях.

Гидрогели до полимеризации отличаются стабильно низкой вязкостью порядка 2,5–5,0 мПа·с, что обеспечивает пропитывающую инъекцию грунтов с коэффициентом фильтрации до $1 \cdot 10^{(-7)}$ м/с. Преимуществом данного вида составов является возможность точной настройки скорости реакции (полимеризации) непосредственно на объекте, ориентируясь на изменчивость геологических условий, в том числе в процессе производства работ. Инъекция производится насосами по двухкомпонентной линии со смешением компонентов перед подачей в инъекционную пику, что позволяет выполнять работы гидрогелем со скоростью реакции менее 5 минут и, в свою очередь, позволяет контролировать распространение материала в грунте. Для выполнения работ в условиях напорной фильтрующей воды скорость реакции может быть снижена до минимальных 14 секунд.

Гидроструктурная смола (гидрогель) нагнетается с ограниченным давлением до 2 МПа, это позволяет избежать гидроразрыва. Одновременно происходит вытягивание пики при помощи вытяжной машины и нагнетание материала. Из-за давления материал распространяется по окружности и пропитывает грунт. Инъекционные пики погружаются вертикально или наклонно на глубину до 20 м. Расстояние между скважинами зависит от типа грунта, коэффициента фильтрации и пористости, в среднем значение составляет 300–350 мм по фронту. На рис. 2 представлена схема расположения инъекционных скважин.

При выполнении нагнетания в теле грунта формируется консолидируемая колонна диаметром до 350–400 мм. Учитывая расположение и последовательность работ, формируются пересекающие по фронту водонепроницаемые инъекционные колонны из грунтополимера, стойкие к деформационным и фильтрационным нагрузкам (при давлении столба воды до 70 м). Активная фильтрация в зоне контакта колонн влияет на обеспечение противофильтрационной стойкости из-за способности инъекционного материала к разбуханию при контакте с водой, обеспечивая лучший контакт пересекающих колонн, и способности воспринимать деформации без образования трещин. В зависимости от задачи применяются одно-, двух-, трехрядные колонны. После выполнения инъекционных работ формируется «стена в грунте» из грунта полимера.

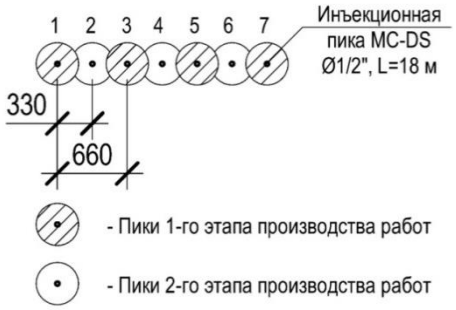


Рис. 2. Схема расположения инъекционных скважин

По данной технологии были успешно выполнены работы по закреплению грунта на объекте строительства подземного перехода между станциями метро в г. Минске. После откопки опытного участка был зафиксирован закрепленный массив грунта габаритными размерами 2×3×0,8 м, полученный в результате инъекции одной инъекционной пики в горизонтальном расположении (рис. 3 и 4). На основании данных опытных работ была предложена схема расстановки инъекционных пик с проведением последующей пропитывающей инъекции акрилатным гелем производства MC Bauchemie на глубину до 15 м. Вскрытие показало, что в результате выполненных работ был сформирован единый связанный массив, который позволил выполнить проходческие работы ручным способом без дополнительных защитных мероприятий.

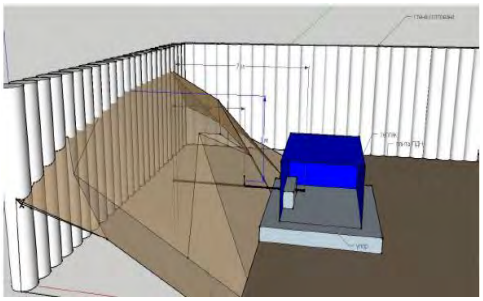


Рис. 3. Трехмерная визуализация участка пробного инъекцирования



Рис. 4. Закрепленный грунт

Для гидроструктурной смолы на акрилатной основе предъявляются технические требования по водонепроницаемости материала 0,7 МПа, водонепроницаемости грунтополимера 0,45 МПа, вязкости 3–15 мПа·с, регулируемое время реакции от 14 секунд до 30 минут, разбухание (изменение массы) для материала 100–120 % и для грунтополимера 15–20 %.

Данная технология была успешно применена в 2020–2021 гг. на Шульбинском шлюзе, который находится на реке Иртыш в Республике Казахстан. Стояла задача по созданию противофильтрационной завесы обратной засыпки техногенных грунтов. ПФЗ выполнялась на глубину 10 м методом пропитки гидроструктурной смолой через инъекционные пики. Двухлетний мониторинг эксплуатации шлюза показал, что перемещение стенок шлюза остановилось и находятся в проектных отметках.

Мониторинг целостности ПФЭ

Для своевременного контроля фильтрационной стойкости и работоспособности «стены в грунте» необходимо предусмотреть мониторинг систем. Такой мониторинг предусматривает размещение волоконно-оптических датчиков температуры вдоль всей площади диафрагмы со стороны нижнего бьефа и их подключение к считывающему волоконно-оптическому трансиверу, определяющему место повреждения и величину протечек через диафрагму. Это позволяет повысить качество контроля фильтрационного режима, определить место повреждения с точностью до 1 м, количество возникающих протечек, снизить сроки и затраты по их обнаружению и устранению [20].

Заключение

Грунтовые плотины являются напорными сооружениями, их противофильтрационные элементы обеспечивают фильтрационную стойкость и суффозионную устойчивость.

В зависимости от типа грунтовой плотины и воздействий на сооружения применимы различные варианты противофильтрационных устройств для дисперсных несвязных грунтов земляной плотины. Для выбора тех или иных решений применим комплексный подход, который будет учитывать основные нагрузки на сооружения, период выполнения работ, логистические этапы по доставке оборудования, машин и материалов, технико-экономические обоснования и возможности применения технологий.

Деформируемость противофильтрационных стен и завес должна быть выше деформируемости среды грунта не более чем в 2 раза. На работоспособность ПФЭ оказывают влияние изгибные деформации, они ведут к появлению растягивающих напряжений и трещинообразованию. В свою очередь, повышенная жесткость стен ведет к увеличению напряжений и снижению запаса прочности. Рекомендации ICOLD (1985 г.) устанавливают, что модуль упругости материала ПФЭ не должен превышать модуль деформации грунта более чем в 5 раз [8].

Расположенные в сторону нижнего бьефа наклонные диафрагмы испытывают меньше горизонтальных смещений, чем вертикальные диафрагмы [14].

Жесткие диафрагмы при струйной цементации подвержены трещинообразованию. Траншейные диафрагмы в условиях фильтрационных потоках в теле плотины трудно применимы. Шпунтовые диафрагмы с техногенной засыпкой и валунами не применимы.

На основании ФЗ № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений», который определяет ответственность, критерии безопасности и нарушений, необходимо своевременно устранять недостатки в грунтовой плотине по местной устойчивости сооружения и несущей способности основания.

Учитывая, что плотина находится под воздействием воды напорного фронта, своевременный мониторинг состояния грунтовый плотины обеспечит безопасность сооружения и предотвратит нежелательные последствия.

При рассмотрении различных вариантов использования для противофильтрационной завесы в грунтовой плотине, метод БСС из ГЦБ наиболее походит по универсальности своего применения в обводненных условиях и при высоких деформациях.

Метод пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе является мобильным и применим в сжатые сроки для сложных условий, где необходимо выполнение на откосах. Однако данный метод пропитки требует дополнительного изучения его фильтрационной стойкости и пределов работоспособности ПФЗ из грунтополимера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Волкова И.О.** Опыт эксплуатации неоднородных грунтовых плотин: магистр. дис.: 13.04.02. Саяногорск: Черемушки, 2019. 62 с.
2. **СП 39.13330.2012**. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095521.
3. **Сольский С.В., Лопатина М.Г.** Лаборатория фильтрационных исследований им. Н.Н. Павловского ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 263. С. 7–17.
4. **Федеральный закон** «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 № 117-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/
5. **Ладенко С.Ю., Иванова Т.В.** Гидроузлы и водохранилища как элементы водохозяйственных систем: учебное пособие для аспирантов. СПб.: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2020. 264 с.
6. **Саинов М.П.** Пространственная работа противофильтрационной среды // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5. С. 20–33.
7. **Головин К.А., Сапронов И.В.** Прочность закрепленного массива при применении технологии перекрестной гидроструйной цементации // Известия Тульского государственного университета. 2013. Вып. 10. С. 132–137.
8. **Саинов М.П**. Напряженно-деформированное состояние грунтовых плотин с противофильтрационными устройствами из материалов на основе цемента: дис. … д-ра техн. наук: 05.23.07. М., 2020. 508 с.
9. **Айрапетян Р.А.** Проектирование каменно-земляных и каменно-набросных плотин. М.: Энергия, 1975. 328 с.
10. **Глаговский В.Б., Курнева Е.В., Радченко В.Г.** Исследование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с негрунтовыми ПФУ // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 256. С. 60–71.

11. **Радченко В.Г, Радченко С.В.** Применение способа «стена в грунте» при строительстве и ремонте плотин из грунтовых материалов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2010. Т. 258. С. 114–127.

12. **Радченко С.В.** Причины повреждений и аварий грунтовых плотин (по данным СИГБ) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2010. Т. 258. С. 99–113.

13. **Белкова И.Н., Глаговский В.Б.** О методических особенностях численного моделирования фильтрационного состояния в системах «плотина – основание» // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2008. Т. 252. С. 14–26.

14. **Орищук Р.Н.** Новые конструкции грунтовых плотин с глиноцементобетонными диафрагмами // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 292. С. 21–29.

15. **СП 45.13330.2012**. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87. URL: https://docs.cntd.ru/document/-1200092708.

16. **Пособие** по химическому закреплению грунтов инъекций в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-.83). М.: Стройиздат, 1986. 128 с.

17. **Малинин А.Г.** Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 238 с.

18. **СТО НОСТРОЙ 2.5.74-2012**. Основания и фундаменты. Устройство «стены в грунте». Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. М.: БСТ, 2014. 85 с.

19. **Европейский стандарт EN 12715:2000. DIN 12715.** Выполнение специальных геотехнических работ. Цементация.

20. **Патент 2628447.** Российская Федерация, МПК E02B 7/06, E02B 3/16. Способ контроля глиноцементобетонной диафрагмы в грунтовой плотине / Р.Н. Орищук, С.В. Сольский, М.Г. Лопатина, Б.А. Арын; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». № 2016113003, заявл. 05.04.2016; опубл. 16.08.2017, Бюл. № 23. 10 с.

REFERENCES

1. Volkova I.O. Experience of operation of heterogeneous underground dams: Master's thesis: 13.04.02. Sayanogorsk: Cheryomushki; 2019. 62 p. (In Russ.).

2. SP 39.13330.20212012. Rock fill dams. Updated version of the SNiP 2.06.05-84*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095521. (In Russ.).

3. Solsky S.V., Lopatina M.G. Seepage research laboratory N.N. Pavlovsky «B.E. Vedeneev VNIIG». *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG.* 2011;263:7-17. (In Russ.).

4. National Law «On Safety of Hydraulic Engineering Structures» of July 21, 1997 No. 117-FZ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/ (In Russ.).

5. Ladenko S.Yu., Ivanova T.V. Waterworks and reservoirs as elements of water management systems: a textbook for graduate students. St. Petersburg: Publishing house of JSC «Vedeneev VNIIG»; 2020. 264 p. (In Russ.).

6. Sainov M.P. 3D performance of a seepage control wall in dam and foundation. *Magazine of Civil Engineering.* 2015;(5): 20-33. (In Russ.).

7. Golovin K.A., Sapronov I.V. The strength of the fixed array when using the technology of cross-jet cementation. *Izvestiya Tula State University*. 2013;10:132-137. (In Russ.).

8. Sainov M.P. Stress-strain state of soil dams with anti-filtration devices made of cement-based materials: dissertation of Dr. Sci. (Techn.): 05.23.07. Moscow; 2020. 508 p. (In Russ.).

9. Ajrapetyan R.A. Design of stone-earth and stone-fill dams. Moscow: Energiya; 1975. 328 p. (In Russ.).

10. Glagovsky V. B., Kurneva E.V., Radchenko V.G. Study of stressed-strained state of embankment dams with non-soil antiseepage facilities. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG.* 2009;256:60-71. (In Russ.).

11. Radchenko V.G., Radchenko S.V. Application of «wall in soil» method during dam construction and repair of soil materials. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG.* 2010;258:114-127. (In Russ.).

12. Radchenko S.V. Reasons of damages and failures of embankment dams (by ICOLD information). *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG.* 2010;258:99-113. (In Russ.).

13. Belkova I.N., Glagovsky V.B. On the methodical features for numerical modeling of the seepage state in the systems «dam – foundation». *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG.* 2008;252:14-26. (In Russ.).

14. 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.).

15. SP 45.13330.2012. Earthworks, grounds and footings. Updated version of the SNiP 3.02.01-87. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200092708. (In Russ.).

16. Manual on chemical fixing of soils by injection in industrial and civil construction (to SNiP 3.02.01-.83). Moscow: Stroyizdat; 1986. 128 p. (In Russ.).

17. Malinin A.G. Jet grouting. Moscow: Stroyizdat; 2010. 238 p. (In Russ.).

18. STO NOSTROY 2.5.74-2012. Bases and foundations. A design of «slurry wall». Regulations, monitoring of implementation and requirements for the results of works. Moscow: BST, 2014. 85 p.

19. EN 12715:2000 Execution of special geotechnical work. Grouting.

20. Patent 2628447. Russian Federation, Int. Cl. E02B 7/06, E02B 3/16. Method of earthen cement concrete diaphragm plate control in ground dam / R.N. Orishchuk, S.V. Solskij, M.G. Lopatina, B.A. Aryn; Proprietor JSC «Vedeneev VNIIG». № 2016113003; date of filing: 05.04.2016; date of publication: 16.08.2017, Bull. № 23. 10 p.

Информация об авторах

М.Е. Михайлов – ведущий менеджер по работе с проектными сегментами энергетики и ГТС;

Е.Н. Захарьин – канд. техн. наук, руководитель группы по работе с проектными сегментами.

Information about the authors

M.E. Mikhailov – Lead Manager for working with the project segments of energy and hydraulic engineering;

E.N. Zakharin – Cand. Sci. (Techn.), Head of Department for working with the project segments.

Статья поступила в редакцию 10.07.2022; одобрена после рецензирования 27.07.2022; принята к публикации 20.09.2022.

The article was submitted 10.07.2022; approved after reviewing 27.07.2022; accepted for publication 20.09.2022.