

Особенности мониторинга состояния грунтовых плотин с диафрагмой из глиноцементобетонных буросекущихся свай

Лабойко Р. Ю.¹, младший научный сотрудник АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”

В статье описаны основные особенности мониторинга состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай, дана оценка действующей нормативной документации в области мониторинга безопасности таких плотин, а также предложены дополнительные мероприятия по оценке их технического состояния.

Ключевые слова: мониторинг, противодиффузионный элемент, грунтовая плотина, глиноцементобетон, натурные наблюдения.

Features of monitoring the condition of ground dams with a diaphragm from clay-cement concrete drill piles

Laboyko R. Yu.¹, junior researcher “Vedeneev VNIIG”, JSC

The article describes the main features of monitoring the condition of soil dams with clay-cement concrete diaphragm of drill piles, assesses the current regulatory documentation in the field of safety monitoring of such dams, and proposes additional measures to assess their technical condition.

Keywords: monitoring, impervious element, ground dam, clay-cement concrete, field observations.

В соответствии с [1 – 3] на гидротехнических сооружениях вне зависимости от класса и предназначения необходимо обеспечивать мониторинг показателей их состояния, а также совершенствовать системы контроля за состоянием ГТС.

Особое место в проектировании и дальнейшей эксплуатации занимают грунтовые плотины, а мониторинг безопасности таких ГТС по данным натурных наблюдений является одним из ключевых факторов при анализе и оценке технического состояния сооружения.

Наряду с традиционными противодиффузионными устройствами (ПФУ) в виде ядра, понура, зуба, экрана или их комбинации из водоупорных грунтов, особенно распространены диафрагмы, выполняемые из множества различных материалов и существенно различающиеся как по фильтрационным характеристикам, так и по деформационным. Любой из указанных типов ПФУ имеет место быть в конкретных сооружениях и условиях (климатических и эксплуатационных), если конструкция не только соответствует требованиям безопасной эксплуатации ГТС, но и целесообразна с экономической точки зрения.

Эффективность работы ПФУ грунтовой плотины независимо от его конструктивных особенностей и материала определяется гашением напора на ПФУ и его неизменностью во времени. Основные

типы материала диафрагмы, используемых в качестве ПФУ грунтовых плотин [4], приведены в табл. 1.

Подробнее остановимся на варианте грунтоцементной смеси в качестве материала ПФУ, традиционно именуемой глиноцементобетоном (ГЦБ). В целом, конструкция типа “стена в грунте” из грунтоцементных смесей в гидротехническом строительстве известна с 60-х гг. XX в. [5] и ограничивалась малыми плотинами до 15 м. Существует практика возведения “стены в грунте” траншейным способом или бурением. Элементы ПФУ выполняются отдельными захватками (панелями) или скважинами. При устройстве “стены в грунте” захватками, выполняется рытье траншеи, ее заполнение тиксотропным раствором с последующим бетонированием глиноцементобетонной смесью и одновременным вытеснением тиксотропного раствора. Размеры в плане панелей ограничиваются размерами грейферного ковша (до 3,2 × 3,2 м), в то время как оптимальная длина захватки достигает 6 м в соответствии с п. 8.3.4 [6].

Каждую панель или захватку выполняют поэтапно, заполняют её глиноцементобетоном, пропускают соседнюю, и далее совершают проходку и бетонирование следующей за ней. После этого возвращаются к пропущенной.

Для ПФУ в виде буросекущихся свай (БСС) проходку круглых скважин выполняют в аналогичном порядке с контролем отклонения оси скважины

¹ LaboykoRYU@vniig.ru

от вертикали. Устройство ГЦБД из БСС позволяет выполнять бурение и бетонирование скважин после отсыпки плотины до проектной отметки гребня, существенно сокращая сроки производства работ [7]. Отличительной чертой данной диафрагмы от классической “стены в грунте”, укладываемой послойно, является вертикальная ориентация межсвайных швов, а также выявленные по результатам мониторинга особенности формирования напряженно-деформированного состояния ПФУ [8 – 10].

Применение уникальных конструктивных решений влечет за собой совершенствование методов контроля с целью комплексного анализа и определения технического состояния сооружения. Дейст-

вующая нормативная документация [3, 11], предусматривает следующий основной состав контроля за состоянием грунтовых плотин:

- положение депрессионной поверхности в теле плотины и берегах;
- расход воды, профильтровавшейся через тело и основание;
- вертикальные и горизонтальные смещения гребня, берм, береговых примыканий и ПФУ;
- напряженно-деформированное состояние в теле плотины, противотрационных устройствах, а также в основании.

Окончательный состав натуральных наблюдений и средств инструментального контроля определяет

Т а б л и ц а 1

Классификация диафрагм грунтовых плотин

	Наименование материала, пример плотины	Преимущества	Недостатки
Жесткие диафрагмы	1. <i>Бетон Железобетон</i> Сызранская земляная плотина Harsprånget (Швеция) Strawberry (США)	Сейсмостойкость Устойчивость при переливе через гребень	Малое восприятие высоких смещений, трещинообразование, дороговизна Возможность нарушения сплошности Увеличение срока строительства
	2. <i>Каменная/кирпичная кладка</i> Williamsburg (США) Titicus (США)		
	3. <i>Дерево</i> Верхне-Кумахская плотина	Дешевизна Использование местных материалов	Недолговечность
Нежесткие диафрагмы	4. <i>Пластмасса Полиэтилен</i> Атбашинская ГЭС (Киргизия)	(не распространены)	Сложность сопрягающих узлов при проектировании
	5. <i>Металлический лист/шпунт</i> Серебрянская ГЭС-2 Ижорская плотина № 1 Плотина на оз. Luossavaara (Швеция)	Простота технологии возведения Отсутствие сезонности работ Сокращение сроков строительства	Малая ремонтпригодность Коррозионный износ ПФЭ
	6. <i>Асфальтобетон</i> Гоцатлинская ГЭС Ирганайская ГЭС Bigge (Германия) Eberlast (Австрия)	Гибкость материала Строительство в суровых климатических условиях Дешевизна материала	Сложность ремонта
	7. <i>“Стена в грунте” из грунтоцементной смеси, выполненная способом:</i> 7.1. <i>Захватки / Панели</i> Colbun (Чили) Manicouagan-3 (Канада) Formitz (Германия) 7.2. <i>Буресекущиеся сваи</i> Фонтенель (США) Курейская ГЭС Нижне-Бурейская ГЭС	Высокий темп строительства Возможность возведения в пронизываемых основаниях Эффективное решение при ремонтных работах Сокращение сроков производства работ Высокая ремонтпригодность Высокая степень гашения напора	Сравнительно высокая стоимость компонентов, входящих в состав смеси Недостаточная изученность работы ПФУ в условиях эксплуатации для плотин выше 15 м

генеральный проектировщик при разработке проекта в зависимости от класса плотины, её конструктивных и климатических особенностей, а также условий эксплуатации и технологии возведения.

Глиноцементобетонная диафрагма из буросекующихся свай (ГЦБД БСС) в качестве ПФУ грунтовой плотины широкого применения в отечественной практике не нашла. Сдерживающим фактором массового распространения противофильтрационных элементов из ГЦБ БСС является недостаточная изученность работы таких ПФУ в условиях длительной штатной эксплуатации для высоких грунтовых плотин. И как следствие, отсутствует ретроспективный анализ данных натурных наблюдений за многолетний период.

На территории Российской Федерации единственным сооружением I класса высотой 41 м с противофильтрационным элементом, выполненным полностью из глиноцементобетона, является грунтовая плотина Нижне-Бурейской ГЭС, построенная в Амурской области и введенная в эксплуатацию в 2019 г. Генеральным проектировщиком АО «Ленгидропроект» в качестве ПФЭ была выбрана диафрагма типа «стена в грунте», выполненная из ГЦБ БСС. Положительный опыт возведения перемычек котлована Нижне-Бурейской ГЭС с ГЦБД из БСС

также повлиял на окончательный вариант конструкции грунтовой плотины.

В настоящее время мониторинг безопасности грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС выполняется в соответствии с действующей программой натуральных наблюдений, охватывающей полный комплекс установленной на плотине КИА (табл. 2).

Существующая система мониторинга состояния плотины характеризуется следующими видами контроля:

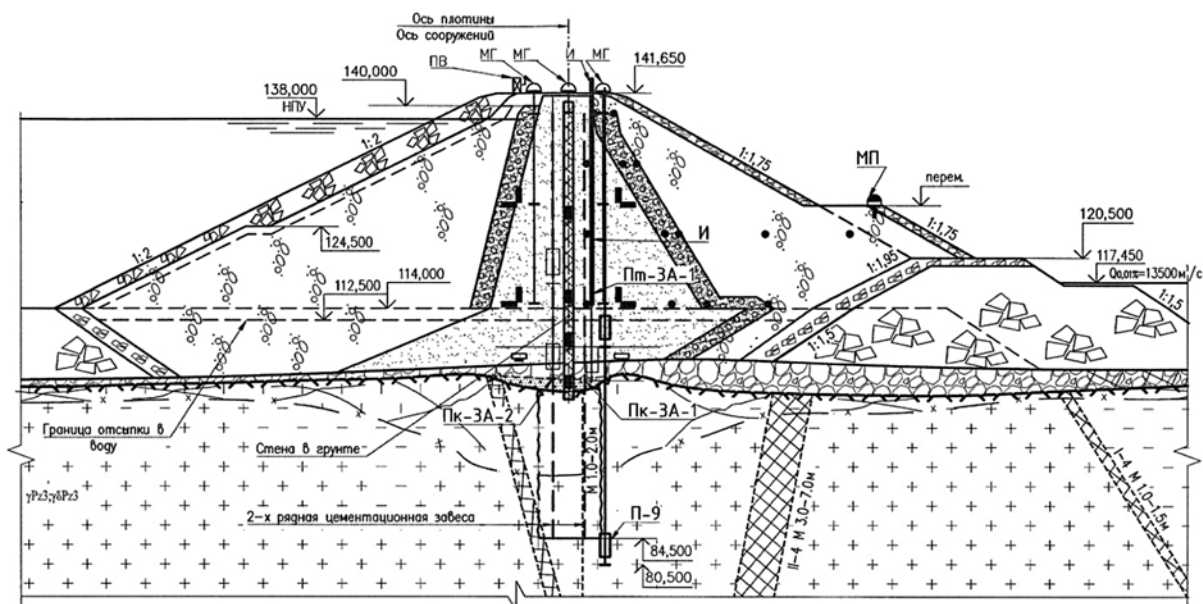
- контроль за фильтрационным режимом тела и основания плотины;
- контроль за плано-высотными перемещениями плотины;
- контроль за температурным режимом низовой упорной призмы;
- контроль за напряжённым состоянием грунта тела плотины;
- контроль за раскрытием швов на контакте «бетон-глиноцементобетон» в левобережном примыкании и на контакте с сопрягающим устоем.

Более того, впервые в практике отечественного гидростроительства струнная КИА была установлена непосредственно в скважины ГЦБД и позволила дополнить мониторинг следующими видами наблюдений:

Т а б л и ц а 2

Установленная КИА на грунтовой плотине Нижне-Бурейской ГЭС

№ п/п	Наименование КИА	Обозначение КИА	Периодичность измерений	Количество установленной КИА, шт.		
				Проект	Установлено	Действует
1	Знак плано-высотный	ПВ	1 раз в квартал	9	8	8
2	Марка поверхностная земляная	МП	1 раз в месяц	9	9	9
3	Марка глубинная земляная	МГ	1 раз в месяц	18	18	18
4	Пьезометр	П	1 раз в неделю	27	57	55
5	Инclinометр	И	1 раз в месяц	4	4	4
6	Преобразователь температуры струнный	ПТС-60	1 раз в месяц	94	93	88
7	Преобразователь напряжения грунта	ПНГС-10/ГД-10/ГД-30	2 раза в месяц	24	24	20
8	Преобразователь линейных перемещений струнный	ПЛПС-10	2 раза в месяц	12	12	7
9	Преобразователь давления струнный	ПДС-10	2 раза в месяц	6	6	3
10	Преобразователь линейных перемещений (в ГЦБД)	ПЛП-4430	2 раза в месяц	12	12	10
11	Преобразователь напряжений (в ГЦБД)	ПНГ-4800	2 раза в месяц	12	12	8



Наименование КИА	Условные обозначения	
	Буквен.	Бок вид
Плано-высотный знак	ПВ	⊠
Марка глубинная грунтовая	МГ	⊥
Пьезометр	П	⊥
Временный измерительный пульт	ВИП	□
Преобразователь температуры струнный	ПТС-60	•
Преобразователь габления струнный	ПДС-10	⊥
Преобразователь напряжения грунта струнный	ПНГС-10	—
Преобразователь линейных перемещений	ПЛП-4430	⊥
Преобразователь напряжения грунта	ПНГ-4800	⊥

Рис. 1. Схема размещения КИА для типового сечения

- контроль за напряжённо-деформированным состоянием ПФУ из ГЦБ;
- контроль за относительными линейными деформациями в ПФУ.

Схема расположения КИА в грунтовой плотине Нижне-Бурейской ГЭС представлена на рис. 1 и 2.

Изучение напряжённо-деформированного состояния ГЦБД из БСС выявило особенность распределения сжимающих напряжений по высоте плотины [8 – 10]. При этом общая картина НДС свидетельствует о наличии сжимающих напряжений в ГЦБД на всех отметках (рис. 2). Ограниченное количество измерительных створов (2 дейст-

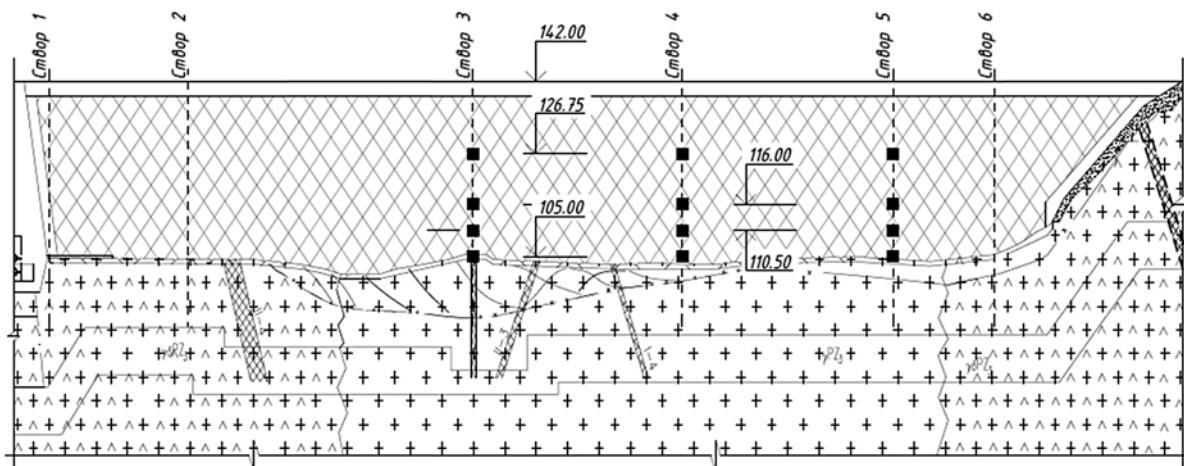


Рис. 2. Схема расположения КИА в ГЦБД Нижне-Бурейской плотины

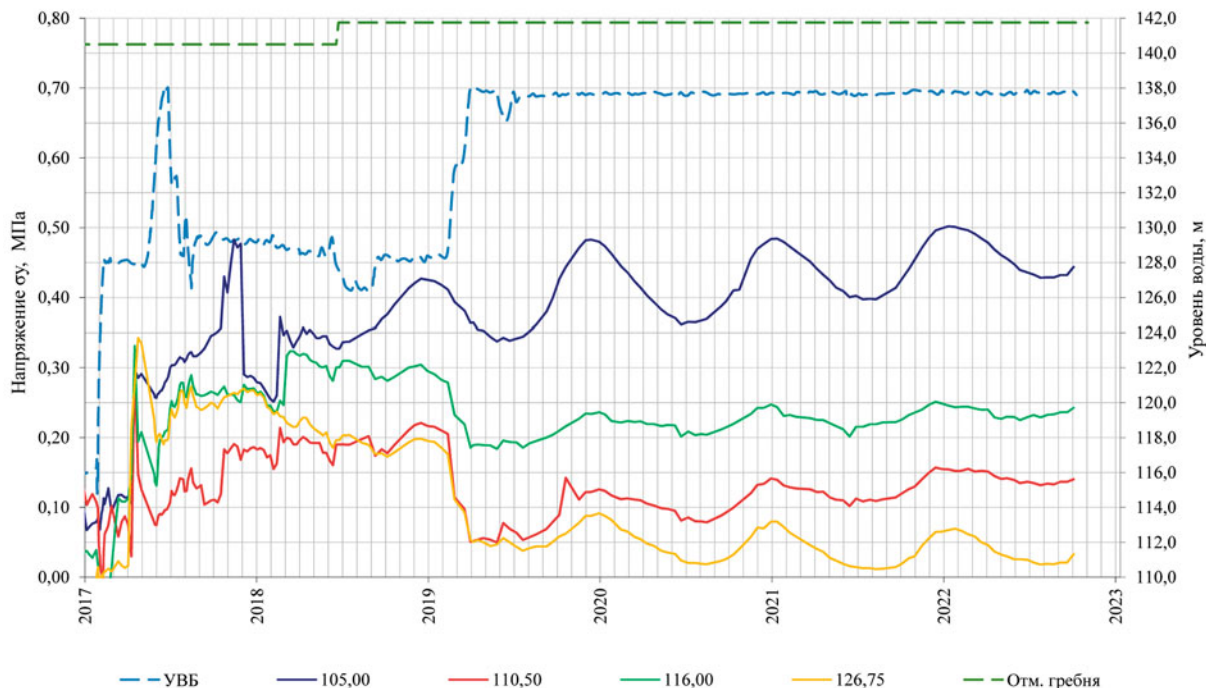


Рис. 3. Нормальные напряжения по вертикали в ГЦБД грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС. Створ 3

вующих), расположенных в центральной части плотины Нижне-Бурейской ГЭС, к сожалению, не позволяет сравнить результаты расчётных значений НДС ГЦБД с фактическими в береговых примыканиях.

Фильтрационный режим в грунтовой плотине характеризуется стабильностью во времени. В низовой упорной призме пьезометрические уровни остаются близки к значению УНБ после наполнения водохранилища (рис. 4). Максимальные действующие градиенты фильтрационных напоров находятся в пределах $I_{д.ср} = 30 \div 32$ что в 3–4 раза ниже значений, допустимых для материалов глиноцементных элементов “стена в грунте”.

Анализ данных температурной КИА, расположенной в грунте низовой призмы на 4-х отметках (116,00 м, 123,00 м, 132,00 м и 138,50 м), свидетельствуют об отсутствии значимых превышений своих показаний (рис. 5), что в сочетании с показаниями фильтрационной КИА и визуальными на-

блюдениями свидетельствует о качественной работе ПФЭ и отсутствии зон аномальной фильтрации.

В [3] с учётом лабораторных и натурных исследований, приказом Минстроя России от 24.01.2019 г. N 41/пр. были внесены дополнения, касающиеся ПФЭ из ГЦБ буресекущихся свай. В части мониторинга в п. 5.51к действующей редакции [3] учтён контроль фильтрационного состояния грунтовой плотины:

- определение расхода профильтровавшейся воды;
- определение температуры окружающей среды;
- определение электрического сопротивления геофизическим методом (наведенное поле);
- определение скорости прохождения сейсмической волны геофизическим методом.

Все методы контроля ПФУ из ГЦБ БСС, учтённые в [3] направлены на определение мест протечки в ПФУ и количества профильтровавшейся через

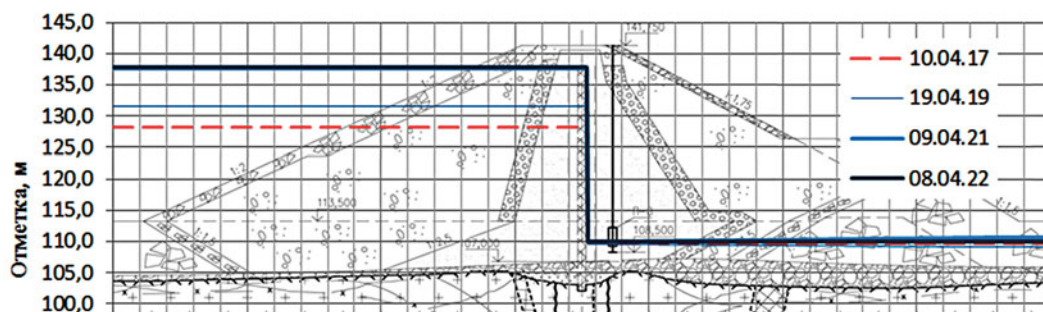


Рис. 4. Положение поверхности депрессии в створе № 3

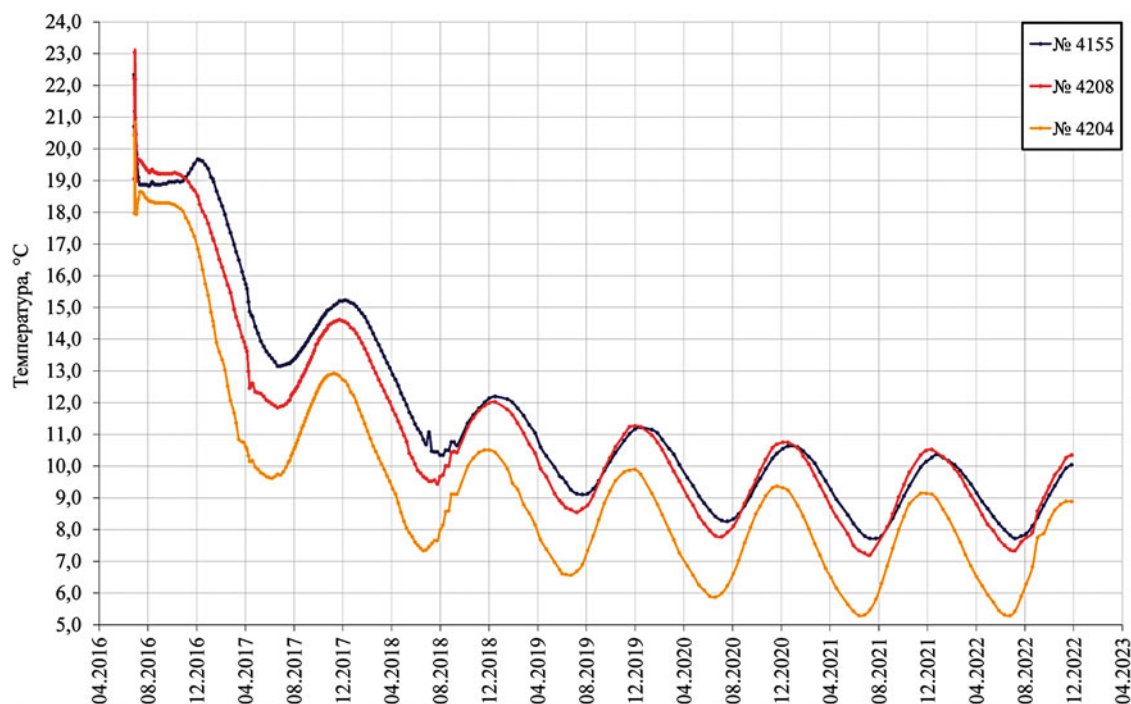


Рис. 5. График изменения температуры в теле грунтовой плотины на отм. 132,00 м

него воды. Иные методы мониторинга состояния БСС из ГЦБ в действующей нормативно-методической документации отсутствуют, что является важным упущением для изучения работы глиноцементобетонных свай в режиме штатной эксплуатации.

В 2017–2019 гг. были выпущены патенты 2628447, 2709040, 2678535 [12–14], посвященные мониторингу состояния диафрагмы из ГЦБД БСС в грунтовой плотине с помощью волоконно-оптической системы контроля, трубчатого дренажа для сбора фильтрующейся воды, а также методом электротомографии. Кроме того, в части мониторинга состояния ГЦБД существуют разработанные технические решения, направленные на повышение надёжности грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из бурсекущихся свай:

- многослойный обратный фильтр в зоне устройства ГЦБД;
- новый узел сопряжения ГЦБД к бортовому примыканию или бетонным сооружениям;
- система увлажнения вмещающего ГЦБД грунта на период твердения ГЦБ;
- применение геофизического метода сейсмического просвечивания.

Указанные методы направлены на мониторинг исключительно фильтрационного состояния плотины и позволяют определить местоположение сосредоточенной интенсивной фильтрации с точностью до 1–1,5 м, что, безусловно, важно, однако не учитывает количественное измерение участка повреждения ПФУ, такое как величину раскрытия (или возможного разрушения) межсвайного шва.

Наиболее тонким участком диафрагмы, выполненной из бурсекущихся свай, является участок пересечения свай, то есть межсвайный шов [8–10]. Более того, расчёты грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС в пространственной постановке показали, что в зонах бортовых примыканий ГЦБ диафрагмы из БСС возможно возникновение растягивающих напряжений и раскрытие межсвайных швов между отдельными сваями [7]. С целью предотвращения возможных деструктивных процессов в ПФЭ в дополнение к существующим методам контроля следует предусмотреть возможность монтажа средств инструментального контроля за раскрытием межсвайных швов. Здесь проектирование сталкивается с новой задачей — отсутствие возможности размещения средств контроля линейных деформаций (щелемеров) в любом месте по высоте ПФУ ввиду технологии возведения БСС (с гребня после отсыпки тела плотины). В данном случае наиболее возможно для реализации устройство щелемеров вдоль оси ГЦБД из БСС по гребню ПФУ. В то же время, разработка рекомендаций по определению методов инструментального контроля за раскрытием межсвайных швов является одной из приоритетных задач при актуализации действующей нормативной документации в сфере мониторинга грунтовых плотин.

Выводы

1. Опыт монтажа КИА в скважины ГЦБ на примере Нижне-Бурейской ГЭС выявил ряд вопросов, требующих дополнительной проработки в части

номенклатуры КИА и способа её установки в ГЦБ скважины.

2. Действующая нормативная документация предусматривает контроль только фильтрационно-го состояния ГЦБД из БСС. Опыт натурных наблюдений за грунтовой плотинной с ГЦБД из БСС свидетельствует об особенностях формирования НДС в условиях эксплуатации, которые представляют интерес для дальнейшего изучения и учёта в нормативной документации методов контроля НДС.

3. При проектировании грунтовых плотин с ПФЭ в виде ГЦБ из БСС представляется необходимым предусматривать в составе КИА средства, позволяющие контролировать возможное раскрытие межсвайных швов.

Соблюдение этических норм

Конфликт интересов: От имени автора заявляю, что конфликта интересов нет.

Финансирование: Финансирование для проведения данного исследования получено не было.

Финансовые интересы: У автора нет соответствующих финансовых или нефинансовых интересов.

Нефинансовые интересы: Автор заявляет, что у него нет нефинансовых интересов.

Список литературы

1. *Федеральный закон* от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ “О безопасности гидротехнических сооружений” (с изменениями на 29.12.2022 г.).
2. *СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения*. Основные положения СНиП 33-01-2003. Официальный сайт Минстроя России www.minstroyrf.ru по состоянию на 27.03.2020.
3. *СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов*. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84* (с Изменениями № 1, 2, 3). — М.: Минрегион России, официальное издание, 2012.
4. *Гидротехнические сооружения (в двух частях)*. Ч. 1 / [М. М. Гришин и др.] — Под ред. Гришина М. М. — М.: Высш. школа, 1979. — 615 с.
5. *Радченко В. Г., Лопатина М. Г., Николайчук Е., Радченко С. В.* Опыт возведения противофильтрационных устройств из грунтоцементных смесей // *Гидротехническое строительство*. 2012. № 6. С. 46 – 54.
6. *СТО НОСТРОЙ 2.5.74-2012 Основания и фундаменты*. Устройство “стены в грунте”. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. — М.: Издательство “БСТ ООО”, 2014. — 76 с.
7. *Борзунов В. В., Денисов Г. В., Кадушкина Е. А., Николаева Е. А., Федоров А. В.* Опыт проектирования и строительства грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС с применением в качестве противофильтрационного устройства диафрагмы из буресекущихся свай ГЭС // *Гидротехническое строительство*. 2019. № 6. С. 2 – 11.
8. *Оришук Р. Н., Лабойко Р. Ю.* Оценка состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 10. С. 26 – 38.
9. *Лабойко Р. Ю., Воробьев К. М.* Напряжённо-деформированное состояние асфальтобетона и глиноцементобетона в качестве материала диафрагмы грунтовой плотины // *Гидротехническое строительство*. 2023. № 6. С. 20 – 27.
10. *Воробьев К. М., Лабойко Р. Ю.* Сравнительный анализ НДС противофильтрационных элементов плотин Гоцатлинской и Нижне-Бурейской ГЭС // *Водные пути и русловые процессы*. Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр. Вып. 5. Ч. 2 / под ред. проф. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. — С. 179 – 193.
11. *СТО НП “ИНВЭЛ” 70238424.27.140.035 – 2009*. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования / НП “ИНВЭЛ”. — М., 2009. — 64 с.
12. *Патент 2628447 Российская Федерация МПК E02B7/06* Способ контроля глиноцементобетонной диафрагмы в грунтовой плотине / Оришук Р. Н., Сольский С. В., Лопатина М. Г.; заяв. и патентообл. АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” — № 2016113003; заявл. 05.04.2016; опубл. 16.08.2017.
13. *Патент 2709040 Российская Федерация МПК E02B7/06* Способ контроля фильтрационного состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой / Оришук Р. Н., Сольский С. В., Лопатина М. Г.; заяв. и патентообл. АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” — № 2019109575; заявл. 01.04.2019; опубл. 13.12.2017.
14. *Патент 2678535 Российская Федерация МПК E02B7/06* Способ мониторинга состояния диафрагмы из буресекущихся глиноцементобетонных свай в грунтовой плотине методом электротомографии / Оришук Р. Н., Сольский С. В., Кондратенко П. В.; заяв. и патентообл. АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” — № 2018104597; заявл. 06.02.2018; опубл. 29.01.2019.