

УДК 624.138.24

*д.т.н. Рябичев В. Д.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР),
Лазебник А. Ю.,
Шарко А. А.
(АФГТ ЛГУ им. В. Даля, г. Антрацит, ЛНР, stgp_laz@mail.ru)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ЕЛИЗАВЕТИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА, КОНСОЛИДИРОВАННОЙ ГЛИНОЦЕМЕНТНЫМИ РАСТВОРАМИ

В статье приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния основания и тела грунтовой плотины Елизаветинского водохранилища при тампонаже вязко-пластичными растворами на основе глин и цемента. Получены закономерности распределения эквивалентных напряжений в основании и теле грунтовой дамбы. Выполнена геомеханическая оценка эффективности применения растворов в конкретных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: Елизаветинское водохранилище, грунтовая дамба, вязко-пластичные глиноцементные растворы, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование.

Елизаветинское водохранилище находится в Луганской Народной Республике между поселками Малониколаевка и Малая Юрьевка, расположено на реке Ольховой. Используется для водоснабжения городов Красный Луч, Антрацит, Алчевск. С учетом острой проблемы обеспечения питьевой водой регионов Луганской Народной Республики обеспечение эксплуатационного состояния водохранилища является задачей республиканского значения, особенно с учетом положений Программы развития Луганской Народной Республики до 2023 г. [1].

Эксплуатационное состояние водохранилища определяется многими инженерно-геологическими, техническими и технологическими факторами, среди которых следует выделить геологическое строение и рельеф основания, качество возведения дамбы, геологический и гранулометрический состав, наличие и величину фильтрационных утечек через тело дамбы и основание гидротехнического сооружения.

Состояние дамбы является одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационную безопасность водохранилища, поскольку нарушение ее устойчиво-

сти в результате изменения фильтрационных свойств может привести к значительному экологическому ущербу и нарушению водоснабжения городов и поселений региона.

В настоящее время разработано много способов упрочнения грунтовых дамб, среди которых одним из наиболее эффективных признан тампонаж глиноцементными растворами, позволяющий консолидировать разуплотненный грунт и устранить фильтрационные потоки через тело и основание дамбы гидротехнического сооружения [2]. Преимущество данного способа заключается в сравнительно невысокой стоимости, долговечности и возможности использования глинистого материала непосредственно или поблизости объекта тампонирувания. Однако практические рекомендации по выполнению тампонажа в конкретных условиях связаны с изменчивостью инженерно-геологической информации, состоянием тела дамбы и основания накопителя, а также варьированием в рецептуре тампонажного раствора его компонентов.

В связи с этим исследование напряженно-деформированного состояния закрепленного глиноцементными растворами

грунтовой плотины Елизаветинского водохранилища является актуальной научно-практической задачей, позволяющей оценить геомеханическую эффективность применения растворов в конкретных инженерно-геологических условиях.

Широкое распространение численных методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС), основанных на положениях теорий упругости, пластичности, механики сплошной среды и твердого деформируемого тела, позволяет выполнять анализ НДС практически во всех сферах инженерного дела, включая строительство и эксплуатацию гидротехнических сооружений. В последнее время анализ НДС гидротехнических сооружений выполнен в работах [3–8], однако в инженерно-геологических условиях Елизаветинского водохранилища с учетом изменения физико-механических свойств в результате тампонажа в открытой печати анализ НДС не выполнялся.

Обоснование применения конкретной рецептуры раствора для тампонажа разуплотненной зоны выполняется с использованием лабораторных, экономических и численных групп методов. В данной работе использован метод конечных элементов, который относится к группе численных [8]. С его помощью можно оценить эффективность применения растворов в конкретных условиях на основании анализа изополей эквивалентных напряжений [9].

Целью настоящей работы является численное исследование напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины Елизаветинского водохранилища, закрепленной глиноцементными растворами для оценки их геомеханической эффективности.

Объект исследования — геомеханические процессы в теле и основании грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища в зоне фильтрации.

Предмет исследования — закономерности изменения напряженно-деформированного состояния тела и осно-

вания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища, в особенности в зоне фильтрации.

Задачи исследования:

- выбор рецептур вязко-пластичных растворов для последующего исследования;
- создание численной модели тела и основания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища;
- моделирование свойств рецептур вязко-пластичных растворов в составе материалов грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища;
- определение закономерностей распределения эквивалентных напряжений тела и основания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища, в особенности в зоне фильтрации;
- геомеханическая оценка эффективности применения растворов в конкретных инженерно-геологических условиях.

По имеющимся геологическим данным [10, 11], строение дамбы и приповерхностной толщи горных пород (до глубины 17 м), в зависимости от рельефа поверхности, следующее:

- насыпные грунты, интервал залегания до 0,1 м;
- почвенно-растительный слой, интервал залегания 0,0–0,2 м;
- суглинок желто-бурый, местами глинистый; интервал залегания 0,2–9,0 м;
- дресва песчаника, алевролита, аргиллита (элювий коренных пород) — 9,0–17,0 м.

В геологическом строении пойменной части долины, по данным бурения разведочных скважин до глубины 15 м, участвуют каменноугольные породы, перекрытые элювиальными и элювиально-делювиальными отложениями и плейстоценовые аллювиально-делювиальные образования. Левый борт сложен делювиальными лессовидными суглинками, подстилаемыми каменноугольными породами. Правый склон долины сложен коренными каменноугольными породами.

Аллювиально-делювиальные отложения (ad_{IV}) залегают непосредственно под

почвенно-растительным слоем и насыпными (техногенными) грунтами. Представлены они суглинками темно-серого, голубовато-темно-серого цвета, водонасыщенными, вязкими, с примесью песка и плохо окатанного гравия и дресвы песчанников и алевролитов.

Аллювиально-делювиальные отложения зафиксированы скважинами, подошвы их залегают на глубине 6–8 м (отм. 147–148 м). С поверхности земли отложения перекрыты почвенно-растительным слоем 0,2 м.

Техногенные (насыпные) грунты (t_{iv}) — в месте примыкания поймы к правому борту дамбы и в месте ремонта плотины. Эти грунты залегают с поверхности земли до глубины 3 м. В районе правого борта грунты представляют собой щебень и дресву углистых, глинистых сланцев (аргиллитов), песчанников с глинистыми заполнителями [10].

Делювиальные (d_{III-IV}) отложения слагают левый (закрытый) склон долины реки в районе плотины. Залегают они практически с поверхности земли до отметки 149–152 м, где они подстилаются коренными породами [10]. Представлены отложения легкими суглинками твердой консистенции желтобурого и бурого цвета с включениями карбонатов в виде пленок и стяжений, а также дресвы и щебня пород (до 5–10 %). Мощность суглинков не превышает 8 м.

Элювиально-делювиальные (ed_{I-II}) отложения подстилают аллювиально-делювиальные суглинки и насыпные грунты. В пойменной части кровля отложений залегают на отметке 147–148 м, а в месте примыкания к правому борту их кровля уступообразно повышается до отметки 152–153 м [10, 11]. Представлены отложения легкими суглинками с примесью дресвы и щебня коренных пород (до 15–20 %) и являются продуктом выветривания коренных пород — аргиллитов и алевролитов. Суглинки имеют полутвердую консистенцию (местами до тугопластичной). Мощность слоя изменяется от 1,3–1,5 м. Общая мощность элювиально-делювиальных отложений составляет 3,5–9,2 м.

Коренные породы — каменноугольные (C_2^3) отложения, подстилают все вышеописанные образования повсеместно. Кровля их неровная и залегает на отметках 143–145 м (глубина от поверхности земли в пойменной части 10–12,2 м). Представлены они песчаниками и алевролитами желтовато-зеленоватого, серого и зеленовато-серого цвета с блестками слюды (мусковита). Породы крепкие (кern выходит столбиками высотой 10–15 см), трещиноватые. Массив коренных пород представлен переслаиванием пластов песчанников, аргиллитов и алевролитов, залегающих между собой «согласно», т. е. под одним углом, с сохранением ориентации плоскостей напластования. Толща коренных пород разбита трещинами тектонического происхождения (прямыми, параллельными, секущими массив в определенных направлениях) и разноориентированными трещинами выветривания. Кроме того, отмечаются трещины отдельности и напластования, разбивающие пласты пород наподобие кирпичной кладки. Тектонические трещины секут массив под углом 14–17° и 45°. Азимут простирания трещин, соответственно, равен 180° и 130°, наклон трещин ориентирован преимущественно на юг [10, 11].

Поперечное сечение тела и основания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища в зоне фильтрации и инженерно-геологические условия приведены на рисунке 1.

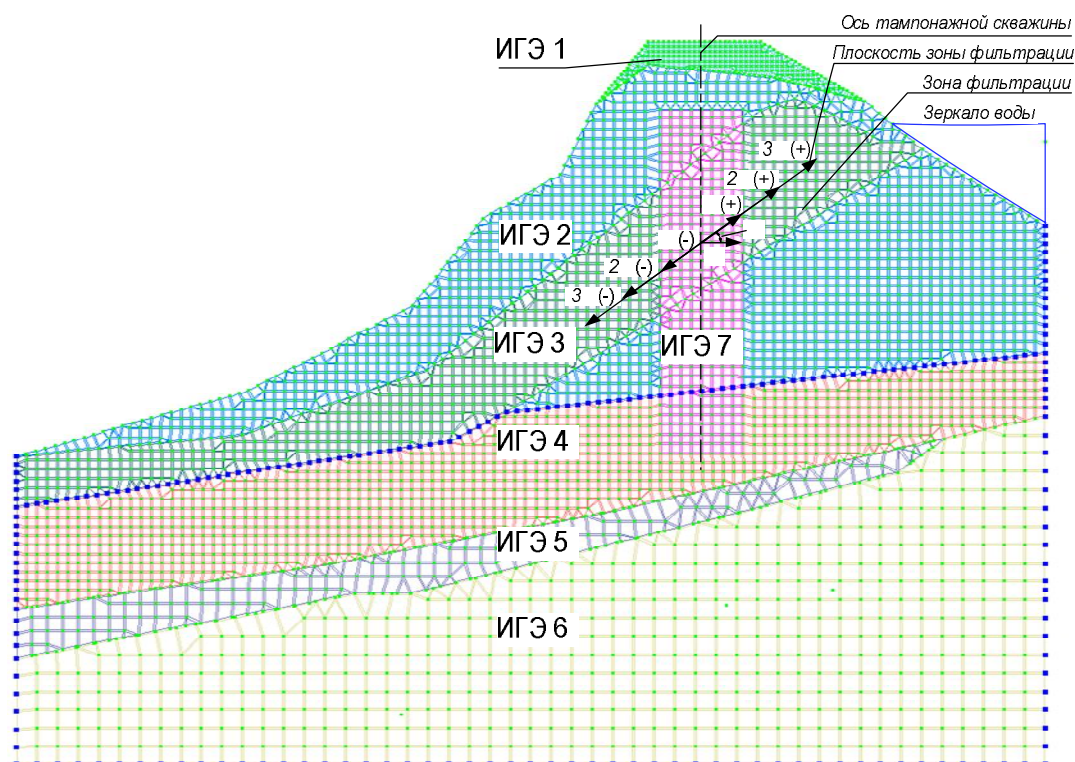
В районе гидроузла (южнее плотины) геофизическими исследованиями зафиксировано тектоническое нарушение ГДЗ СЗ-1. Азимут простирания сместителя равен 30°, то есть нарушение совпадает с простиранием одного из направлений тектонической трещиноватости [11].

Описание рецептур растворов и принципа их выбора. Выбор рецептур закрепляющих растворов осуществлялся на основании ГОСТ 26798.1-96. При обосновании выбора рецептур определялись такие параметры, как растекаемость, прочность на сжатие/растяжение, водоотделе-

ние. Растворы, удовлетворяемые требованиям ГОСТ, оценивались экономическими методами, при этом выбраны наиболее конкурентоспособные варианты растворов ТР1–ТР4, характеристики которых, а также физико-механические характеристики грунтов, слагающих тело дамбы и ее основания, приведены в таблице 1.

Для выполнения численного моделирования использовался программный комплекс «Лира» версии 9.6. При проведении численного эксперимента применялись треугольные, прямоугольные и квадратные конечные элементы деформации грунтов. Модель характеризуется следующими параметрами: длина по горизонтальной оси (x) — 22,87 м, высота (z) — 18,00 м; ширина (y) — 50,00 м. Признак схемы — шесть степеней свободы. Шаг триангуляции сетки КЭ — $0,33 \times 0,33$ м для ИГЭ 5 и 6, $0,08 \times 0,08$ м для ИГЭ 2, 3, 4 и 7, $0,03 \times 0,03$ м для ИГЭ 1, что

обусловлено интересом к исследованию НДС основания и дамбы, в то время как распределение напряжений вглубь грунтового массива для данной задачи менее значимо. Нагрузка от веса воды задавалась равной $0,01$ МН/м². Граничные условия — связи по всем направлениям для левой, правой и нижней границ модели, связи по осям x , y и запрет поворотов вокруг осей x , y , z для нижней границы ИГЭ-2. Поскольку процесс разуплотнения грунта методом конечных элементов смоделировать не представляется возможным, были выбраны наиболее характерные геомеханические ситуации, которые необходимо исследовать, а именно: исходное состояние грунтовой дамбы (рис. 2, а), этап фильтрации с образованием зоны разуплотнения (рис. 2, б) и закрепление ослабленной зоны цементно-глинистыми тампонажными растворами (рис. 2, в–е).



R — радиус растекания тампонажного раствора; R_r — проекция радиуса растекания тампонажного раствора на плоскость фильтрации; α — угол наклона к горизонтали плоскости зоны фильтрации

Рисунок 1 Аппроксимация конечными элементами численной модели поперечного сечения тела и основания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища в зоне фильтрации и область анализа НДС

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов модели

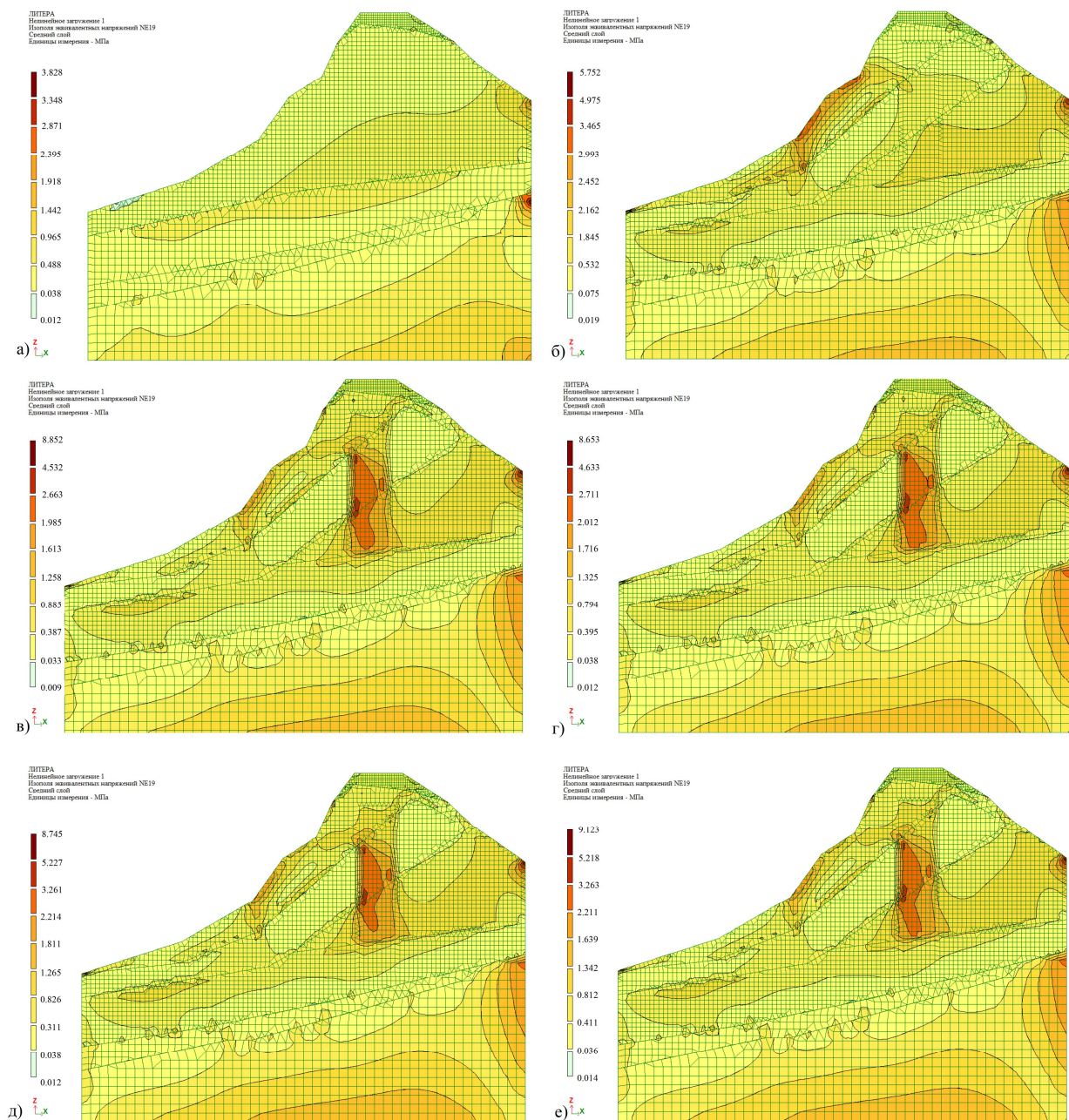
№ п.п.	Номер слоя	Наименование инженерно-геологических элементов	Модуль упругости, E_y , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Удельный вес, γ , кН/м ³	Сцепление, C , кПа	Угол внутреннего трения, φ , град	Модуль деформации, E_1 , МПа
1	ЕГЭ 1	насыпной грунт	135,0	0,28	19,6	20	38	18,00
2	ЕГЭ 2	аллювиально-делювиальные отложения (ad_{IV})	140,00	0,35	19,0	30	38	19,00
3	ЕГЭ 3	делювиальные отложения (d_{III-IV})	150,00	0,35	19,2	31	15	20,00
4	ЕГЭ 4	элювиально-делювиальные отложения (ed_{I-II})	150,00	0,34	17,6	30	14	20,00
5	ЕГЭ 5	коренные породы	12 000,00	0,33	27,0	23 300	33	1 600,00
6	ЕГЭ 6	разуплотнённые грунты	14,70	0,42	15,0	10	15	1,98
7	ЕГЭ 7.1	закрепляющий раствор (ТР1)	187,00	0,27	21,0	34	25	24,90
8	ЕГЭ 7.2	закрепляющий раствор (ТР2)	177,75	0,26	22,4	42	22	23,70
9	ЕГЭ 7.3	закрепляющий раствор (ТР3)	191,25	0,26	21,7	37	26	25,50
10	ЕГЭ 7.4	закрепляющий раствор (ТР4)	181,00	0,28	20,3	38	24	24,12

Для моделирования применялось нелинейное нагружение грунтового массива с использованием шагово-итерационного метода. Минимальное число итераций — 300, количество шагов — 25, значение коэффициента к нагрузке по шагам — 0,04; использовались равномерные шаги с суммарным коэффициентом 0,99.

Также задавалось динамическое воздействие от удара волн по дамбе с коэффициентом неупругого основания, равным 0,1, и частотой внешнего воздействия 0,05 рад./с, а также изменение уровня воды.

Для определения главных и эквивалентных напряжений использовался расчетный процессор «Ли́ра», в котором была выбрана теория прочности Кулона — Мора для грунтов.

В исходных инженерно-геологических условиях максимальные значения эквивалентных напряжений составляют 3,83 МПа и локализуются в зоне контакта элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5), что обусловлено значительным различием деформационно-прочностных характеристик этих материалов. Экстремальные значения эквивалентных напряжений 2,39–2,87 МПа локализуются также в зоне, где вертикальная составляющая давления воды является максимальной для исследуемой области модели. В области перспективного образования фильтрационной зоны исходные значения эквивалентных напряжений составляют 0,04–0,96 МПа.



а — исходные ИГУ; б — образование зоны фильтрации;
в, г, д, е — закрепление растворами TR1, TR2, TR3 и TR4 соответственно

Рисунок 2 Изополя эквивалентных напряжений σ_E (МПа) в поперечном сечении тела и основания грунтовой дамбы Елизаветинского водохранилища в зоне фильтрации

При образовании зоны фильтрации, которая в модели задавалась как область со сниженными на 40 % прочностными свойствами, образуются три зоны экстремальных значений эквивалентных напряжений. Первая зона, как и в исходной модели, локализуется в зоне контакта элювиально-

делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5). Эквивалентные напряжения составляют 2,45–3,34 МПа. Вторая зона располагается в области максимального значения вертикальной составляющей давления воды. Эквивалентные напряжения в ней составляют 2,48–2,99 МПа.

Третья зона локализована на склоне элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 2) в слое грунта выше слоя с фильтрацией. Эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 3,26–4,87 МПа и обусловлены как рельефом местности, так и различием деформационно-прочностных характеристик материалов зоны фильтрации и грунта, расположенного выше. В зоне фильтрации эквивалентные напряжения составляют 0,34–1,85 МПа.

При инъецировании в зону фильтрации глиноцементного тампонажного раствора ТР1 (ИГЭ 7.1) выделяются четыре зоны экстремальных значений. Первая зона локализуется в области контакта элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5). Эквивалентные напряжения составляют 2,66–4,53 МПа. Вторая зона располагается в области максимального значения вертикальной составляющей давления воды. Эквивалентные напряжения в ней составляют 2,86–4,61 МПа. Третья зона локализована на склоне элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 2) в слое грунта выше слоя с фильтрацией. Эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 1,63–1,98 МПа и обусловлены как рельефом местности, так и различием деформационно-прочностных характеристик материалов зоны фильтрации и грунта, расположенного выше. В зоне фильтрации эквивалентные напряжения составляют 0,06–8,85 МПа. Максимальные значения напряжений локализованы в зоне контакта тампонажного раствора ТР1 (ИГЭ 7.1) с грунтом зоны фильтрации (ИГЭ 3).

В модели при закреплении разуплотненного грунта инъекционным раствором ТР2 (ИГЭ 7.1) также выделяются четыре зоны экстремальных значений эквивалентных напряжений. Первая зона локализуется в области контакта элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5). Эквивалентные напряжения составляют 2,75–4,63 МПа. Вторая зона располагается в области максимального значения вертикальной составляющей дав-

ления воды. Эквивалентные напряжения в ней составляют 3,68–6,72 МПа. Третья зона локализована на склоне элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 2) в слое грунта выше слоя с фильтрацией. Эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 1,73–2,01 МПа. В зоне фильтрации эквивалентные напряжения составляют 0,04–8,65 МПа. Максимальные значения локализованы в зоне контакта тампонажного раствора ТР2 (ИГЭ 7.2) с грунтом зоны фильтрации (ИГЭ 3).

При закреплении инъекционным раствором ТР3 (ИГЭ 7.3) также выделяются четыре зоны экстремальных значений эквивалентных напряжений. Первая зона локализуется в области контакта элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5). Эквивалентные напряжения составляют 2,21–4,58 МПа. Вторая зона располагается в области максимального значения вертикальной составляющей давления воды. Эквивалентные напряжения в ней составляют 3,34–6,61 МПа. Третья зона локализована на склоне элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 2) в слое грунта выше слоя с фильтрацией. Эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 1,81–2,21 МПа. В зоне фильтрации эквивалентные напряжения составляют 0,05–8,74 МПа. Максимальные значения локализованы в зоне контакта тампонажного раствора ТР2 (ИГЭ 7.3) с грунтом зоны фильтрации (ИГЭ 3).

При инъецировании глиноцементного раствора ТР4 (ИГЭ 7.4) выделяются также четыре зоны экстремальных значений. Первая зона локализуется в области контакта элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 4) и коренных пород (ИГЭ 5). Эквивалентные напряжения составляют 2,89–4,64 МПа. Вторая зона располагается в области максимального значения вертикальной составляющей давления воды. Эквивалентные напряжения в ней составляют 2,86–4,61 МПа. Третья зона локализована на склоне элювиально-делювиальных отложений (ИГЭ 2) в слое грунта выше слоя с

фильтрацией. Напряжения σ_E в этой зоне составляют 1,58–2,21 МПа. В зоне фильтрации эквивалентные напряжения составляют 0,05–9,12 МПа. Максимальные значения напряжений локализованы в зоне контакта тампонажного раствора ТР4 (ИГЭ 7.4) с грунтом зоны фильтрации (ИГЭ 3).

Значения напряжений в плоскости зоны фильтрации приведены на рисунке 3.

Оценку геомеханической эффективности применения растворов в конкретных инженерно-геологических условиях выполним путем анализа зоны фильтрации в окрестности инъецирования тампонажного раствора на расстоянии $2R_i$ и $3R_i$. Исключение из анализа тампонажной скважины, а также элементов на расстоянии R_i в плоскости зоны фильтрации обусловлено необходимостью исследовать изменение в напряженном состоянии грунта именно зоны фильтрации, т. к. зона контакта ИГЭ 7 с ИГЭ 2, 3 и 4 является областью экстремальных значений напряжений в силу различия физико-механических свойств грунтов и инъецированного раствора.

В исходных инженерно-геологических условиях в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,32 и 0,15 МПа, а в точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,24 и 0,41 МПа.

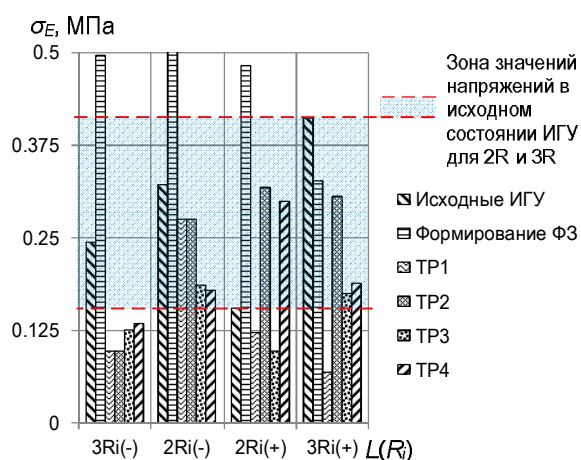


Рисунок 3 Эквивалентные напряжения σ_E (МПа) в плоскости зоны фильтрации

При образовании зоны фильтрации значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ составляют соответственно 0,52 и 0,48 МПа. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,49 и 0,32 МПа.

При инъецировании тампонажного раствора ТР1 значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ составляют соответственно 0,27 и 0,12 МПа. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,10 и 0,07 МПа.

При инъецировании тампонажного раствора ТР2 значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ составляют соответственно 0,27 и 0,32 МПа. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,10 и 0,31 МПа.

Значения эквивалентных напряжений при инъецировании тампонажного раствора ТР3 в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ составляют соответственно 0,18 и 0,10 МПа. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,13 и 0,17 МПа.

Эквивалентные напряжения при инъецировании тампонажного раствора ТР4 в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ составляют соответственно 0,18 и 0,30 МПа. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения составляют соответственно 0,13 и 0,19 МПа.

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Появление зоны фильтрации в теле дамбы водохранилища вызывает перераспределение напряжений в грунте. Эквивалентные напряжения изменяются на 38,46 % и 68,75 % в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ соответственно относительно исходных значений в состоянии равновесия грунтового массива. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения изменяются на 51,02 % и 28,13 % соответственно.

2. Максимальные значения эквивалентных напряжений в основном концентрируются вокруг зоны фильтрации, что обусловлено различными деформационно-

прочностными свойствами вмещающего грунтового массива.

3. Инъектирование тампонажного раствора ТР1 изменяет значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ соответственно на 15,63 % и 20,00 % относительно исходных значений в отсутствие зоны фильтрации. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения изменяются на 58,33 % и 82,93 % соответственно в сторону уменьшения.

4. Применение глиноцементного раствора ТР2 изменяет значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ соответственно на 15,63 % и 113,33 % относительно исходных значений в отсутствие зоны фильтрации. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения изменяются на 58,33 % и 24,39 % соответственно в сторону уменьшения.

5. Консолидация грунта при помощи раствора ТР3 изменяет значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ соответственно на 43,75 % и 33,33 % относительно исходных значений. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения изменяются на 45,83 % и 58,54 % соответственно в сторону уменьшения.

6. Использование инъекционного раствора ТР4 изменяет значения эквивалентных напряжений в точках $2R_i(-)$ и $2R_i(+)$ соответственно на 43,75 % и 100,00 % относительно исходных значений. В точках $3R_i(-)$ и $3R_i(+)$ эквивалентные напряжения изменяются в сторону уменьшения на 45,83 % и 53,66 % соответственно.

7. Таким образом инъектирование в разуплотненный грунт глиноцементных растворов позволяет уменьшить значения эквивалентных напряжений по сравнению с исходными инженерно-геологическими условиями минимум на 15 %, т. е. привести грунтовый массив в состояние равновесия.

8. Наиболее эффективным является применение раствора ТР4. Значения эквивалентных напряжений при использовании ТР4 снижаются в среднем на 61 % по сравнению с исходными. Применение растворов ТР1 и ТР3 позволяет снизить эквивалентные напряжения более чем на 44 %, а использование ТР2 — практически на 53 %.

Направления дальнейших исследований заключаются в установлении зависимости фильтрационных свойств грунтов и тампонажных растворов с параметрами напряженно-деформированного состояния.

Библиографический список

1. Наш выбор: Программа развития Луганской Народной Республики до 2023 года // Информационный бюллетень общественного движения «Мир Луганщине». — Луганск, 2018. — 36 с.
2. Полозов, Ю. А. Гидроизоляция и укрепление несвязных грунтов гидротехнических сооружений методом тампонажа [Текст] / Ю. А. Полозов, А. Ю. Лазебник // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2018. — № 11 (54). — С. 22–27.
3. Саинов, М. П. Влияние напряжённого состояния каменно-земляной плотины на устойчивость её откосов [Текст] / М. П. Саинов, Д. С. Гапеев, Г. М. Кудрвцев // Науковедение : интернет-журнал. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1–17.
4. Барышников, В. Д. Контроль напряженно-деформированного состояния бетонных плотин в эксплуатационный период [Текст] / В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова // ИГД СО РАН. — Новосибирск, 2009. — Т. 2. — С. 242–247.
5. Абдыгазиев, К. К. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость грунтовой плотины с асфальтобетонным экраном [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.07 / Абдыгазиев Калысбек Канымегович. — Бишкек, 1998. — 146 с. : ил.
6. Мирсаидов, М. М. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом нелинейного деформирования материала и конечных деформаций [Текст] / М. М. Мирсаидов, Т. З. Султанов // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 5. — С. 73–82.

7. Саинов, М. П. Анализ напряженно-деформированного состояния комбинированной плотины Нью-Эксчекваер при статических нагрузках [Текст] / М. П. Саинов, А. А. Федотов // Вестник МГСУ, 2015. — № 2. — С. 141–152.

8. Саинов, М. П. Напряженно-деформированное состояние грунтовых плотин с противофильтрационными устройствами из материалов на основе цемента [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.07 / Саинов Михаил Петрович. — М., 2020. — 508 с. : ил.

9. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84 : [утв. Министерством регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 29.12. 2011 N 635/18]. — М., 2012. — 86 с.

10. Инженерно-геологические изыскания в районе плотины Елизаветинского водохранилища : отчет / ПГП «Артемовская гидрогеологическая партия» LTD. — Донецк, 2010. — 28 с.

11. Результаты геофизических исследований методом вертикального электрического зондирования водосливной дамбы Елизаветинского водохранилища / ООО «Укрнтэк-экогеодинамика». — Донецк, 2010. — 47 с.

© Рябичев В. Д.

© Лазебник А. Ю.

© Шарко А. А.

*Рекомендована к печати, к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Смекалиным Е. С.,
к.т.н., доц. каф. СиГ АФГТ ЛГУ им. В. Даля Дудкой И. В.*

Статья поступила в редакцию 06.12.2022.

Doctor of Technical Sciences Riabichev V. D. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR),
Lazebnik A. Yu., Sharko A. A. (ADMT of LNU named after V. Dahl, Anthracite, LPR,
stgp_laz@mail.ru)

STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE EMBANKMENT DAM OF THE ELIZABETHAN RESERVOIR, CONSOLIDATED CLAY-CEMENT SOLUTIONS

The article is devoted to analyze the results on the numerical simulation of stress-strain state of the base and body of the embankment dam of Elizabethan reservoir with claggy-plastic solutions based on clay and cement. The patterns of distribution of equivalent stresses in the base and body of the ground dam are obtained. A geomechanical assessment of the efficiency of solution application under specific geological and technical conditions was completed.

Key words: Elizabethan reservoir, ground dam, claggy-plastic clay-cement solutions, stress-strain state, numerical simulation.