

*к.т.н. Палейчук Н. Н.,  
Рыжикова О. А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОНАКОПИТЕЛЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЗОНЫ ДЕКОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТА

*Приведены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния тела дамбы и основания гидронакопителя в условиях образования локального участка деконсолидированного грунта и канала гидроразрыва. При помощи метода конечных элементов обосновано применение глиноцементного раствора в соответствующих инженерно-геологических условиях для тампонажа разуплотненной зоны грунта.*

**Ключевые слова:** гидронакопитель, дамба, зона деконсолидации, напряженно-деформированное состояние, глиноцементный раствор, тампонаж.

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Гидротехнические сооружения (ГТС) являются объектами, непосредственно обеспечивающими технологические процессы предприятий горнодобывающей и смежных отраслей промышленности. В Украине эксплуатируются более 500 таких сооружений, как накопители, отстойники, шламохранилища, гидроотвалы, различающиеся по классу ответственности, емкости, высоте, протяженности, рельефу основания, способу возведения и другим признакам. Нарушение устойчивости дамб ГТС может привести к значительному экономическому и экологическому ущербу, связанному с утечками загрязненных вод, которые, как правило, обнаруживаются уже в период эксплуатации гидротехнического сооружения.

Анализ статистических данных показывает, что более 75% аварий на грунтовых гидронакопителях связаны с возникновением локальных, активно развивающихся фильтрационных потоков через тело и основание дамбы, в связи с чем изменяется гидрогеологический режим накопителя [1, 2].

В качестве способа повышения устойчивости и ликвидации аварийных ситуаций на объектах ГТС применяется глиноцементный тампонаж [3-5]. Преимущество

данного способа заключается в сравнительно невысокой стоимости, долговечности и возможности использования глинистого материала непосредственно или вблизи 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. Поэтому использование глиноцементного тампонажного раствора на конкретном объекте требует соответствующего обоснования.

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является исследование напряженно-деформированного состояния тела дамбы и основания гидронакопителя, а также обоснование применения глиноцементного тампонажного раствора с соответствующими деформационно-прочностными характеристиками при закреплении деконсолидированной зоны.

**Основной материал исследования.** Для обоснованного выбора того или иного варианта физико-механических свойств тампонажного раствора в данной работе используется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет оценить напряженно-деформированное состояние

## БУДІВНИЦТВО

(НДС) грунтов, горних пород и тампонажного раствора, что необходимо для прогнозирования сценариев развития аварийных ситуаций на ГТС.

Для выполнения численного моделирования использовался программный комплекс «Ли́ра» версии 9.6 с 64-х разрядной архитектурой. При проведении численного эксперимента применялись конечные элементы деформации грунтов — КЭ 281, 282, 284. Модель характеризуется следующими параметрами: длина по горизонтальной оси ( $x$ ) — 95.70 м, высота ( $z$ ) — 22.70 м; ширина дамбы в основании  $L=15.50$  м; ширина дамбы в верхней части  $L_1=5.65$  м; высота дамбы  $h=11.95$  м; углы наклона образующей поверхности тела дамбы  $\alpha$  и  $\beta$  — соответственно  $68^\circ$  и  $67^\circ$ ; угол наклона основания гидронакопителя

$\delta$  относительно горизонтальной оси  $x$  составляет  $10^\circ$ . Ширина зеркала воды по оси  $x$  — 63.55 м. Признак схемы — шесть степеней свободы.

Расчетная схема модели представлена на рисунке 1.

Деформационно-прочностные и физико-механические свойства материалов модели приведены в таблице 1.

В модели приняты следующие материалы: известняк (ИГЭ1), суглинок (ИГЭ2), разуплотненный суглинок (ИГЭ3) и глиноцементный тампонажный раствор (ИГЭ4).

Для моделирования применялось нелинейное нагружение грунтового массива с использованием шагово-итерационного метода.

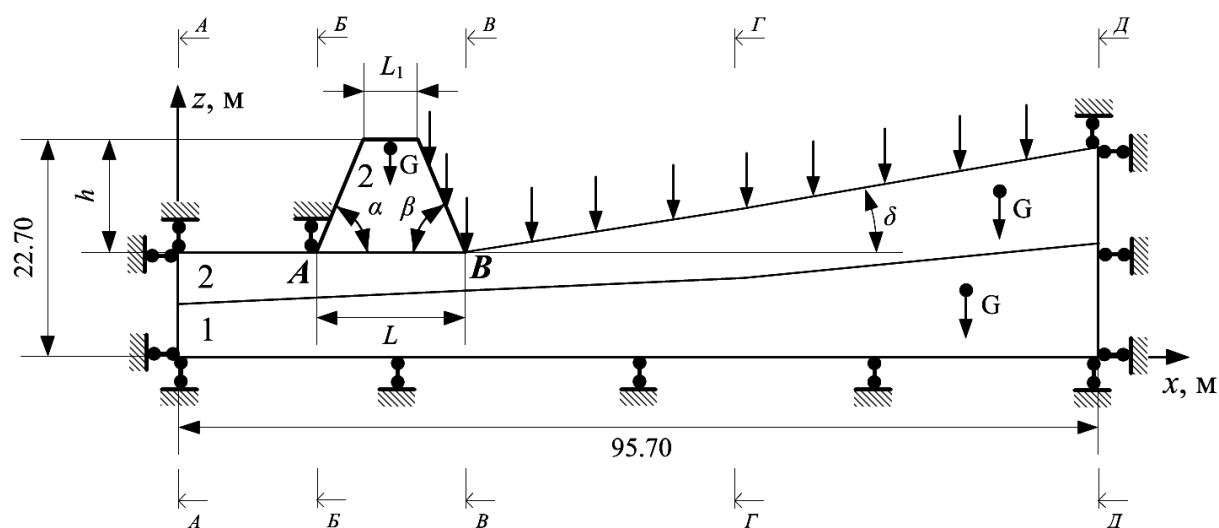


Рисунок 1 — Схема к исследованию НДС тела дамбы и основания гидронакопителя:  
1 — ИГЭ-1 (известняк), 2 — ИГЭ-2 (суглинок)

Таблица 1 — Физико-механические свойства материалов модели

№ ИГЭ	$E$ , МПа	$\nu$	$H$ , м	$\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	$C$ , МПа	$R_t$ , МПа	$\varphi$ , град	$k_e$
1 (ИГЭ1)	$17,4 \times 10^3$	0,17	0,10	$2,66 \times 10^{-3}$	23,5800	12,6000	33	3
2 (ИГЭ2)	14,71	0,35	0,10	$1,96 \times 10^{-3}$	0,0049	0,0005	16	3
3 (ИГЭ3)	12,85	0,40	0,10	$1,50 \times 10^{-3}$	0,0035	0,0002	16	3
4 (ИГЭ4)	24,51	0,27	0,10	$2,10 \times 10^{-3}$	0,0340	0,0035	25	3

Шаг триангуляции сетки КЭ —  $10.00 \times 10.00$  м для ИГЭ1,  $1.00 \times 1.00$  м для ИГЭ2,  $0.25 \times 0.25$  м для дамбы и  $0.10 \times 0.10$  м для зоны разуплотнения, что обусловлено интересом к исследованию НДС основания и дамбы, в то время как распределение напряжений вглубь породного массива для данной задачи менее значимо. Нагрузка от веса воды задавалась равной  $0.01 \text{ МН/м}^2$ . Граничные условия — связи по всем направлениям.

Здесь обозначены:  $E$  — модуль деформации грунта по ветви первичного нагружения;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $H$  — расчетная толщина элемента;  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $k_e$  — коэффициент перехода к модулю деформации грунта по ветви вторичного нагружения  $E_e = k_e E$ ;  $C$  — структурное сцепление;  $R_t$  — предельное напряжение при растяжении;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

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), начальный этап фильтрации с образованием зоны разуплотнения (рис. 2, б), обнажение

деконсолидированной зоны на одном из бортов дамбы (рис. 2, в), образование в зоне деконсолидации грунта полости гидрорасчленения (рис. 2, г) и закрепление ослабленной зоны глиноцементным тампонажным раствором (рис. 2, д).

Геометрические параметры и формы зоны разуплотнения и канала гидроразрыва приняты в соответствии с рекомендациями по созданию модели процесса тампонажа деконсолидированного грунта вязкопластичными растворами [4, 5], а также исходя из фактических данных о мощности деконсолидированной зоны в различных грунтах [1-5]. На завершающей стадии численного эксперимента наличие в канале гидроразрыва (рис. 2, г) тампонажного раствора моделировалось заданием данной области модели сниженных деформационно-прочностных характеристик. Так, в частности, модуль деформации принимался равным  $19,6 \text{ МПа}$ , что соответствует коэффициенту снижения модуля  $k=0,8$ , а коэффициент Пуассона брался со значением  $0,32$ . Данный прием позволяет смоделировать обстоятельство, когда полость заполняется материалом, что является необходимым условием для адекватного описания контактных условий в механике сплошной среды [6, 7].

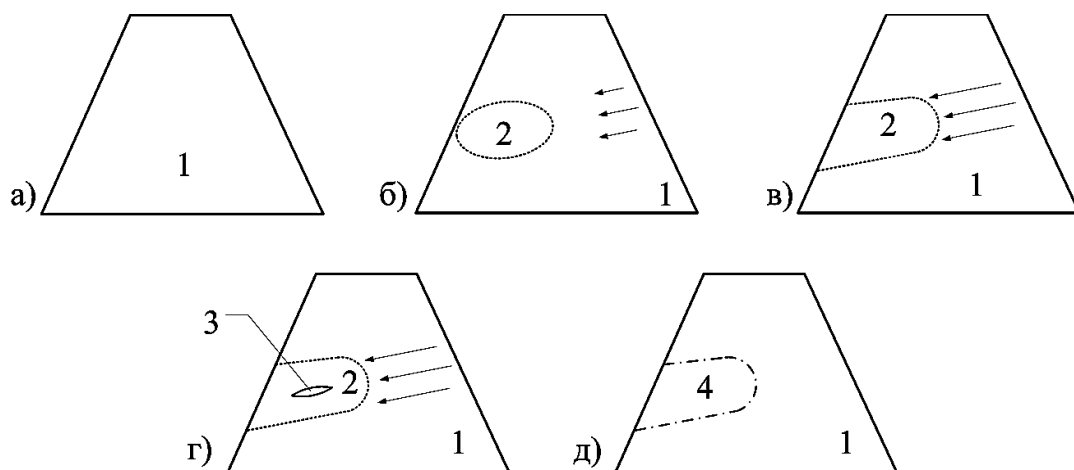


Рисунок 2 — Этапы моделирования: а — начальный этап эксплуатации дамбы, б — начальный этап фильтрации (образование зоны деконсолидации грунта), в — развитие разуплотненной зоны, г — образование канала гидроразрыва, д — закрепление грунта, 1 — исходное состояние грунта, 2 — деконсолидированный грунт, 3 — полость гидрорасчленения, 4 — закрепленный грунт, ← — направление фильтрации.

## БУДІВНИЦТВО

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

Анализ характера изополей напряжений

выполним на примере эквивалентных напряжений  $\sigma_E$ , распределение которых представлено на рисунке 3.

Значения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений всех видов приведена в таблице 2.

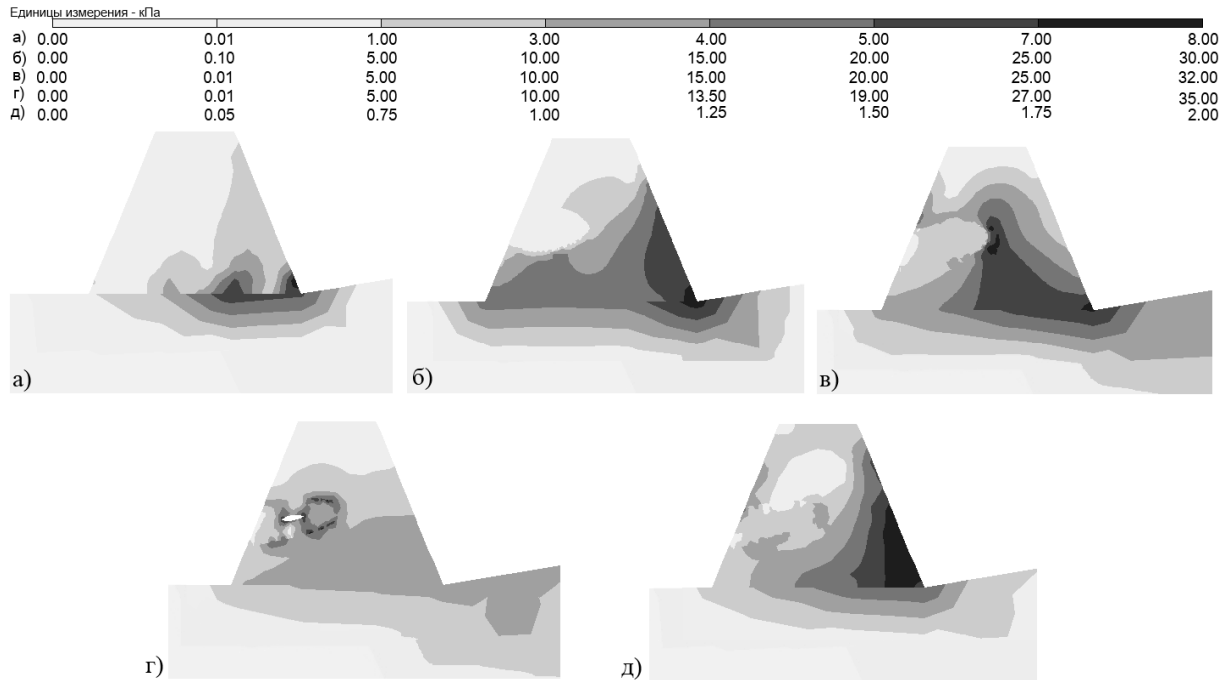


Рисунок 3 — Распределение изополей эквивалентных напряжений  $\sigma_E$  в теле и основании дамбы гидронакопителя: а — начальный этап эксплуатации, б — начальный этап фильтрации, в — развитие зоны деконсолидации, г — образование канала гидроразрыва, д — закрепление грунта

Таблица 2 — Распределение максимальных величин напряжений в конфигурациях модели

Этапы моделирования (конфигурация)	Наибольшие значения напряжений, кПа										
	сжимающих					растягивающих					
	$\sigma_x$	$\sigma_z$	$\tau_{xz}$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_x$	$\sigma_z$	$\tau_{xz}$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_E$
Исходное состояние	6,0	9,0	4,0	4,0	12,0	4,0	0,1	6,0	6,0	0,0	8,0
Начальная стадия разуплотнения	6,0	9,0	4,0	4,1	64,0	5,0	0,0	6,0	4,5	1,0	30,0
Развитие зоны деконсолидации	9,0	10,0	7,0	15,0	65,0	5,0	7,0	7,0	5,0	5,0	32,0
Образование канала гидроразрыва	36,0	38,0	7,0	15,0	67,5	24,0	18,0	7,0	5,0	5,0	35,0
После закрепления глиноцементным раствором	5,0	20,0	10,0	2,0	5,0	1,0	0,0	13,0	2,0	5,0	2,0

Анализ распределения изополей эквивалентных напряжений в исходном состоянии (рис. 3, а) показал следующее: в правой части основания дамбы действуют максимальные эквивалентные усилия численно равные 8 кПа в точке *B*, уменьшаясь до значения 1 кПа в точке *A*. По мере изменения расстояния от характерных точек до исследуемой области тела дамбы имеются возмущения напряжений  $\sigma_E$ . Возмущения достигают величин 4,45-6,75 кПа на расстоянии соответственно  $0,6L$  и  $0,3L$  от точки *B*, что обусловлено влиянием горизонтальной составляющей нагрузки, задаваемой весом воды.

Весьма характерно наличие краевого эффекта в точке *B*. Это объясняется тем, что внешняя нагрузка на тело дамбы и основание отстойника была приложена только со стороны точки *B*. Характер распределения эквивалентных напряжений аналогичен конфигурации горизонтальных  $\sigma_x$  и вертикальных  $\sigma_z$  усилий, что является следствием отсутствия внешней нагрузки, прежде всего — горизонтальной, на боковых границах модели.

Конфигурация эквивалентных напряжений в начальной стадии разуплотнения грунта (рис. 3, б), как и в исходном состоянии, обусловлена влиянием вертикальных напряжений и в соответствии с принятой теорией прочности Кулона-Мора — главных усилий  $\sigma_3$ . Максимальные значения  $\sigma_E$  увеличились до 30 кПа (в исходном состоянии  $\sigma_{E\max} = 8$  кПа) и сосредоточились вокруг точки *B*. Как и в случае с главными усилиями  $\sigma_3$ , распространение эквивалентных напряжений в тело дамбы обусловлено наличием ослабленной зоны.

При анализе распределения изополей эквивалентных напряжений в стадии развития зоны деконсолидации грунта в теле дамбы гидронакопителя (рис. 3, в) четко выделяются две зоны максимумов. Первая, как и в предыдущих конфигурациях модели, сосредоточена в окрестности точки *B*, а вторая располагается в центральной части тела дамбы и обусловлена влиянием локально ослабленного участка грунтового

массива. Наибольшие значения эквивалентных напряжений  $\sigma_E$  составляют 32 кПа. Эта величина на 2 кПа выше, чем при образовании разуплотненной зоны и в 4 раза больше, чем в исходном состоянии.

Максимальные значения эквивалентных напряжений при образовании канала гидроразрыва составляют 35 кПа, что более чем в 4 раза превышает наибольшие значения  $\sigma_E$  в исходном состоянии, на 5 кПа больше, чем в начальной стадии разуплотнения и на 3 кПа больше, чем при развитии зоны разуплотнения. Конфигурация изополей эквивалентных напряжений аналогична форме усилий  $\sigma_3$  и  $\sigma_z$ , но с распространением значений до 10 кПа в основание отстойника на расстояние  $1,9L$  от точки *B* (рис. 3, г).

Наибольшие эквивалентные напряжения после закрепления глиноцементным раствором деконсолидированной зоны составляют 2 кПа, что в 4 раза меньше усилий  $\sigma_E$  в исходном состоянии, на 28 кПа меньше напряжений в начальной стадии разуплотнения, на 30 кПа меньше, чем  $\sigma_E$  при развитии зоны разуплотнения грунта и на 33 кПа меньше эквивалентных усилий при образовании канала гидроразрыва. Конфигурация изополей  $\sigma_E$  эквивалентна распределению главных напряжений  $\sigma_3$ , а максимальные усилия  $\sigma_E$  наблюдаются в окрестности точки *B* на боковой поверхности тела дамбы (рис. 3, д).

Как следует из таблицы 2 и рисунка 3, наличие в теле дамбы канала гидроразрыва приводит к значительному возмущению напряжений и их увеличению. Применение глиноцементного раствора в качестве материала для заполнения пустот и связывания деконсолидированного дисперсного грунта способствует стабилизации напряженного состояния при увеличении вертикальных и касательных напряжений.

Исходя из результатов, представленных в таблице 2, наибольшая зона влияния дамбы наблюдается у модели при образовании канала гидроразрыва (рис. 3, г). При этом напряжения, по которым влияние

дамбы на массив оказалось максимальным, являются вертикальными  $\sigma_z$ .

Таким образом, использование тампонажного глиноцементного раствора с приведенными в таблице 1 деформационно-прочностными характеристиками позволит повысить надежность грунтовой дамбы и снизить горизонтальные, главные и эквивалентные напряжения на 30-50% по сравнению с исходным состоянием.

#### Выводы и направление дальнейших исследований.

Анализ распределения напряжений в теле дамбы и основании гидронакопителя показал следующее:

1. Наличие в теле дамбы зоны деконсолидации грунта вызывает перераспределение напряжений в грунтовом массиве и их увеличение. Максимальные значения горизонтальных, касательных сжимающих и эквивалентных напряжений концентрируются вокруг разуплотненной области, что

обусловлено различием деформационно-прочностных свойств. По сравнению с исходным состоянием наибольшие значения напряжений увеличились:  $\sigma_x$  на 30%,  $\sigma_z$  на 12%,  $\tau_{xz}$  на 75%,  $\sigma_1$  — более чем в 3,5 раза,  $\sigma_3$  — в 5 раз,  $\sigma_E$  — в 4 раза.

2. С образованием канала гидроразрыва в разуплотненной зоне напряжения  $\sigma_E$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_z$  возрастают более чем в 4 раза,  $\sigma_x$  и  $\sigma_3$  — более чем в 5,5 раз, а  $\tau_{xz}$  — на 75%.

3. Нагнетание глиноцементного раствора способствует стабилизации напряженного состояния. После тампонажа разуплотненной зоны напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  и  $\sigma_E$  стали меньше, чем в исходном состоянии на 30-50%.

4. Использование глиноцементного раствора с приведенными характеристиками позволит повысить надежность грунтовой дамбы и обеспечить безопасность эксплуатации гидронакопителя.

#### Библиографический список

1. Костюков Е. В. Исследование физического состояния и оценка устойчивости грунтовых дамб гидротехнических сооружений горных предприятий геоэлектрическим методом: дис. канд. техн. наук : 25.00.16 / Е. В. Костюков. — Кемерово, 2005. — 147с.
2. Бахаева С. П. Оценка состояния и прогноз устойчивости техногенных грунтовых массивов угольных разрезов на основе комплексного мониторинга: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук : спец. 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» / С. П. Бахаева. — Кемерово, 2008. — 17с.
3. Кирияк К. К. Моделирование оползневого склона методом конечных элементов / К. К. Кирияк // сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — Вып. 35. — С. 257–266.
4. Новые технические решения при строительстве выработок, тампонаже и закреплении горных пород : монография / [под общ. ред. Должикова П. Н., Рябичева В. Д.]. — Донецк: Норд-Пресс, 2006. — 256с.
5. Должиков П. Н. Аналитические исследования параметров зон разуплотнения и процессов их заполнения / П. Н. Должиков, А. А. Шубин // Гірничодобувна промисловість України і Польщі: Актуальні проблеми і перспективи: Матеріали Українсько-Польського форуму гірників — 2004 (Ялта, Крим, 13–19 вересня 2004). — Дніпропетровськ: НГУ, 2004. — С. 195–201.
6. Александров А. М. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями / А. М. Александров, Е. В. Коваленко. — М.: Наука, 1986. — 336с.
7. Должиков П. Н. Устойчивость выработок в интенсивно трещиноватых породах глубоких шахт: монография / П. Н. Должиков, А. Э. Кипко, Н. Н. Палейчук. — Донецк: Світ книги, 2012. — 220с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Борзыхом А. Ф., д.т.н., проф. ВНУ им. В. Даля Кипко А. Э.

Стаття поступила в редакцію 11.03.14.

**к.т.н. Палейчук М. М., Рижикова О. О.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГІДРОНАКОПИЧУВАЧА ПРИ УТВОРЕННІ ЗОНИ ДЕКОНСОЛІДАЦІЇ ҐРУНТУ**

*Приведені результати чисельних досліджень напружено-деформованого стану тіла греблі і основи гідронакопичувача в умовах утворення локальної ділянки деконсолідованого ґрунту і каналу гідророзриву. За допомогою методу скінчених елементів обґрунтовано застосування глиноцементного розчину у відповідних інженерно-геологічних умовах для тампонажу зони розуцілення ґрунту.*

**Ключові слова:** гідронакопичувач, гребля, зона деконсолідації, напружено-деформований стан, глиноцементний розчин, тампонаж.

**Paleichuk M. M. Candidate of Engineering Sciences, Ryzhikova O. O.**

*(DonSTU, Alchevsk, Ukraine)*

**STRESS-STRAIN STATE OF THE HYDRO-STORAGE DEVICE IN THE FORMATION OF SOIL DECONSOLIDATION ZONE INVESTIGATION**

*The results of numerous investigations of stress-strain state of the body of the dam and the foundation of the hydro-storage device in the conditions of the formation of deconsolidation soil local area and hydraulic fracturing were done. By the usage of finite element method, application of the clay-cement mortar in the corresponding engineering-geological conditions for softening soil grouting is motivated.*

**Key words:** hydro-storage device, the dam, the area of deconsolidation, the stress-strain state, clay-cement mortar, grouting.