

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.8

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-396-412

**Исследование распределения порового давления
под подземной плотиной в горной долине
при аккумуляции атмосферных осадков**

**Владимир Георгиевич Дегтярев¹, Ольга Георгиевна Дегтярева²,
Георгий Владимирович Дегтярев³**

^{1,2,3}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Краснодар, Российская Федерация

¹cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>

²marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

³degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>

Аннотация. Цель: исследование распределения порового давления под подземной плотиной, расположенной в горной долине для аккумуляции атмосферных осадков, при анализе влияния уровней воды в верхнем и нижнем бьефах. При этом факторы влияния изменялись в диапазоне: уровень воды в верхнем бьефе от минус 8,2 до минус 1,2; уровень воды в нижнем бьефе от минус 7,9 до минус 6,7. **Материалы и методы.** Исследование сложной системы осуществлено в два этапа. На первом этапе посредством метода конечных элементов на базе программного комплекса Midas GTX NX, имеющего возможность учитывать комплексно совместную работу подземной плотины и грунтового массива, рассчитывалось поровое давление под подземной плотиной, ответственное за фильтрацию под ней. На втором этапе полученный массив цифр, отражающий физические процессы, происходящие при влиянии на функцию отклика, за которую принято поровое давление под подземной плотиной, возмущающих воздействий, за которые взяты уровни воды в верхнем и нижнем бьефах плотины, был подвергнут цифровому анализу. **Результаты.** Размах значений порового давления при максимальных уровнях верхнего бьефа составляет 31,72 % во всем диапазоне изменения уровней нижнего бьефа. Для средних уровней верхнего бьефа размах значений порового давления составляет 32,70 %, а для минимальных уровней верхнего бьефа размах значений порового давления составляет 39,41 % также во всем диапазоне изменения уровней нижнего бьефа. Таким образом, чем меньше уровень верхнего бьефа, тем существеннее влияние на поровое давление уровня нижнего бьефа. **Выводы:** при изменении в исследованном диапазоне уровней воды в верхнем или нижнем бьефе в плотине, т. е. факторов влияния, с уменьшением значений факторов влияния степень их влияния на поровое давление под подземной плотиной уменьшается, а с ростом – увеличивается, и происходит это практически линейно.

Ключевые слова: поровое давление, подземная плотина, уровни бьефов, численный эксперимент, цифровой анализ

Для цитирования: Дегтярев В. Г., Дегтярева О. Г., Дегтярев Г. В. Исследование распределения порового давления под подземной плотиной в горной долине при аккумуляции атмосферных осадков // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 396–412. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-396-412>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Study of pore pressure distribution under an underground dam
in a mountain valley during the atmospheric precipitation accumulation**

Vladimir G. Degtyarev¹, Olga G. Degtyareva², Georgy V. Degtyarev³

^{1,2,3}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar,
Russian Federation

¹cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>

²marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

³degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>

Abstract. Purpose: to study the distribution of pore pressure under an underground dam located in a mountain valley for the atmospheric precipitation accumulation, while analyzing the effect of water levels in headwater and tailwater. At the same time, the factors of influence varied in the range: the water level in headwater from minus 8.2 to minus 1.2; water level in tailwater from minus 7.9 to minus 6.7. **Materials and methods.** The study of a complex system was carried out in two stages. At the first stage, the pore pressure under the underground dam, responsible for the seepage under it, was calculated using the finite element method based on the Midas GTX NX software package, which has the ability to take into account the complex joint operation of the underground dam and the soil mass. At the second stage, the resulting array of numbers, which reflects the physical processes occurring when the response function, which is taken as the pore pressure under the underground dam, is affected by disturbances, for which the water levels in headwater and tailwater of the dam are taken, was subjected to digital analysis. **Results.** The range of pore pressure values at the maximum headwater levels is 31.72 % over the entire range of tailwater levels. For the average levels of the headwater, the range of pore pressure values is 32.70 %, and for the minimum levels of the headwater, the range of pore pressure values is 39.41 %, also in the entire range of changes at the tailwater levels. Thus, the lower the headwater level, the greater the impact on the pore pressure of the tailwater level. **Conclusions:** with a change in the studied range of water levels in headwater or tailwater of the dam, i.e. factors of influence, with a decrease in the values of the impact factors, the degree of their influence on the pore pressure under the underground dam decreases, and with growth – increases, and it occurs almost linear.

Keywords: pore pressure, underground dam, water levels, numerical experiment, digital analysis

For citation: Degtyarev V. G., Degtyareva O. G., Degtyarev G. V. Study of pore pressure distribution under an underground dam in a mountain valley during the atmospheric precipitation accumulation. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(4):396–412. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-396-412>.

Введение. Достаточное количество пресной воды – безусловный успех развития многих отраслей народного хозяйства. К сожалению, с ростом народонаселения данный ресурс слишком быстро, даже катастрофически, истощается [1]. Вместе с тем по земной поверхности данный ресурс распределен крайне неравномерно, а увеличение населения вынуждает

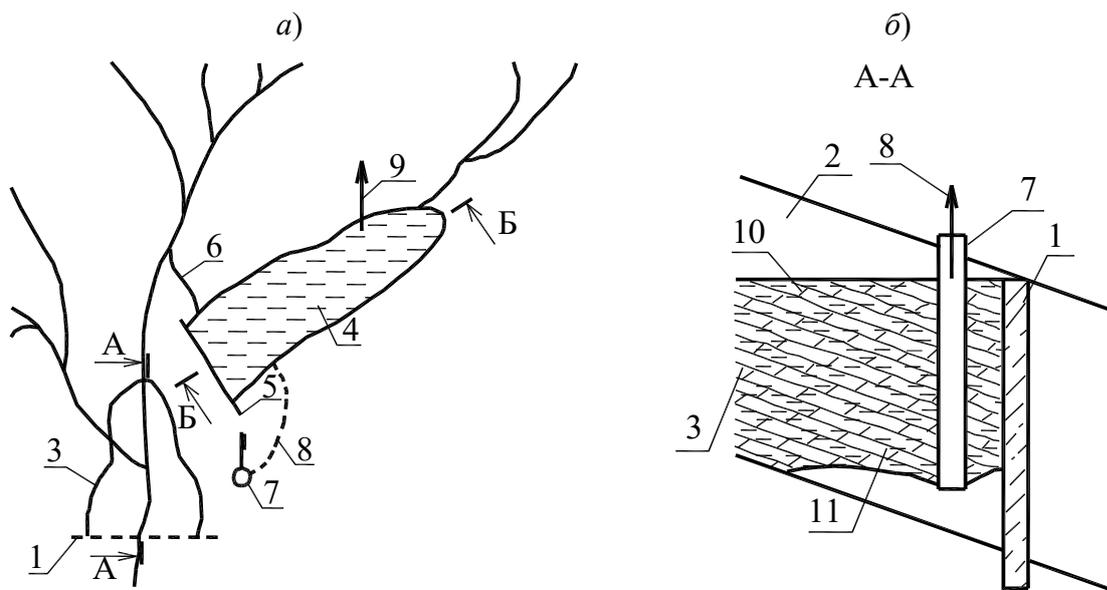
осваивать и те земли, которые ранее считались неудобью, в т. ч. в свете отсутствия тех или иных ресурсов. Не стало исключением в этом негативном ряду и Черноморское побережье Кавказа, а также Республика Крым [2]. Парадокс, но при наличии моря, казалось бы, неистощимого источника воды, в этих регионах огромный дефицит именно пресной воды. Есть некоторый опыт, в большинстве своем зарубежный, превращения морской воды в пресную, но это и дорого, и эта вода малопригодна для целей водоснабжения населенных мест, а вот о количестве, способном удовлетворить сельскохозяйственное орошаемое земледелие, вообще речи не идет [3]. Однако эти регионы расположены в горной местности, где выпадает достаточное количество атмосферных осадков, и, по расчетам специалистов, в количественном выражении объемов выпадающей воды вполне достаточно, чтобы удовлетворить не только текущие потребности, но и потребности в ближайшей перспективе даже при интенсивном развитии [4, 5]. В этом случае встает вопрос: как аккумулировать выпадающие осадки? На сегодня учеными значимо проработан данный вопрос и имеется целый ряд предложений, позволяющих осуществлять сбор атмосферных осадков, выпадающих в горно-предгорной местности, предложены как устройства, так и способы, их реализующие [6–9]. При этом освоение земель, расположенных в горной местности, потребовало разработки специальных сберегающих ресурсы средств водораспределения на оросительных системах [10–12].

На сегодня при разработке проектных решений в ряде случаев из-за отсутствия должной информации недостаточно глубоко учитывают целый ряд значимых для процессов факторов, существенно влияющих на конструктивно-технологическую и эксплуатационную надежность подземных водохранилищ [13–15]. Одним из основных факторов является поровое давление под подземной плотиной, определяющее фильтрационные параметры сооружения [16–20].

Целью работы являются исследования поровых давлений под под-

земной плотиной при анализе уровней воды в ее верхнем и нижнем бьефах. При этом факторы влияния изменялись в диапазоне: уровень воды в верхнем бьефе от минус 8,2 до минус 1,2; уровень воды в нижнем бьефе от минус 7,9 до минус 6,7.

Материалы и методы. Одна из конструктивно-технологических схем системы регулирования стоков атмосферных осадков приведена на рисунке 1 и включает: 1 – водонепроницаемую подземную плотину; 2 – водоносный горизонт; 3 – подземное водохранилище; 4 – надземное водохранилище; 5 – надземную плотину; 6 – деривационный канал; 7 – водоприемную скважину; 8, 9 – транспортные водоводы; 10 – максимальный уровень подземного водохранилища; 11 – мертвый объем подземного водохранилища.



a – компоновочная схема системы аккумуляции атмосферных осадков;
б – разрез А – А по подземному водохранилищу; 1 – водонепроницаемая подземная плотина; 2 – водоносный горизонт; 3 – подземное водохранилище; 4 – надземное водохранилище; 5 – надземная плотина; 6 – деривационный канал; 7 – водоприемная скважина; 8, 9 – транспортные водоводы; 10 – максимальный уровень подземного водохранилища; 11 – мертвый объем подземного водохранилища
a – layout scheme of the atmospheric precipitation accumulation system; *b* – section A – A along the underground reservoir; 1 – impermeable underground dam; 2 – aquifer; 3 – underground reservoir; 4 – above-surface reservoir; 5 – elevated dam; 6 – derivation canal; 7 – water intake well; 8, 9 – transport conduits; 10 – the maximum level of the underground reservoir; 11 – dead storage of the underground reservoir

Рисунок 1 – Система аккумуляции атмосферных осадков
Figure 1 – The system of atmospheric precipitation accumulation

На рисунке 2 представлен разрез А – А по оси подземного водохранилища с указанием инженерно-геологических слоев в основании.

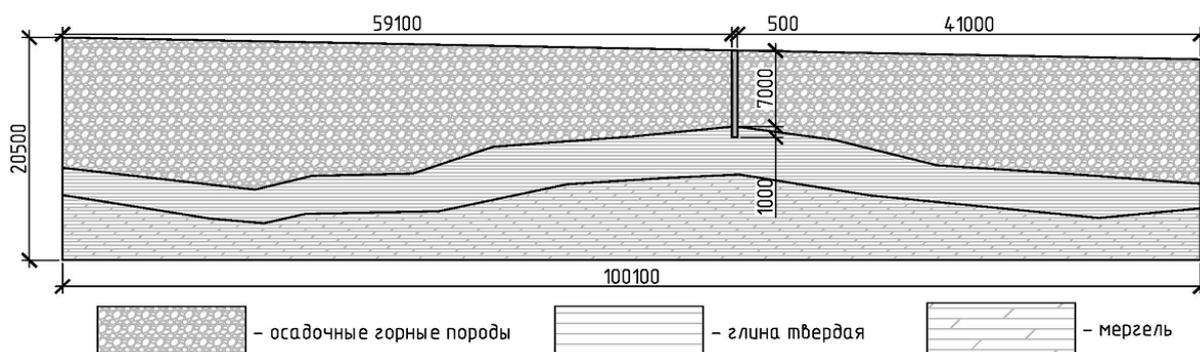


Рисунок 2 – Разрез А – А по подземному водохранилищу с инженерно-геологическими слоями в основании

Figure 2 – Section A – A along the underground reservoir with engineering-geological layers at the base

Представленная на рисунках 1 и 2 система аккумуляции стока атмосферных осадков позволяет судить о значительной сложности объекта исследования, в связи с чем его реализация осуществлена посредством численного моделирования с применением программного комплекса Midas GTS NX и последующего цифрового анализа результатов. Осуществлено моделирование и анализ грунтового массива по разрезу А – А по подземной плотине при различных уровнях верхнего бьефа (УВБ) и уровнях нижнего бьефа (УНБ). Учет реологических свойств грунта выполнен посредством совмещенного стадийного моделирования в рамках расчетных ситуаций, учитывающих изменчивость напряженно-деформированного состояния грунтового массива и фильтрации.

Используя детализированный в размерах разрез А – А по подземному водохранилищу, разработали расчетную математическую модель, приведенную на рисунке 3.

Результаты и обсуждение. Реализованные численные исследования позволили получить значительный объем информации о поровом давлении под подземной плотиной, которая приведена выборочно в таблице 1.

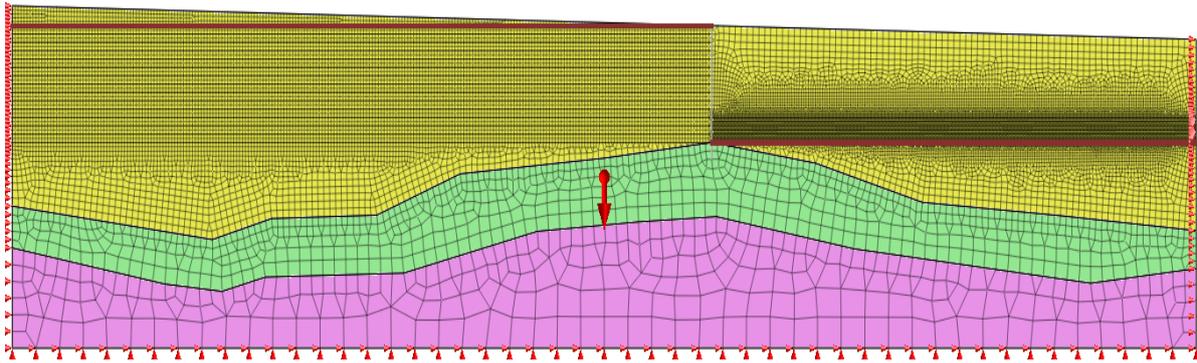


Рисунок 3 – Математическая модель объекта при исследовании порового давления под подземной плотиной

Figure 3 – Mathematical object model in the study of pore pressure under an underground dam

Таблица 1 – Выборка результатов расчетов порового давления под подземной плотиной

In m

Table 1 – A selection of the results of calculations of pore pressure under an underground dam

B m

Исследуемая комбинация	Уровень воды в верхнем бьефе	Уровень воды в нижнем бьефе	Напор порового давления
1	-8,19	-7,93	1,6982
2	-8,19	-7,68	1,8067
3	-8,19	-7,43	1,9063
4	-8,19	-7,18	1,9951
5	-8,19	-6,94	2,0822
6	-8,19	-6,68	2,1690
7	-7,19	-8,19	1,9927
8	-7,19	-7,93	2,1449

Посредством цветового кодирования результаты численных исследований порового давления под подземной плотиной представлены на рисунке 4 при следующих значениях аргументов: УВБ – минус 7,19 м, УНБ – минус 8,19 м.

Для реализации цифрового анализа численного исследования порового давления под подземной плотиной необходимо создать матрицу из экспериментальных данных, фрагмент которой имеет следующий вид:
 $M:matrix [-8.19, -7.93, 1.6982], [-8.19, -7.68, 1.8067], [-8.19, -7.43, 1.9063], [-8.19, -7.18, 1.9951], [-8.19, -6.94, 2.0822], [-8.19, -6.68, 2.169],$

$[-7.19, -8.19, 1.9927]$, $[-7.19, -7.93, 2.1449]$, $[-7.19, -7.68, 2.2961]$, $[-7.19, -7.43, 2.4447]$, $[-7.19, -7.19, 2.5753]$, $[-7.19, -6.94, 2.6895]$, ...

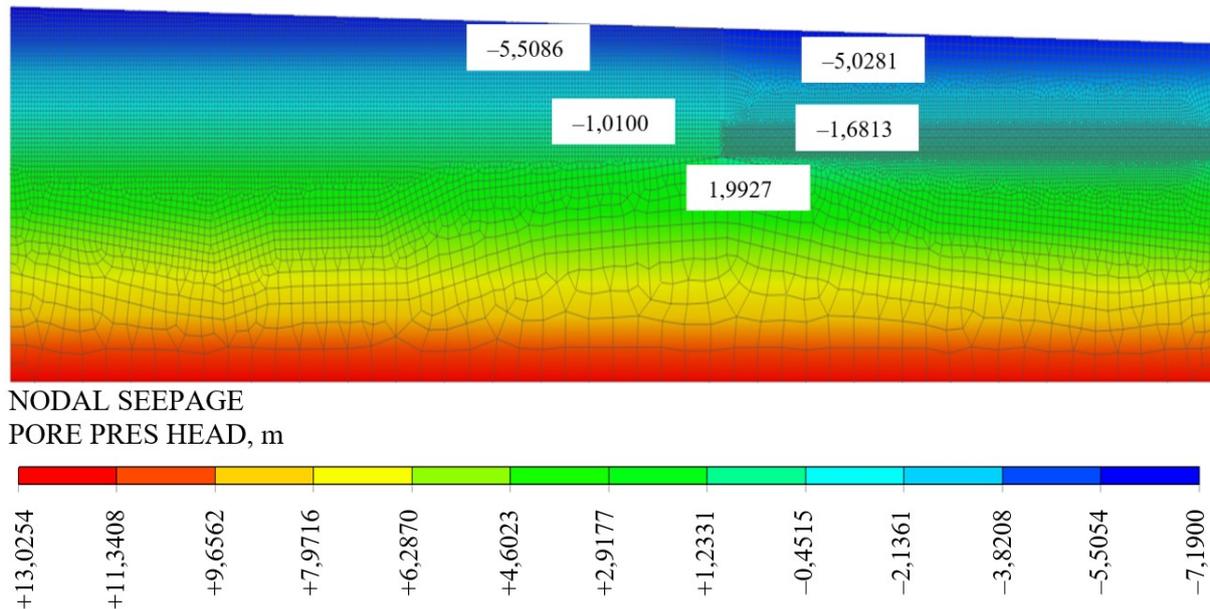


Рисунок 4 – Результаты численного исследования порового давления под подземной плотиной
Figure 4 – Results of a numerical study of pore pressure under an underground dam

Расчеты в программном комплексе (ПО) wxMaxima обеспечивают получение коэффициентов математической модели в натуральных дробях в виде:

$$a = 5155623823/419075943;$$

$$b = 3435477/8381518;$$

$$c = 10967920/8381518;$$

$$d = 69013/1676303;$$

$$e = -90273/4190759;$$

$$f = 6315353/209537971.$$

В полиномах коэффициенты уравнений представляются в десятичных дробях, что дало следующие результаты:

$$a = 12,30236168260595;$$

$$b = 0,409887226461809;$$

$$\begin{aligned}c &= 1,308583882736536; \\d &= 0,04116978010798794; \\e &= -0,02154111325823460; \\f &= 0,03013942493753953.\end{aligned}$$

Полученные коэффициенты модели были оценены с позиции значимости, а сама модель проверена на адекватность, что завершило процедуру ее валидации.

Итогом представленных действий явилась следующая математическая модель исследуемого процесса:

$$Z(x, y) = 12,30236 + 0,40989 \cdot x + 1,30858 \cdot y + 0,04117 \cdot x \cdot y - 0,02154 \cdot x^2 + 0,03014 \cdot y^2.$$

Адекватная математическая модель допускает построение визуализированной поверхности функции отклика. На рисунке 5 представлена поверхность отклика по математической модели порового давления под подземной плотиной.

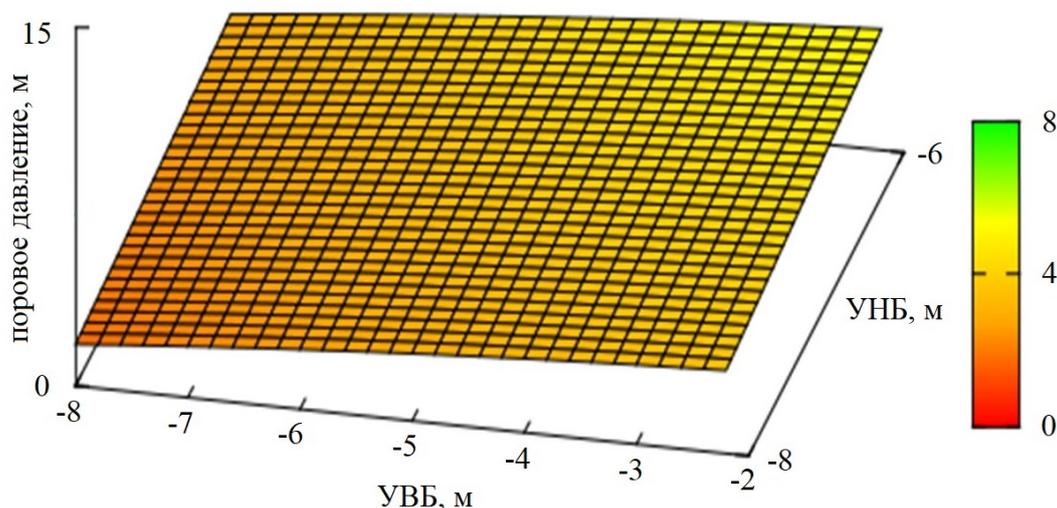


Рисунок 5 – Поверхность отклика в цветовом кодировании

Figure 5 – Response surface in color coding

С целью анализа поверхности функции отклика необходимо расечь ее линиями равных уровней, что в программе wxMaxima выполняется посредством файла `contour_plot`, а результат выведен в виде рисунка 6.

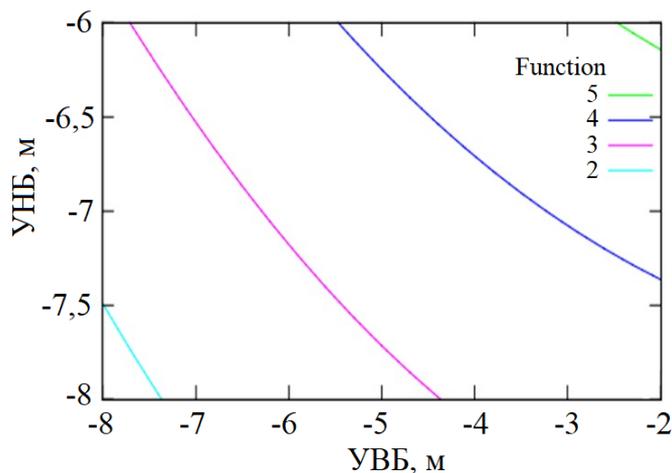


Рисунок 6 – Линии равных уровней по визуализированной математической модели порового давления под подземной плотиной
Figure 6 – Lines of equal levels by the visualized mathematical model of pore pressure under an underground dam

Анализ поверхности отклика и линий равных уровней по визуализированной математической модели порового давления под подземной плотиной позволяет видеть, что диапазон изменения состояния порового давления – от 2 до 5 м во всем диапазоне изменения аргументов.

Для раскрытия потенциала влияния каждого аргумента на функцию отклика с уточнением истинных значений параметров воздействия необходимо выведение одного из аргументов на постоянные уровни в основной математической модели для получения ее упрощенных образов, позволяющих посредством геометрического представления в декартовых координатах видеть все моменты воздействия, последовательно для каждого аргумента.

В первом случае возьмем в математической модели на постоянных показателях УНБ, что аналитически будет представлять нижеследующее: $F_1(x, -6)$; $F_2(x, -7)$; $F_3(x, -8)$. Тогда математическая модель может быть представлена в виде следующих образов:

$$F_1(x) = -0,02154 \cdot x^2 + 0,16287 \cdot x + 5,53592,$$

$$F_2(x) = -0,02154 \cdot x^2 + 0,1217 \cdot x + 4,61916,$$

$$F_3(x) = -0,02154 \cdot x^2 + 0,08053 \cdot x + 3,76268.$$

В декартовых координатах представленные аналитические уравнения имеют вид, показанный на рисунке 7, где приведено поровое давление под подземной плотиной в зависимости от уровня воды в верхнем бьефе при постоянных УНБ.

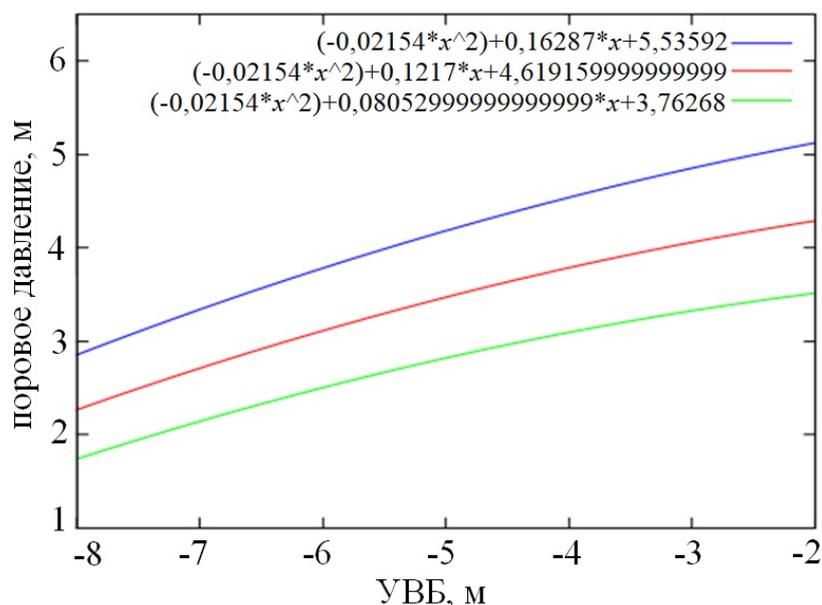


Рисунок 7 – Поровое давление под подземной плотиной при постоянных уровнях нижнего бьефа
Figure 7 – Pore pressure under an underground dam at constant tailwater levels

Анализ графиков и уравнений, представленных на рисунке 7, позволяет отметить, что в диапазоне изменения УВБ от минус 2 до минус 8 м при постоянных УНБ функции отклика не достигают экстремальных значений. Действительные величины характерных значений функций представлены в таблице 2.

По результатам, приведенным в таблице 2, можно отметить, что при наибольшем УВБ перед плотиной имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, равном 31,72 %, во всем диапазоне изменения УНБ. При средних значениях УВБ перед плотиной имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, рав-

ном 32,70 %, во всем диапазоне изменения УНБ. При минимальных значениях УВБ перед плотиной имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, равном 39,41 %, во всем диапазоне изменения УНБ.

Таблица 2 – Поровое давление под подземной плотиной по граничным параметрам уровней верхнего бьефа

In m

Table 2 – Pore pressure under the underground dam according to the boundary parameters of the headwater levels

B m

Параметр УНБ	Параметр УВБ	Поровое давление
–6,0	–2	5,117
	–5	4,177
	–8	2,862
–7,0	–2	4,280
	–5	3,477
	–8	2,264
–8,0	–2	3,494
	–5	2,811
	–8	1,734

Дальнейшие исследования процесса влияния на поровое давление под подземной плотиной выбранных к анализу факторов предполагают выведение на постоянные уровни значения УВБ, что аналитически будет представлять нижеследующее: $F_1(-2, y)$; $F_2(-4, y)$; $F_3(-8, y)$. В этом случае математическая модель будет преобразована к следующим видам:

$$F_1(x) = 0,03014 \cdot x^2 + 1,22624 \cdot x + 11,39642,$$

$$F_2(x) = 0,03014 \cdot x^2 + 1,10273 \cdot x + 9,71441,$$

$$F_3(x) = 0,03014 \cdot x^2 + 0,97922 \cdot x + 7,64468.$$

Графическое представление данных аналитических уравнений, а именно поровое давление под подземной плотиной в зависимости от УНБ при постоянных УВБ, показано на рисунке 8.

Анализ уравнений и графиков, представленных на рисунке 8, позволяет констатировать, что в диапазоне изменения УНБ от минус 6 до минус 8 м поровое давление под подземной плотиной изменяется практически

линейно и растет как при увеличении УНБ, так и при повышении значений УВБ. При наибольшем УНБ плотины имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, равном 44,4 %, во всем диапазоне изменения УВБ. При средних значениях УНБ плотины имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, равном 47,1 %, во всем диапазоне изменения УВБ. При минимальных значениях УНБ плотины имеем отличающиеся друг от друга величины порового давления под подземной плотиной в наибольшем значении, равном 51,33 %, во всем диапазоне изменения УВБ.

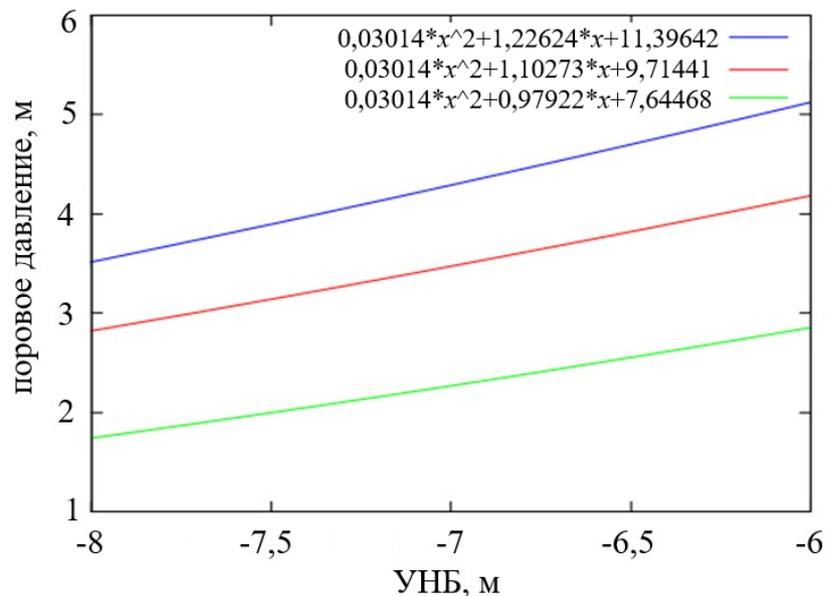


Рисунок 8 – Поровое давление под подземной плотиной при постоянных уровнях верхнего бьефа

Figure 8 – Pore pressure under an underground dam at constant headwater levels

Выводы. В результате исследования выявлены закономерности напряженно-деформированного состояния грунтового массива во времени под действием нагрузок, в т. ч. гидростатических, которые наиболее существенно оказывают влияние на поровое давление под подземной плотиной. Представленные в аналитических уравнениях и на графиках результаты исследований, а также приведенный анализ этих материалов позволяют

констатировать, что с уменьшением значений факторов влияния степень их влияния на поровое давление под подземной плотиной уменьшается, а с ростом – повышается, и происходит это практически линейно. Данный факт позволяет рекомендовать, исходя из эксплуатационных возможностей системы, оба фактора влияния, т. е. и УВБ, и УНБ, поддерживать на минимально возможных отметках.

Список источников

1. Факторы и условия обеспечения экономической устойчивости сельскохозяйственных организаций региона / Н. К. Васильева, С. М. Резниченко, В. П. Васильев, Н. П. Агафонова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. 2016. № 121(07). С. 1633–1646. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/100.pdf> (дата обращения: 11.07.2023).
2. Дегтярева О. Г., Васильев С. М. Применение котлованов глубокого заложения при использовании стока осадков для орошения в горно-предгорной зоне // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 3. С. 78–94. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1215> (дата обращения: 11.07.2023). DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-78-94.
3. Васильев С. М. Водосберегающие технологии орошения и рациональное использование водных ресурсов в АПК России // Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения (Костяковские чтения): материалы междунар. науч.-практ. конф. М., 2020. Т. 2. С. 6–11. DOI: 10.37738/VNIIGiM.2020.46.89.002.
4. Усенко В. С., Альтшуль А. Х. Сохранение подземных вод от истощения методом искусственного восполнения. Минск: ЦНИИКИВР, 1984. 124 с.
5. Экстремальные гидрологические ситуации / отв. ред. Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова, И. С. Зайцева. М.: Медиа Пресс, 2010. 464 с.
6. Дегтярева О. Г., Васильев С. М. Численное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния основания плотины сезонного регулирования // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 2. С. 92–110. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1198> (дата обращения: 11.07.2023). DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-92-110.
7. Degtyarev G. V., Abdrazakov F. K., Lavrov N. P. Assessment of the hydraulic structures' technical condition by means of the amplitude-frequency characteristics' analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913, № 2. 022056. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022056.
8. Modeling methods to assess technical condition of low-pressure earthen dams / M. A. Bandurin, V. V. Vanzha, A. S. Shishkin, F. S. Litovko, A. A. Sidakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 488, № 1. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012006.
9. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В. Цифровое моделирование и анализ перемещения основания гидромелиоративной плотины в перспективной технологии формирования ресурсов воды // Аграрный научный журнал. 2022. № 6. С. 82–87. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp82-87>.
10. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems / Z. Lamerdonov, T. Khashirova, S. Zhaboev, L. Nastueva, A. Shogenov,

K. Lamerdonov // Ecology and Industry of Russia. 2021. Vol. 25, № 7. P. 8–12. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-7-8-12>.

11. Дегтярев Г. В., Свистунов Ю. А. Низконапорные гидроциклоны-осветлители вод поверхностного стока. Краснодар: Изд-во КГАУ, 2005. 176 с.

12. Solodunov A. A., Bandurin M. A. Finite element modelling of the technical condition of a low-pressure earthen dam of rice systems under increasing operational loads // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720, № 1. 012081. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012081.

13. Волосухин Я. В., Бандурин М. А. Применение численных методов моделирования для определения остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Образование и наука на XXI век – 2012: материалы за VIII Междунар. науч. практ. конф., г. София, 17–25 окт. 2012 г. София: Бял ГРАД-БГ, 2012. Т. 41. С. 24–32.

14. Абдразаков Ф. К., Панкова Т. А., Щербаков В. А. Факторы, влияющие на эксплуатационное состояние гидротехнических сооружений // Аграрный научный журнал. 2016. № 10. С. 56–61.

15. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Коженко Н. В. Анализ основания мелиоративной плотины при работе в напорно-переменном режиме // Аграрный научный журнал. 2021. № 8. С. 82–86. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp82-86>.

16. Каменский Г. Н. Гидродинамические принципы изучения режима грунтовых вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. 1963. № 10. С. 28.

17. Альтшуль А. Х., Усенко В. С., Чабан М. О. Регулирование запасов подземных вод. М.: Колос, 1977. 239 с.

18. Экспериментальное исследование механических свойств низового клина низконапорной дамбы в условиях повышения уровня паводковых вод / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. Ю. Вербицкий // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14, № 1. С. 111–122.

19. Географо-гидрологическая оценка наводнений в Российском Причерноморье / И. А. Вишневецкая, Л. В. Десинов, С. В. Долгов, Н. И. Коронкевич, С. И. Шапоренко, М. Б. Киреева, Н. Л. Фролова, Е. П. Рец, С. Н. Голубчиков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. № 1. С. 131–146. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146.

20. Базелюк А. А. Опасные гидрометеорологические явления на юге европейской территории России // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. М.: Триумф, 2012. С. 33–41.

References

1. Vasilieva N.K., Reznichenko S.M., Vasiliev V.P., Agafonova N.P., 2016. [Factors and conditions for ensuring the economic sustainability of farm organizations in the region]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU: politematicheskiy setevoy elektronnyy zhurnal*, no. 121(07), pp. 1633-1646, available: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/100.pdf> [accessed 11.07.2023]. (In Russian).

2. Degtyareva O.G., Vasiliev S.M., 2021. [The use of deep-laid pits when using precipitation runoff for irrigation in the mountainous piedmont zone]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 11, no. 3, pp. 78-94, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1215> [accessed 11.07.2023], DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-78-94. (In Russian).

3. Vasiliev S.M., 2020. *Vodosberegayushchie tekhnologii orosheniya i ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov v APK Rossii* [Water-saving irrigation technologies and rational use of water resources in the agro-industrial complex of Russia]. *Sovremennye problemy razvitiya melioratsii i puti ikh resheniya (Kostyakovskie chteniya): materialy mezhd-*

narodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current Problems of Land Reclamation Development and Ways to Solve Them (Kostyakov Readings): Proc. of the International Scientific Practical Conference]. Moscow, vol. 2, pp. 6-11, DOI: 10.37738/VNIIGiM.46.89.002. (In Russian).

4. Usenko V.S., Altshul A.Kh., 1984. *Sokhranenie podzemnykh vod ot istoshcheniya metodom iskusstvennogo vospolneniya* [The Use and Preservation of Groundwater from Depletion by Artificial Replenishment]. Minsk, TsNIIKIVR, 124 p. (In Russian).

5. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S., 2010. *Ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii* [Extreme Hydrological Situations]. Moscow, Media Press, 464 p. (In Russian).

6. Degtyareva O.G., Vasiliev S.M., 2021. [Computer modeling and stress-strain analyses of the seasonal storage dam foundation]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 11, no. 2, pp. 92-110, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1198> [accessed 11.07.2023], DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-92-110. (In Russian).

7. Degtyarev G.V., Abdrazakov F.K., Lavrov N.P., 2020. Assessment of the hydraulic structures' technical condition by means of the amplitude-frequency characteristics' analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 913, no. 2, 022056, DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022056.

8. Bandurin M.A., Vanzha V.V., Shishkin A.S., Litovko F.S., Sidakov A.A., 2020. Modeling methods to assess technical condition of low-pressure earthen dams. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 488, no. 1, 012006, DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012006.

9. Abdrazakov F.K., Degtyarev V.G., Degtyarev G.V., 2022. *Tsifrovoe modelirovanie i analiz peremeshcheniya osnovaniya gidromeliorativnoy plotiny v perspektivnoy tekhnologii formirovaniya resursov vody* [Digital modeling and analysis of the displacement of the foundation of a hydro-reclamation dam in a promising technology for the formation of water resources]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 6, pp. 82-87, <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp82-87>. (In Russian).

10. Lamerdonov Z., Khashirova T., Zhaboev S., Nastueva L., Shogenov A., Lamerdonov K., 2021. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems. Ecology and Industry of Russia, vol. 25, no. 7, pp. 8-12, <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-7-8-12>.

11. Degtyarev G.V., Svistunov Yu.A., 2005. *Nizkonapornye gidrotsiklony-osvetliteli vod poverkhnostnogo stoka* [Low-Pressure Hydrocyclones-Clarifiers of Surface Runoff Waters]. Krasnodar, KSAU Publ., 176 p. (In Russian).

12. Solodunov A.A., Bandurin M.A., 2021. Finite element modelling of the technical condition of a low-pressure earthen dam of rice systems under increasing operational loads. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 720, no. 1, 012081, DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012081.

13. Volosukhin Ya.V., Bandurin M.A., 2012. *Primenenie chislennykh metodov modelirovaniya dlya opredeleniya ostatochnogo resursa dlitel'no eksploatiruemyykh vodoprovodnykh sooruzheniy* [The use of computer modeling methods to determine the residual resource of long-term operated water supply structures]. *Obrazovaniye i nauka na XXI vek – 2012: materialy za VIII Mezhdunarodnoy nauchno prakticheskoy konf.* [Education and Science for the 21 Century – Proc. of the International Scientific Practical Conference]. Sofia, Byal GRAD-BG, vol. 41, pp. 24-32. (In Russian).

14. Abdrazakov F.K., Pankova T.A., Shcherbakov V.A., 2016. *Faktory, vliyayushchie na ekspluatatsionnoe sostoyanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Factors affecting the operational condition of hydraulic structures]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 10, pp. 56-61. (In Russian).

15. Abdrazakov F.K., Degtyarev V.G., Kozhenko N.V., 2021. *Analiz osnovaniya me-*

liorativnoy plotiny pri rabote v naporno-peremennom rezhime [Analysis of the base of a reclamation dam when operating in a pressure-variable mode]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 8, pp. 82-86, <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp82-86>. (In Russian).

16. Kamensky G.N., 1963. *Gidrodinamicheskie printsipy izucheniya rezhima gruntovykh vod* [Hydrodynamic principles for studying the groundwater regime]. *Voprosy gidrogeologii i inzhenernoy geologii* [Problems of Hydrogeology and Engineering Geology], no. 10, p. 28. (In Russian).

17. Altshul A.Kh., Usenko V.S., Chaban M.O., 1977. *Regulirovanie zapasov podzemnykh vod* [Regulation of Underground Water Reserves]. Moscow, Kolos Publ., 239 p. (In Russian).

18. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu., 2023. *Ekspериментal'noe issledovanie mekhanicheskikh svoystv nizovogo klina nizkonapornoy damby v usloviyakh povysheniya urovnya pavodkovykh vod* [Experimental study of the mechanical properties of the downstream wedge of a low-pressure dam under conditions of rising flood waters]. *Construction and Geotechnics*, vol. 14, no. 1, pp. 111-122. (In Russian).

19. Vishnevskaya I.A., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Shaporenko S.I., Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P., Golubchikov S.N., 2016. *Geografo-gidrologicheskaya otsenka navodneniy v Rossiyskom Prichernomor'e* [Geographic and hydrological assessment of floods in the Russian Black Sea region]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series], no. 1, pp. 131-146, DOI: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146. (In Russian).

20. Bazelyuk A.A., 2012. *Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya na yuge evropeyskoy territorii Rossii* [Dangerous hydrometeorological phenomena in the south of the European territory of Russia]. *Prirodnye i sotsial'nye riski v beregovoy zone Chernogo i Azovskogo morey* [Natural and Social Risks in the Coastal Zone of the Black and the Azov Seas]. Moscow, Triumph Publ., pp. 33-41. (In Russian).

Информация об авторах

В. Г. Дегтярев – доцент, кандидат технических наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>;

О. Г. Дегтярева – доцент, доктор технических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>;

Г. В. Дегтярев – заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>.

Information about the authors

V. G. Degtyarev – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>;

O. G. Degtyareva – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>;

G. V. Degtyarev – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 14.08.2023;
принята к публикации 15.09.2023.*

*The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 14.08.2023; accepted for
publication 15.09.2023.*