

Цифровое моделирование и анализ перемещения основания гидромелиоративной плотины в перспективной технологии формирования ресурсов воды

Фярид Кинжаевич Абдразаков¹, Владимир Георгиевич Дегтярев², Георгий Владимирович Дегтярев²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», г. Саратов; Россия.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия.

e-mail: abdrzakov.fk@mail.ru

Аннотация. На юге России имеются горные массивы не заселенные и в большинстве своем не могущие быть вовлеченные в активный сельскохозяйственный оборот, исключая отгонное скотоводство. А вот как площади водосбора, где формируется сток атмосферных осадков горные склоны используются самой природой, а нами лишь предлагается согласно новой технологии, перенести аккумуляцию атмосферных осадков в горные ущелья, самой природой созданные места, предназначенные для решения таких задач. Аккумулировать сток атмосферных осадков предлагается как в подземных, так и в надземных водохранилищах, что делает функционирование таких систем наименее влияющими на экологию местности, а в большинстве случаев даже облагораживая места их расположения. Рекомендуемые к использованию при создании надземных водохранилищ в горной местности контрфорсные плотины, расположенные в сложных геологических и гидрогеологических условиях, безусловно требуют дополнительных исследований. Целью исследований явилось изучение перемещения основания гидромелиоративной плотины при работе в горных условиях, выполненное при использовании цифрового моделирования и анализа. Примененные методы исследований базировались на специализированных цифровых расчетных комплексах, предназначенных для решения подобных задач, а именно для расчета состояния грунтов. Применен программный комплекс Midas GTX NX, а для разработки математической модели и ее цифрового исследования применен комплекс wxMaxima, что позволило, во-первых, рассчитать перемещения в основании плотины S, при этом расчеты произведены в виде численного эксперимента, то есть с набором большого цифрового массива данных, связывающих перемещение в основании плотины от напоров в верхнем и нижнем бьефах. В свою очередь обработка массива данных позволила получить математическую модель, затем визуализированную, над которой выполнены такие действия, как построение линий уровня и получение локальных математических уравнений с представлением их графической интерпретации. Примененный анализ позволил выявить степень влияния принятых к исследованию факторов на перемещения в основании плотины, отмечая, что практически любой напор со стороны верхнего бьефа в анализируемом диапазоне значимо влияет на перемещение, тогда как значения подобного же фактора со стороны нижнего бьефа, как минимум, на порядок меньше.

Ключевые слова: ресурсы пресной воды; водохранилища в горной местности; перемещение основания плотины.

Для цитирования: 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. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp82-87>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Digital modeling and analysis of the movement of the foundation of a hydro-reclamation dam in a promising technology for the formation of water resources

Fyarid K. Abdrzakov¹, Vladimir G. Degtyarev², Georgi V. Degtyarev²

¹Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

e-mail: abdrzakov.fk@mail.ru.

Abstract. In the south of Russia there are mountain ranges that are not inhabited and for the most part cannot be involved in active agricultural turnover, excluding cattle breeding. But how are the catchment areas where precipitation runoff is formed, the mountain slopes are used by nature itself. We propose, according to the new technology, to transfer the accumulation of atmospheric precipitation into mountain gorges, places created by nature itself, designed to solve such problems. It is proposed to accumulate precipitation runoff both in underground and above-ground reservoirs, which makes the functioning of such systems the least affecting the ecology of the area, and in most cases even ennobling their locations. Buttress dams recommended for use when creating aboveground reservoirs in mountainous areas, located in difficult geological and hydrogeological conditions, certainly require additional research and are the subject of research. The purpose of the research was to study the movement of the base of a hydro-reclamation dam, when working in mountainous conditions, performed using digital modeling and analysis. The applied research methods were based on specialized digital calculation complexes



designed to solve such problems, namely, to calculate the condition of soils. The Midas GTX NX software package was used, and the wxMaxima complex was used to develop a mathematical model and its digital study, which allowed, firstly, to calculate the displacements at the base of the dam S, while the calculations were made in the form of a numerical experiment, that is, with a set of a large digital array of data linking the displacement at the base of the dam from the pressures in the upper and the lower reaches. In turn, processing of the data array made it possible to obtain a mathematical model, then visualized, on which such actions as constructing level lines and obtaining local mathematical equations with a representation of their graphical interpretation were performed. The applied analysis revealed the degree of influence of the factors accepted for the study on the movements at the base of the dam, noting that almost any pressure from the upstream side, in the analyzed range, significantly affects the movement, while the values of the same factor from the downstream side are at least an order of magnitude less.

Keywords: freshwater resources; reservoirs in mountainous areas; moving the dam base.

For citation: Abdrzakov F.K., Degtyarev V.G., Degtyarev G.V. Digital modeling and analysis of the movement of the foundation of a hydro-reclamation dam in a promising technology for the formation of water resources // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(6):82–87. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp82-87>.

Введение. Поступательное развитие любого региона страны зависит, прежде всего, от наличия доступных к использованию ресурсов, которые в конечном итоге являются основой. Южные регионы России все острее ощущают дефицит пресной воды [1–4]. Большинство здешних рек подошли к пределу использования их стока, за которым неминуемо начнется необратимая деградация источника [5, 6]. Вместе с тем в большинстве мест в Южных регионах выпадает значительное количество атмосферных осадков от 1000 до 1500 мм и более, которые, собственно, и формируют реки. Сток рек аккумулируют в русловых водохранилищах [1, 2]. Однако места, где это можно было делать хотя бы с ограниченной экономической целесообразностью, давно использованы, а водный дефицит возрастает. Русловые водохранилища, позволяя аккумулировать значительные объемы воды, вместе с тем выводили из оборота значительные площади наиболее плодородных земель сельскохозяйственного назначения, да и строительство таких гидротехнических гигантов требовало значительных единовременных капитальных ресурсов. При этом именно предлагаемая технология формирования водных ресурсов базируется на рассредоточении объектов аккумуляции по горным ущельям, по сельскохозяйственным неудобьям, максимально вписываясь в горный рельеф [7–9]. Но именно расположение водохранилищ, вписанных в горный рельеф, обозначило не изученность вопроса напряженно-деформированного состояния основания плотины, в частности в зависимости от уровней воды в верхнем и нижнем бьефах сооружения [9, 10].

Методика исследований. В связи со значительным количеством факторов, которыми может быть представлено напряженно-деформированное состояние основания плотины, остановимся на анализе наиболее существенного, а именно на величине вертикальных перемещений основания [11]. Для исследований воспользовались моделью Мора-Кулона, которая допускает некоторую идеализацию работы грунта, отображая принимаемые деформации постоянными на всем протяжении упругой работы грунта, вплоть до зоны разрушения [12, 13].

Используя представленную модель грунта, для реализации поставленной цели выполнены расчеты при совместной работе грунта основания и самой плотины с применением ПО Midas GTX NX, где увязаны уровни воды в верхнем и нижнем бьефах плотины и перемещение основания ТУ, м. Таким образом осуществлен численный эксперимент, где в качестве аргументов приняты уровни воды в верхнем и нижнем бьефах плотины, а за исследуемую функцию приняты перемещения в основании плотины ТУ, м. При этом уровень воды в верхнем бьефе плотины варьировал от 1 до 10 м, тогда как по нижнему бьефу изменения были от 0,80 до 2,55 м.

Плотина, как расчетная модель с геологическими элементами, представлена на рис. 1.

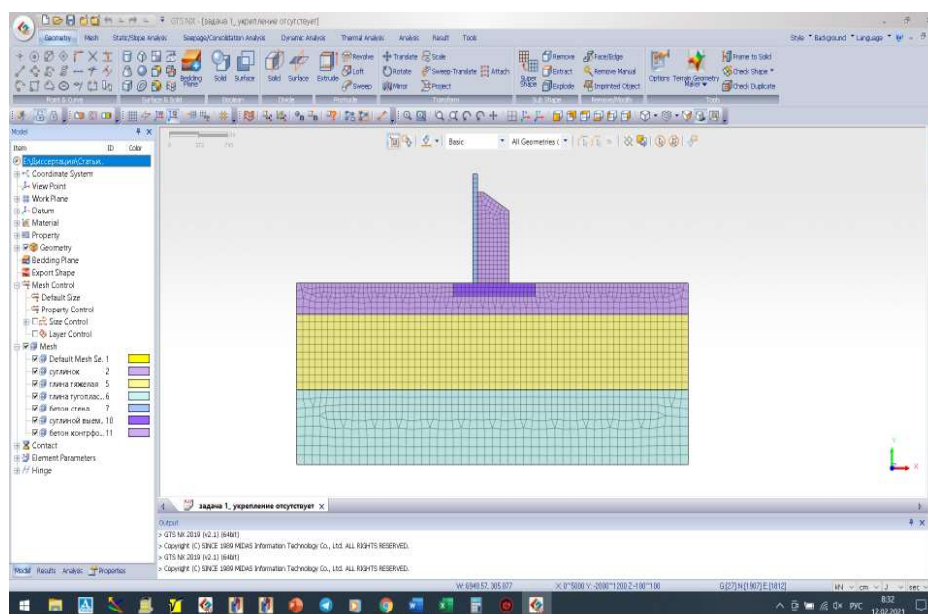


Рис. 1. Расчетная модель плотины

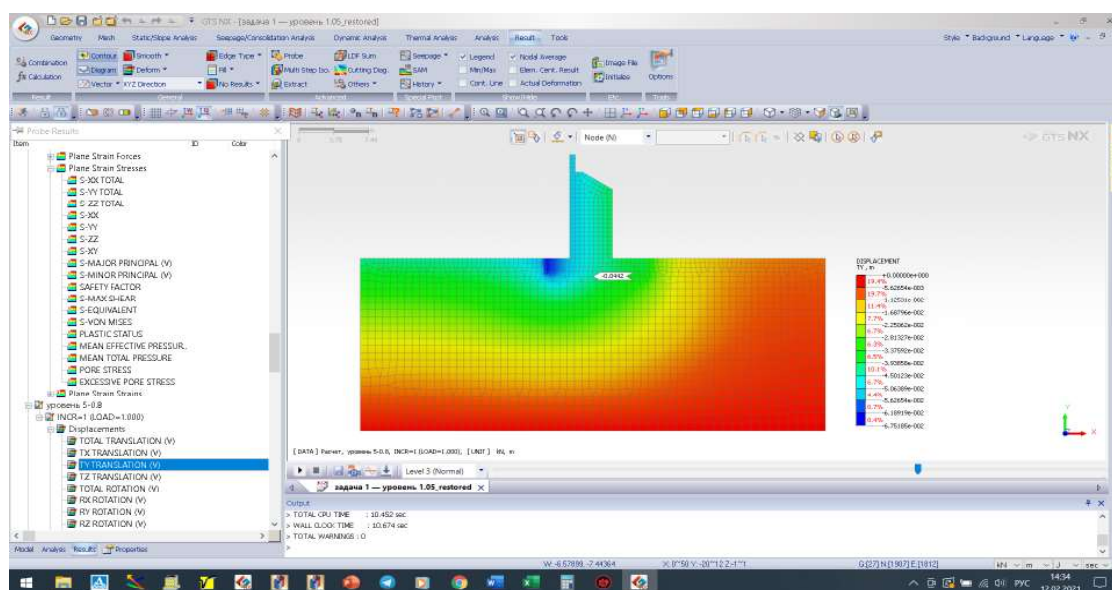
Фрагмент по результатам расчета напряженно-деформированного состояния основания плотины при постоянном уровне воды в нижнем бьефе, равном 1,05 м, представлен в таблице.



**Расчетный фрагмент напряженно-деформированного состояния плотины при постоянном уровне воды
в нижнем бьефе, равном 1,05 м**

Номер опыта	Уровень воды		Перемещение основания ТУ, м
	верхний бьеф	нижний бьеф	
1	1	1,05	–0,034
2	2	1,05	–0,037
3	3	1,05	–0,039
4	4	1,05	–0,041
5	5	1,05	–0,044
6	6	1,05	–0,047
7	7	1,05	–0,049
8	8	1,05	–0,051
9	9	1,05	–0,054

На рис. 2 представлен визуализированный вид расчета по перемещению основания плотины ТУ, м, при уровне воды в верхнем бьефе 5 м и в нижнем бьефе 1,05 м.



**Рис. 2. Визуализированное представление перемещения основания плотины ТУ, м, при уровне воды
в верхнем бьефе 5 м, нижнем бьефе 1,05 м**

Результаты исследований. Анализ результатов имитационного моделирования по исследованию напряженно-деформированного состояния основания плотины осуществлен при помощи программного комплекса wxMaxima. В процессе реализации исследований экспериментальные данные из таблиц были переведены в матричный вид, фрагмент действия представляет следующее: M:matrix ([2.0,1.05,–0.037], [3.0,1.05,–0.039], [4.0,1.05,–0.041], [5.0,1.05,–0.044], [6.0,1.05,–0.047], [7.0,1.05,–0.049], [8.0,1.05,–0.051], [9.0,1.05,–0.054]).

Используя априорную информацию [8, 9, 11, 14], выбрано представление математической модели исследуемого процесса в виде полинома второй степени, для чего использовали файл:squares_estimates

$$(M, [x, y, z], z = a + bx + cx + dxy + ex^2 + fy^2, [a, b, c, d, e, f]).$$

Результатом вычислений файлов явились полученные коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= -258487739462069/5672598922550000; \\ b &= -20727504929/428120673400; \\ c &= 4155408673513/283629946127500; \\ d &= 34293710351/56725989225500; \\ e &= -2106451741/9261385996000; \\ f &= -12517598467/2025928186625. \end{aligned}$$

Выполненный перевод натуральных дробей в десятичные с последующей обработкой полученных значений на адекватность позволил получить математическую модель следующего вида:

$$Z(x, y) = -0,04557 - 4,84151 \cdot 10^{-4}x + 0,01465y + 6,04550 \cdot 10^{-4}xy + (-2,274445468431807) \cdot 10^{-4}x^2 + (-0,006178698015872471) \cdot y^2. \quad (1)$$

Математическая модель была визуализирована посредством файла wxplot 3d (рис. 3).

Для анализа по представленной поверхности отклика выполнено построение линий уровня (рис. 4).



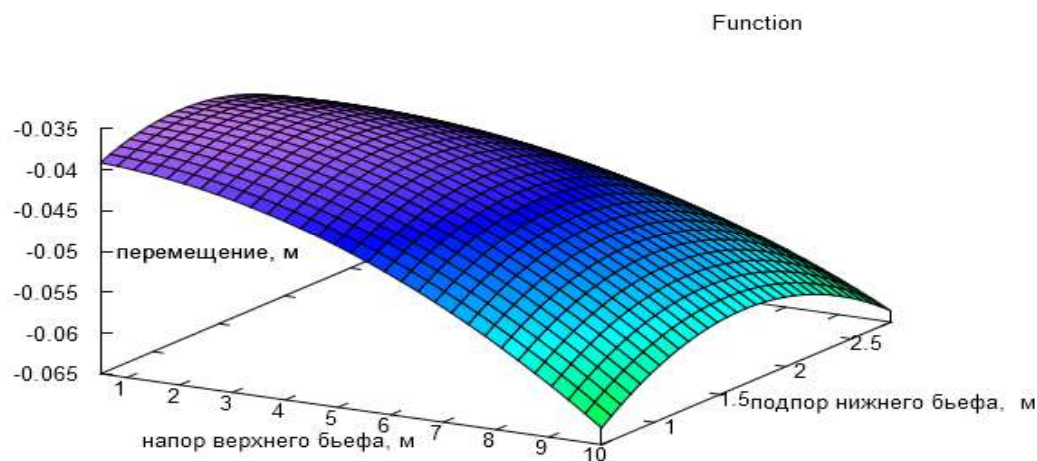


Рис. 3. Визуализированный вид математической модели

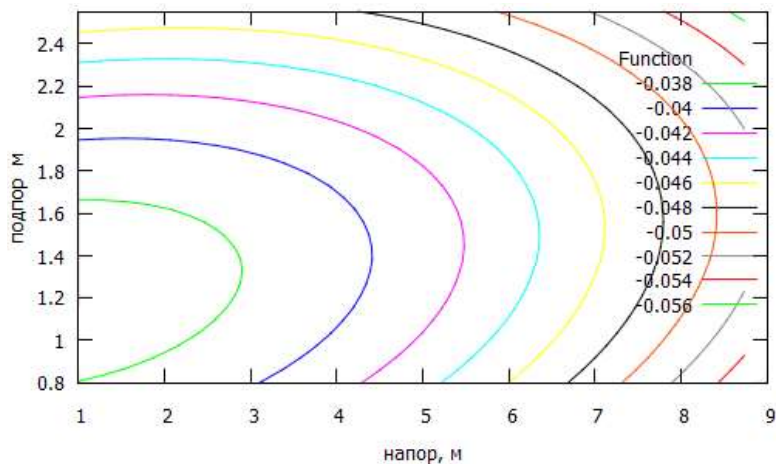


Рис. 4. Линии уровня по поверхности отклика

Анализ графиков линий уровня по поверхности отклика позволяет констатировать, что функция отклика, то есть перемещение основания плотины, происходит от $-0,038$ м до $-0,056$ м. При этом изменение напора в верхнем бьефе плотины отражается на перемещении основания плотины не линейно во всем диапазоне изменения аргумента от 1,0 и до 10,0 м, и чем больше напор в верхнем бьефе, тем больше перемещение основания плотины. Изменение подпора со стороны нижнего бьефа на плотину, в диапазоне изменения аргумента от 0,8 до 2,55 м линейно и незначительно.

Канонический вид исследования математических уравнений предполагает выведение одного из аргументов на постоянный уровень при варьировании другим. Рассмотрим поведение функции при постоянных параметрах подпора со стороны нижнего бьефа плотины, то есть при $F1(x, 0.6)$; $F2(x, 1.8)$; $F3(x, 2.8)$. Имеем следующие уравнения, графический вид которых приведен на рис. 5:

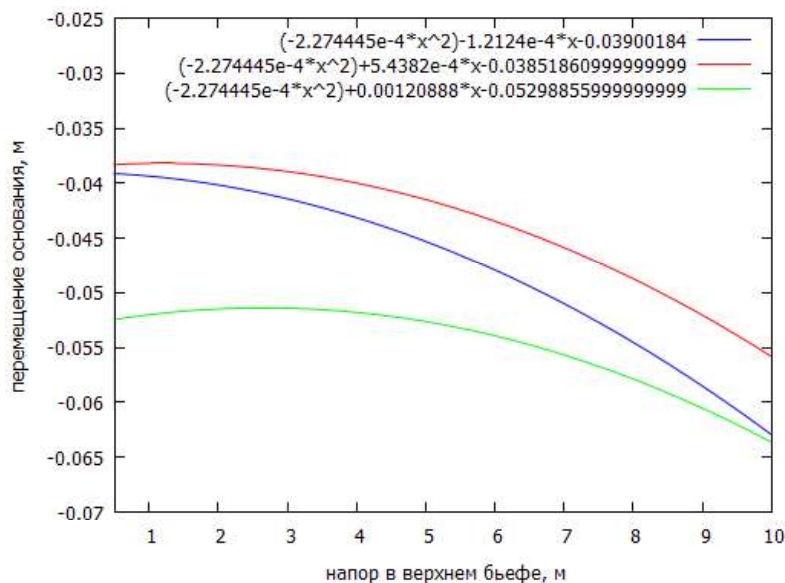


Рис. 5. Перемещение основания плотины в зависимости от напора в верхнем бьефе и постоянных значениях подпора со стороны нижнего бьефа – 0,6; 1,8 и 2,8 м





$$F1(x) = -2,274445 \cdot 10^{-4}x^2 - 1,2124 \cdot 10^{-4}x - 0,03900184; \quad (2)$$

$$F2(x) = -2,274445 \cdot 10^{-4}x^2 + 5,4382 \cdot 10^{-4}x - 0,03851861; \quad (3)$$

$$F3(x) = -2,274445 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,00120888x - 0,05988558. \quad (4)$$

Рассмотрим функцию при постоянных параметрах напора со стороны верхнего бьефа плотины, то есть при $F1(1.0, y)$; $F2(5.0, y)$; $F3(10.0, y)$. Имеем следующие уравнения, графический вид которых приведен на рис. 6:

$$F1(x) = -0,00618x^2 - 0,01525455x - 0,044858405; \quad (5)$$

$$F2(x) = -0,00618x^2 + 0,01767275x - 0,037463125; \quad (6)$$

$$F3(x) = -0,00618x^2 + 0,0206955x + 0,017984. \quad (7)$$

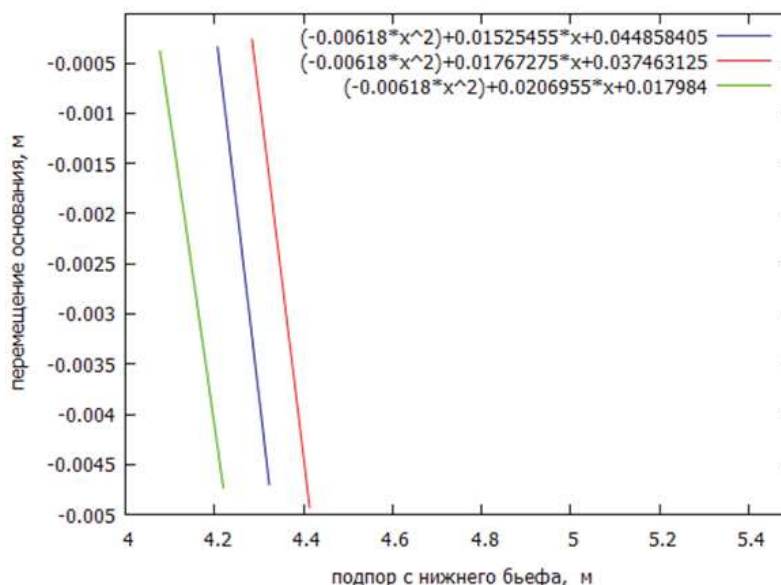


Рис. 6. Перемещение основания плотины в зависимости от подпора со стороны нижнего бьефа и постоянных значениях напора в верхнем бьефе – 1,0; 5,0 и 10,0 м

Заключение. Анализ представленных уравнений и графиков позволяет сделать вывод, что при постоянных параметрах подпора со стороны нижнего бьефа плотины, наибольшее перемещение основания плотины будет при наибольшем подпоре по нижнему бьефу равному 2,8 м, наименьшее перемещение основания плотины будет при значении подпора со стороны нижнего бьефа равного 1,8 м, промежуточные значения перемещений основания плотины между уже приведенными значениями, будет при подпоре со стороны нижнего бьефа равному 0,6 м. При этом с увеличением напора в верхнем бьефе перемещение основания плотины будет в основном увеличиваться. При постоянных параметрах напора в верхнем бьефе плотины, анализа полученной математической модели, дополнительных уравнений и графиков при изменении подпора со стороны нижнего бьефа плотины в исследуемом диапазоне показывает, что, во-первых, в указанном диапазоне исследований аргумента подпора с нижнего бьефа от 0,6 до 2,55 м практически никакого влияния на перемещение основания плотины нет; во-вторых графо-аналитический поиск значений влияния подпора с нижнего бьефа на перемещение основания плотины позволил выявить значения данного аргумента, начинающегося с 4 м и более, но эти значения вне диапазона эксперимента, в виду отсутствия их связи с реальностью. При этом аналитические расчеты показывают, что значения перемещений основания плотины минимальны и составляют от 0,0005 до 0,005 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтярева О. Г., Дегтярев В. Г. Системы регулирования стока атмосферных осадков на Черноморском побережье Краснодарского края. Краснодар, 2018. 124 с.
2. Дегтярева О. Г., Дегтярев В. Г. Плотины в системе регулирования стока атмосферных осадков на Черноморском побережье Краснодарского края. Краснодар, 2018. 163 с.
3. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : The International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development» (CATPID-2019). 2019. Vol. 698. 022060.
4. Abdrazakov F. K., Orlova S. S., Pankova T. A., Mirkina E. N., Fedyunina T. V. The monitoring of condition of hydraulic structures // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. T. 10. № 13. P. 1952–1958.
5. Khashirova T. Yu., Ksenofontov, A.S., Edgulova, E.K., Lamerdonov Z. G., Nartokov, H.S. Information Technologies at the Choice of an Optimum Bank Protection Structures for Highways in Emergency Situations // Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2018 this link is disabled. 2018. P. 10–13. – 8524978.



6. Khashirova T. Yu., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. The influence analysis of the structures and applied software systems' soil foundations design models // International conference on Construction and Architecture : Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020). 2020. Vol. 913. 022050.

7. Дегтярева О. Г. Исследование жесткостных характеристик гравитационной и контрфорсной плотин посредством анализа собственных колебаний // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 63. С. 169–177.

8. Дегтярева О. Г. Математический анализ контрфорсной плотины при термических воздействиях как части системы регулирования стока атмосферных осадков // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 62. С. 165–171.

9. Дегтярева О. Г., Дегтярев В. Г., Найденев С. Ю. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений с учетом работы конструкций за пределом упругости // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 1(33). С. 92–108. Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=584&id=591>. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-92-108.

10. Пат. 2452816 Российская Федерация, МПК E02D17/20. Противооползневое сооружение / Дегтярев В. Г., Коженко Н. В., Дегтярев Г. В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). – № 2010143052; заявл. 20.10.2010; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16.

11. Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В. Теоретический анализ и экспериментальные исследования адаптивного датчика регулятора расхода воды // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 3 (36). С. 300–303.

12. Lamerdonov Z. G., Khashirova T. Yu., Zhaboev S.A., Shogenov A. A., Lamerdonov K. Z. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems // Ecology and Industry of Russia *this link is disabled*. 2021. Vol. 25 (7). P. 8–12.

13. Olgarenko V. I., Khashirova T. Yu., Kozhenko N. V. Assessment of the damage impact to particular water structures on their performance // International conference on Construction and Architecture : Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020). 2020. Vol. 913. 022054.

14. Дегтярева О. Г., Найденев С. Ю., Дацьо Д. А. Исследование влияния гидродинамического давления на конструкции гидротехнических сооружений, расположенных в зоне повышенной сейсмической активности // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. №2 (65). С. 138–144.

REFERENCES

1. Degtyareva O. G., Degtyarev V. G. Precipitation runoff control systems on the Black Sea coast of Krasnodar region. Krasnodar, 2018. 124 p. (In Russ.).

2. Degtyareva O. G., Degtyarev V. G. Dams in the system of regulation of precipitation runoff on the Black Sea coast of Krasnodar region. Krasnodar, 2018. 163 p.

3. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : The International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development» (CATPID-2019)*. 2019; 698: 022060.

4. Abdrazakov F. K., Orlova S. S., Pankova T. A., Mirkina E. N., Fedyunina T. V. The monitoring of condition of hydraulic structures. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018; 10; 13: 1952–1958.

5. Khashirova T. Yu., Ksenofontov A.S., Edgulovala E.K., Lamerdonov Z. G., Nartokov H.S. Information Technologies at the Choice of an Optimum Bank Protection Structures for Highways in Emergency Situations. *Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2018* *this link is disabled*. 2018: 10–13: 8524978.

6. Khashirova T. Yu., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. The influence analysis of the structures and applied software systems' soil foundations design models. *International conference on Construction and Architecture: Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020)*. 2020; 913: 022050.

7. Degtyareva O. G. Investigation of the stiffness characteristics of gravity and buttress dams by analyzing their own vibrations. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2016; 63: 169–177.

8. Degtyareva O. G. Mathematical analysis of a buttress dam under thermal influences as part of a precipitation flow control system. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2016; 62: 165–171.

9. Degtyareva O. G., Degtyarev V. G., Najdenov S. Yu. Seismic resistance of hydraulic structures taking into account the work of structures beyond the elastic limit. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2019; 1(33): 92–108. – Access mode: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=584&id=591>. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-92-108.

10. Patent 2452816 Russian Federation, MPK E02D17/20. Anti-landslide structure / Degtyarev V. G., Kozhenko N. V., Degtyarev G. V.; applicant and patent holder Kuban State Agrarian University (RU). – № 2010143052; statement 20.10.2010; published 10.06.2012, Bulletin № 16.

11. Degtyarev V. G., Degtyarev G. V. Theoretical analysis and experimental studies of the adaptive sensor of the water flow regulator. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2012; 3 (36): 300–303.

12. Lamerdonov Z. G., Khashirova T. Yu., Zhaboev S.A., Shogenov A. A., Lamerdonov K. Z. Resource-saving technologies and some proposals for the creation of automated reclamation systems. *Ecology and Industry of Russia* *this link is disabled*. 2021; 25 (7): 8–12.

13. Olgarenko V. I., Khashirova T. Yu., Kozhenko N. V. Assessment of the damage impact to particular water structures on their performance. *International conference on Construction and Architecture : Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020)*. 2020; 913: 022054.

14. Degtyareva O. G., Najdenov S. Yu., Datsyo D. A. Investigation of the influence of hydrodynamic pressure on the structures of hydraulic structures located in the zone of increased seismic activity. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2017; 2 (65): 138–144.

*Статья поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 22.02.2022; принята к публикации 30.02.2022.
The article was submitted 10.01.2022; approved after reviewing 22.02.2022; accepted for publication 30.02.2022.*