ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):5-15
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622'17:004.9 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_5

# ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Н.А. Калашник**

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru

***Аннотация:*** На примере хвостохранилища одного из горнопромышленных предприятий Кольского полуострова выполнены модельные исследования фильтрационной устойчивости его ограждающей дамбы. Для этого была создана гидрогеомеханическая 3D модель, отражающая геометрические размеры, геомеханические и гидравлические условия работы дамбы. Отличительной особенностью разработанной модели являлась возможность интегрирования инженерно-геологических, геомеханических и гидрогеологических условий, что позволило наряду с геомеханическими расчетами (смещения грунтов), выполнить и гидравлические (градиент напора и выход дренирующейся воды). С использованием Plaxis 3D выполнены расчеты по сценариям степени заполнения хвостохранилища водой вследствие повышенных технологических сбросов промышленных вод или паводкового затопления. По результатам моделирования выполнены оценки геомеханического (смещения грунтов) и гидравлического (градиенты напора) состояний дамбы, а также выявлены закономерности формирования депрессионной поверхности дренирующейся сквозь тело дамбы воды и выхода ее на дневную поверхность. Определены зависимости градиента напора и коэффициента устойчивости от уровня воды в хвостохранилище по принятым сценариям. Проведен сравнительный анализ рассчитанных значений градиента напора и коэффициента устойчивости с критериальными для гидротехнического сооружения 1 класса. Выполнена оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища для рассмотренных условий в зависимости от изменения уровня воды в хвостохранилище. Примененный методический подход предоставляет научно-техническую основу для оценки фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы конкретного горнопромышленного хвостохранилища, с учетом его геомеханических и гидравлических условий.

***Ключевые слова:*** хвостохранилище, ограждающая дамба, гидрогеомеханическое 3D моделирование, градиент напора, фильтрационная устойчивость.

***Для цитирования:*** *Калашник Н. А.* Оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища на основе гидрогеомеханического 3D моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_5.

## Assessment of filtration stability of tailings dam on the basis of hydrogeomechanical 3D modeling

**N.A. Kalashnik**

Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru

© Н.А. Калашник. 2022.

***Abstract:*** On the example of the tailings dump of one of the mining enterprises of the Kola Peninsula, model studies of the filtration stability of its enclosing dam were carried out. For this, a hydrogeomechanical 3D model was created, reflecting geometric dimensions, geomechanical and hydraulic conditions of the dam. A distinctive feature of the developed model was the possibility of integrating engineering-geological, geomechanical and hydrogeological conditions, which made it possible, along with geomechanical calculations (soil displacements), to perform hydraulic (head gradient and drainage water outlet). Using Plaxis 3D, calculations were made based on scenarios of the degree of filling of the tailings storage with water due to increased technological discharges of industrial water or flood flooding. Based on the results of modeling, estimates were made of the geomechanical (soil displacement) and hydraulic (head gradients) conditions of the dam, as well as patterns of formation of the depressive surface of the water draining through the body of the dam and its exit to the daytime surface were revealed. Dependencies of head gradient and stability coefficient on the water level in the tailings storage are determined according to the accepted scenarios. A comparative analysis of the calculated values of head gradient and stability coefficient was carried out with criteria for a hydraulic-technical structure of class 1. The filtration stability of the tailings dam was evaluated for the considered conditions depending on the change in the water level in the tailings storage. The applied methodological approach provides a scientific and technical basis for assessing the filtration stability of the enclosing dam of a particular mining tailings dump, taking into account its geomechanical and hydraulic conditions.

***Key words:*** tailings storage, tailings dam, hydrogeomechanical 3D modeling, head gradient, filtration stability.

***For citation:*** Kalashnik N. A. Assessment of filtration stability of tailings dam on the basis of hydrogeomechanical 3D modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_5.

## Введение

Хранилища жидких промышленных отходов (хвостохранилища) горнодобывающего производства представляют собой сложные гидротехнические системы. Для обеспечения хранения отходов и снижения их воздействия на окружающие природные системы сооружаются насыпные ограждающие дамбы [1 — 8]. Функциональность ограждающей дамбы определяется ее прочностью и фильтрационной устойчивостью [1, 3, 5, 7 — 9]. Обеспечение функциональности дамбы оказывает существенное влияние как на состояние и существование горнопромышленного хвостохранилища, так и на промышленную и экологическую безопасность региона [5, 7, 8].

Исследованиям фильтрационно-деформационных процессов, происходящим в ограждающей дамбе хвостохранилища и определяющим ее функционал, уделяется большое внимание [9 — 20]. При этом основными задачами исследований в целях обеспечения фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища являются:

- контроль гидростатического давления в теле дамбы и ее основания;
- оценка условий формирования режима грунтовых вод в гидротехнической системе «хвостохранилище — ограждающая дамба — подстилающее основание»;
- прослеживание изменения уровней дренирующихся вод во времени;

• оценка характера и динамики взаимовлияния эксплуатации хвостохранилища и дренирующихся вод в теле ограждающей дамбы, в том числе масштабов и причин повышенного обводнения грунтов и формирования фильтрационных потоков.

Анализ опубликованных работ показывает, что полученные результаты имеют как научное, так и практическое значение [5, 7, 17].

Целью данной работы являлось формирование методического подхода к оценке фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища на основе гидрогеомеханического 3D моделирования (на примере одного из горнодобывающих предприятий Кольского региона). Исследования будут затрагивать одну из актуальнейших научно-прикладных проблем в области применения технологий цифрового дублирования технологических объектов и процессов для управления сложными социотехническими системами.

Достижение цели позволит создать научно-техническую основу для оценки фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы конкретного горнопромышленного хвостохранилища, с учетом его геомеханических и гидравлических условий.

Кроме того, в результате выполнения исследований, будут развиты и дополнены наработки для создания цифрового двойника (цифрового образа) хвостохранилища горнопромышленного предприятия как сложной открытой природно-технической системы.

**Методы и подходы**

Основные методы и подходы в работе заключались в построении гидрогеомеханической 3D модели фрагмента природно-технической системы «хвостохранилище — ограждающая дамба — подстилающее основание» и исследование формирующихся фильтрационно-деформационных процессов при различных гидравлических условиях.

Для создания модели использовалась данные инженерно-геологических, гидрогеологических и геотехнических исследований (на примере хвостохранилища одного из горнопромышленных предприятий Кольского полуострова) [5, 11]. Геометрические параметры модели и задаваемые физико-механические свойства и гидравлические условия подобны фактическим (рис. 1).

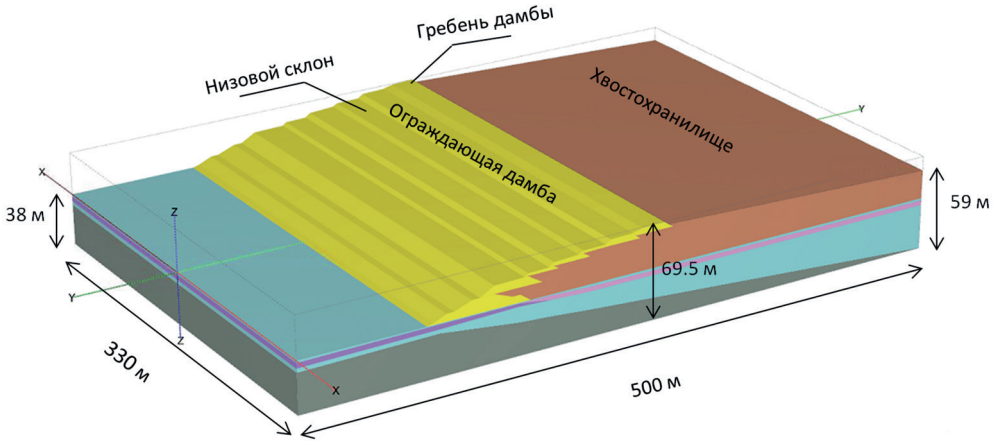


*Рис. 1. Геометрическая и расчетная 3D модель фрагмента хвостохранилища*
*Fig. 1. Geometric and design 3D model of the tailings storage fragment*

***Параметры геомеханических и гидравлических характеристик, используемые для расчетов***
***Geomechanical and hydraulic parameters used for calculations***

| Параметры | | | Значения | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Название** | **Обозначение** | **Ед. измер.** | **Намывные отложения хвостохранилища** | **Ограждающая дамба** | **Геологическое основание** |
| Удельный вес сухого грунта | $\gamma_{unsat}$ | кН/м³ | 17,4 | 19,0 | 19,4 |
| Удельный вес влажного грунта | $\gamma_{sat}$ | кН/м³ | 20,6 | 22,0 | 20,0 |
| Коэффициент фильтрации по оси *x* | $k_x$ | м/сут | 1,3 | 0,4 | 0,14 |
| Коэффициент фильтрации по оси *y* | $k_y$ | м/сут | 1,3 | 0,4 | 0,14 |
| Коэффициент фильтрации по оси *z* | $k_z$ | м/сут | 1,3 | 0,4 | 0,14 |
| Модуль деформации | $E$ | кН/м² | 30 000 | 25 000 | 56 000 |
| Коэффициент Пуассона | $\nu$ | – | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| Сцепление | $c_{ref}$ | кН/м² | 5 | 2 | 20 |
| Угол внутреннего трения | $\varphi$ | град. | 38,5 | 25 | 39 |
| Угол дилатансии | $\psi$ | град. | 8,5 | 4,5 | 0 |

Построение расчетной 3D модели и моделирование включало в себя:

- геометризацию инженерно-геологического строения подстилающего геологического основания хвостохранилища, насыпных грунтов (обвалования) ограждающей дамбы, намывных хвостовых отложений;
- задание свойств грунтов и пород (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств);
- задание граничных условий и нагрузок от веса пород и воды;
- разбивку геометрической модели на конечные элементы, проведение компьютерного тестового моделирования (расчетов);
- проверку адекватности модели, исследование фильтрационно-деформационных процессов при различных гидравлических условиях.

Параметры геомеханических и гидравлических характеристик, принятые для расчетов, приведены в таблице. Для пород основания была использована модель Mohr Coulomb, для намывных отложений — модель Hardening Soil Small, для ограждающей дамбы — модель Hardening Soil [21]. Тип дренирования для всех грунтов и пород задавался Drained.

Отличительной особенностью разработанной 3D модели является возможность интегрирования геолого-геометрических (геологические и пространственные характеристики породных грунтов), геомеханических (механические свойства и действующие нагрузки) и гидрогеологических (гидростатические и гидродинамические параметры) условий. Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами (определение напряжений и деформаций в грунтах), выполнять и гидравлические (изменение уровня и давления дренирующейся воды, формирование зон повышенной фильтрации и развитие их во времени: формирование, изменения скорости и давления фильтрационного потока), а также следствие совместного воздействия (разжижение грунтов, снижение деформационных характеристик) [9, 11].

Гидравлические условия задавались для трех случаев заполнения чаши хвостохранилища водой (минимальный —

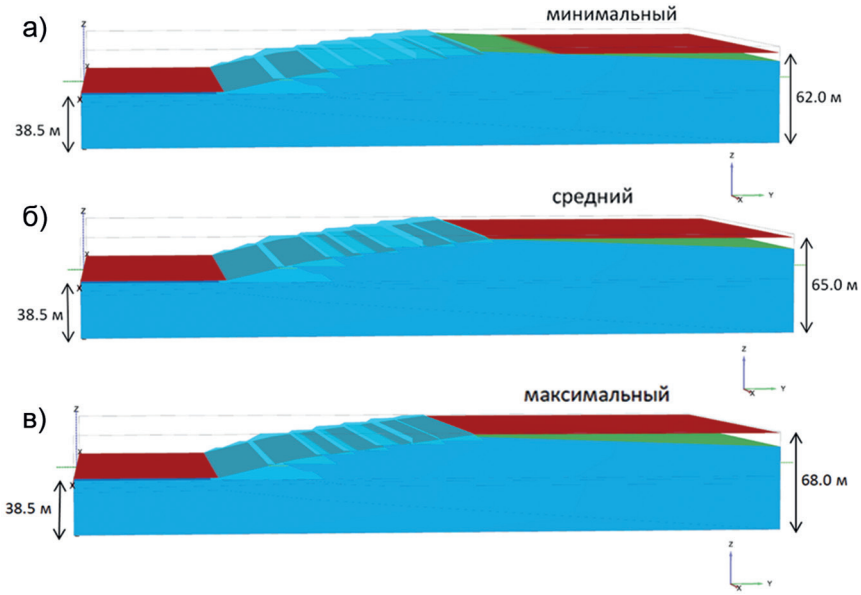


*Рис. 2. Созданные и смоделированные уровни воды в хвостохранилище для принятых сценариев: минимальный (а); средний (б); максимальный (в)*

*Fig. 2. Created and simulated water levels in tailings storage for accepted scenarios: minimum (a); medium (b); maximum (v)*

с учетом намывного пляжа прудка-отстойника, средний — без намывного пляжа, максимальный — максимальное заполнение чаши), с соответствующим формированием депрессионной поверхности воды в теле ограждающей дамбы и выходом на ее низовом склоне (рис. 2). Фильтрация генерировалась за счет гидростатического давления воды в прудке хвостохранилища, с основным направлением ортогонально оси дамбы.

Моделирование выполнено с использованием программного комплекса Plaxis 3D. Исследовалось влияние фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы на ее фильтрационную устойчивость.

Для оценки гидравлических условий и фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы в качестве критериальных условий предлагается использовать значения нормативного коэффициента устойчивости и критического усредненного градиента напора.

Согласно «СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения», значение нормативного коэффициента устойчивости $K_н$ принимается в соответствии с классом гидротехнического сооружения. Значения критического среднего градиента напора предлагается определять с использованием следующего выражения:

$$I_{кр.ср} = I_{ср.гр} / K_н \qquad (1)$$

где $I_{кр.ср}$ — критический средний градиент напора в теле дамбы, значения которого, согласно «СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85», необходимо нормировать по фильтрационным свойствам грунтов; $I_{ср.гр}$ — средний градиент напора, полученный по результатам гидрогеомеханического 3D моделирования деформационно-фильтрационных процессов в теле дамбы; $K_н$ — коэффициент устойчивости.

**Результаты**

По выполненным вариантам моделирования получены расчетные значения перемещений грунтов гребня ограждающей дамбы (рис. 3), а также гидравлического состояния и формирования депрессионной поверхности дренирующейся воды в теле дамбы (рис. 4).

На рис. 3. видно, что геомеханическое состояние исследуемой модели является удовлетворительным при всех рассмотренных уровнях заполнения хвостохранилища водой. Общие перемещения грунтов для всех случаев составляют около 70 мм и практически не изменяются для принятых расчетных случаев. Отличительным является то, что для минимального уровня перемещения локализуются на верховом склоне, а при повышении уровня — на гребне и низовом склоне дамбы.

Как следует из данных на рис. 4, дренирующаяся вода выходит на основание ограждающей дамбы только при минимальном уровне воды в хвостохранилище. Повышение уровня воды до среднего и максимального, прогнозно — по результатам моделирования, может привести к выходу дренажа на низовой склон дамбы.

Результаты оценки гидравлических условий и фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы приведены на рис. 5.

Для этого в качестве критериальных условий приняты значения: нормативного коэффициента устойчивости $K_н$ = 1,20 (для ГТС I класса, согласно «СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения») и усредненного градиента напора $I_{ср.up}$ = = 0,29.

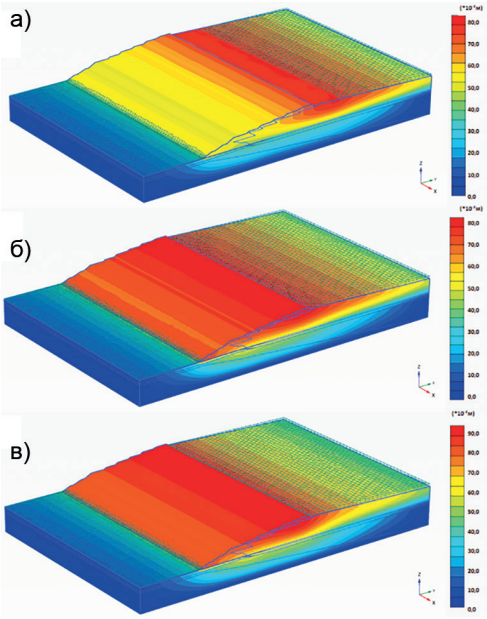


*Рис. 3. Геомеханическое состояние модели в картинах перемещений грунтов для принятых сценариев: минимальный (а); средний; (б) максимальный (в)*

*Fig. 3. Geomechanical state of the model in soil movement patterns for accepted scenarios: minimum (a); average (b); maximum (v)*

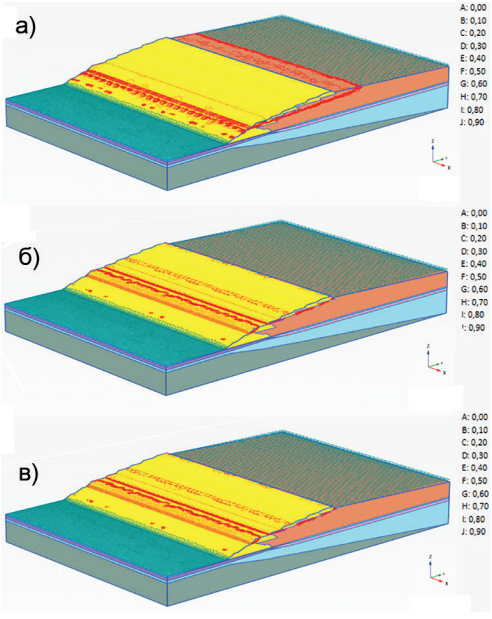


*Рис. 4. Закономерности гидравлического состояния и формирования депрессионной поверхности дренирующейся воды для принятых сценариев: минимальный (а); средний (б); максимальный (в)*

*Fig. 4. Regularities of hydraulic state and formation of depression surface of draining water for accepted scenarios: minimum (a); average (b); maximum (v)*

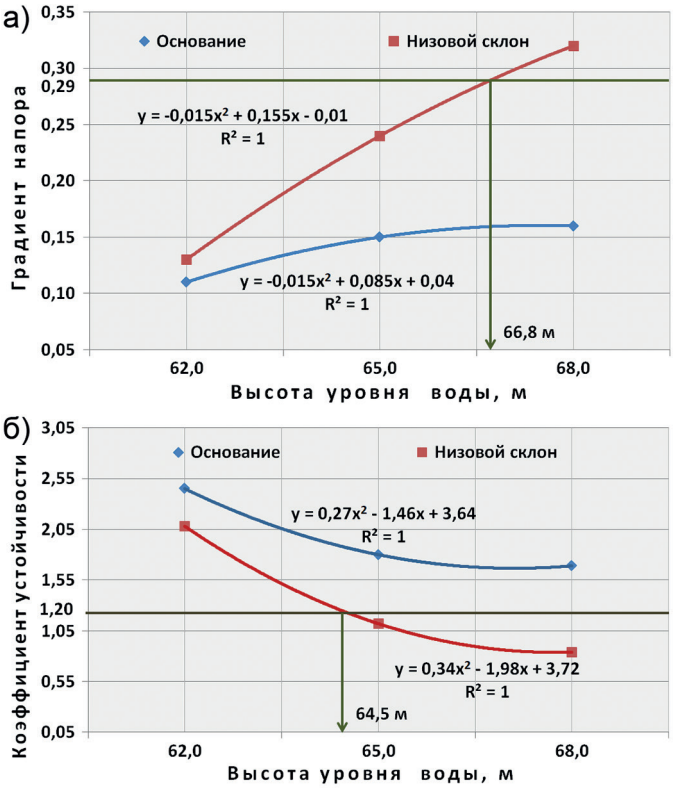


*Рис. 5. Зависимости модельных значений градиента напора (а) и коэффициента устойчивости (б) для случаев выхода дренирующейся воды на основание дамбы или на ее низовой склон*

*Fig. 5. Regularities of model values of head gradient (a) and stability coefficient (b) for cases of draining water release to the base of the dam or to its lower slope*

Значение критического усредненного градиента напора, с учетом I класса ГТС хвостохранилища, определено равным 0,29, согласно (1):

$$\frac{1}{K_н} I_{кр.ср.} = \frac{0,35}{1,20} = 0,29 \qquad (2)$$

Зависимости модельных значений градиента напора (рис. 5, *а*) и коэффициента устойчивости (рис. 5, *б*) определены для случаев выхода дренирующейся воды на основание дамбы или на ее низовой склон. Все зависимости подчиняются полиномиальному распределению с максимальным коэффициентом аппроксимации $R^2 = 1$. Значения градиента напора с положительным ростом составляют от 0,11 до 0,32, а коэффициент устойчивости снижается от 2,50 до 0,80.

**Обсуждение**

В результате выполненных исследований установлено, что фильтрационная устойчивость дамбы в значительной степени определяется местом выхода дренирующейся воды (формирующейся в теле ограждающей дамбы депрессионной поверхности).

В случае выхода воды на основание градиент напора возрастает незначительно от 0,11 (минимальный уровень) до 0,16 (максимальный). При этом коэффициент устойчивости снижается от 2,50 до 1,60, соответственно. Критические

значения, как градиента напора, так и коэффициента устойчивости, при выходе воды на основание дамбы, не достигаются.

В случае выхода воды на низовой склон дамбы градиент напора возрастает уже значительно: от 0,13 (минимальный уровень) до 0,32 (максимальный). Критическое значение достигается при уровне воды на отметке примерно посередине между средней и максимальной (высота воды около 66,8 м). Коэффициент устойчивости резко снижается от 2,06 до 0,80, достигая критического значения при уровне воды примерно 0,8 от среднего (высота воды около 64,5 м). Из этого следует, что при превышении уровня воды высоты 64,5 м создадутся неблагоприятные для фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы условия.

**Заключение**

Выполненное гидрогеомеханическое 3D моделирование фильтрационно-деформационных процессов фрагмента хвостохранилища при различной степени его заполнения позволило выявить соответствующие особенности геомеханического (смещения грунтов) и гидравлического (градиенты напора) состояния ограждающей дамбы.

На основе полученных результатов выявлены закономерности формирования депрессионной поверхности дренирующейся сквозь тело дамбы воды с выходом на ее основание или на низовой склон.

Выполнена оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы посредством сравнительного анализа рассчитанных значений градиента напора и коэффициента устойчивости с критериальными для гидротехнических сооружений 1 класса.

Выявлено, что рассчитанные значения градиента напора практически повсеместно ниже критического, за исключением случая максимального уровня воды в хвостохранилище и выхода депрессионной поверхности на низовой склон. Рассчитанные значения коэффициента устойчивости существенно выше нормативного при условии выхода дренирующейся воды на основание ограждающей дамбы. При выходе воды на низовой склон критические значения коэффициента устойчивости достигаются при приближении высоты уровня воды к среднему. Следовательно, фильтрационная устойчивость ограждающей дамбы хвостохранилища не будет обеспечиваться при повышении уровня воды в хвостохранилище выше принятого среднего сценария.

Примененный методический подход предоставляет научно-техническую основу для оценки фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы конкретного горнопромышленного хвостохранилища, с учетом его геомеханических и гидравлических условий.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Lèbre É., Corder G. D., Golev A.* Sustainable practices in the management of mining waste. A focus on the mineral resource // Minerals Engineering. 2017, vol. 107, pp. 34—42. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.004.

2. *Segura-Salazar J., Lima F. M., Tavares L. M.* Life Cycle Assessment in the minerals industry: Current practice, harmonization efforts, and potential improvement through the integration with process simulation // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 232, pp. 174—192. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.318.

3. *Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S.* The state of environmental sustainability considerations in mining // Journal of Cleaner Production. 2018, vol. 182, pp. 969—977. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.051.

4. *Tailings* dams risk of dangerous occurrences. International commission on large dams. Paris, 2001. Bulletin no. 121, 145 p.

5. *Калашник А. И.* Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 101—106. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.

6. *Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, Jing Cao* A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // Advances in Civil Engineering. 2019, vol. 2019, article 4159306. URL: https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/ (дата обращения: 22.03.2022). DOI: 10.1155/2019/4159306.

7. *Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J.* Mining in the Arctic environment. A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives // Journal of Environmental Management. 2019, vol. 233, pp. 832—844. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.124.

8. *Ковлеков И. И.* Безопасность гидротехнических сооружений при эксплуатации месторождений на Севере // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 7. — С. 154—164. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_154.

9. *Калашник Н. А.* Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации // Вестник КНЦ РАН. — 2019. — № 2(11). — С. 69—74. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74.

10. *Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S.* Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 249—289. DOI: 10.47260/jesge/1117.

11. *Калашник Н. А.* 4D компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S37. — С. 393—400. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-393-400.

12. *Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A.* Integrated multi-level geofluidmechanics monitoring system for mine waterworks. // Eurasian Mining. 2018, no. 2, pp. 7—10. DOI: 10.17580/em.2018.02.02.

13. *Kalashnik N., Giliarova A., Kalashnik A.* Research of influence of the zone of the increased filtration on reliability of the store of liquid industrial wastes // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018, vol. 18, book 1.2., pp. 609—614. DOI: 10.5593/sgem2018/1.2/S02.077.

14. *Fazio S., Castellani V., Sala S., Schau E., Secchi M., Zampori L.* Supporting information to the characterization factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods: New methods and differences with ILCD. 2018. DOI: 10.2760/671368.

15. *Lassin A., Thiéry D., Blanc P., Guignot S.* Estimating potential releases from mine tailings: insights from reactive transport modelling. Final Report. BRGM/RP-70601-FR, 2021, 81 p. URL: http://infoterre.brgm.fr/rechercher/switch.htm?scope=9.

16. *Muniruzzaman M., Karlsson T., Ahmadi N., Role M.* Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples Appl // Geochemistry. 2020, vol. 120, article 104677. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104677.

17. *Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Røberg S.* Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine. A case study in Northern Norway // Journal of Cleaner Production. 2017, vol. 164, pp. 892—904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.021.

18. *Tao M., Zhang X., Wang S., Cao W., Jiang Y.* Life cycle assessment on lead-zinc ore mining and beneficiation in China // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 237, article 117833. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117833.

19. *Abramov N. N., Dyakov A. Y., Kalashnik A. I.* Identification of water-saturated zones in a protective hydraulic earthen structure by synchronous electromagnetic and seismic sounding // Power Technology and Engineering. 2019, vol. 53, no. 2, pp. 167 — 171. DOI: 10.1007/s10749-019-01055-3.

20. *Muller S., Lassin A., Lai F., Thiéry D., Guignot S.* Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modeling // Minerals Engineering. 2022, vol. 180, no. 6, article 107481. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107481.

21. *Obrzud R. F., Truty A.* The hardening soil model — a practical guidebook. Revised 21.10.2018. 2018, 216 p. URL: http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf (дата обращения: 17.04.2022). ГИАБ

## REFERENCES

1. Lèbre É., Corder G. D., Golev A. Sustainable practices in the management of mining waste. A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 107, pp. 34 — 42. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.004.

2. Segura-Salazar J., Lima F. M., Tavares L. M. Life Cycle Assessment in the minerals industry: Current practice, harmonization efforts, and potential improvement through the integration with process simulation. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 232, pp. 174 — 192. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.318.

3. Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S. The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 182, pp. 969 — 977. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.051.

4. *Tailings dams risk of dangerous occurrences*. International commission on large dams. Paris, 2001. Bulletin no. 121, 145 p.

5. Kalashnik A. I. Integrated research and monitoring of mine tailings on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 101 — 106. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.

6. Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, Jing Cao A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, article 4159306, available at: https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/ (accessed 22.03.2022). DOI: 10.1155/2019/4159306.

7. Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment. A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2019, vol. 233, pp. 832 — 844. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.124.

8. Kovlekov I. I. Safety of hydraulic structures in mining in the North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 154 — 164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_154.

9. Kalashnik N. A. Assessment of reliability of a bulk soil dam during formation of an increased filtration zone in its body. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019, no. 2(11), pp. 69 — 74. [In Russ]. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74.

10. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering.* 2020, vol. 11, no. 1, pp. 249 — 289. DOI: 10.47260/jesge/1117.

11. Kalashnik N. A. 4D computer modelling of filtration-deformation processes in a protective tailing dam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S37, pp. 393 — 400. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-393-400.

12. Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Integrated multi-level geofluidmechanics monitoring system for mine waterworks. *Eurasian Mining*. 2018, no. 2, pp. 7 — 10. DOI: 10.17580/em.2018.02.02.

13. Kalashnik N., Giliarova A., Kalashnik A. Research of influence of the zone of the increased filtration on reliability of the store of liquid industrial wastes. *18th International Mul-*

*tidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2018, vol. 18, book 1.2., pp. 609 – 614. DOI: 10.5593/sgem2018/1.2/S02.077.

14. Fazio S., Castellani V., Sala S., Schau E., Secchi M., Zampori L. *Supporting information to the characterization factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods: New methods and differences with ILCD*. 2018. DOI: 10.2760/671368.

15. Lassin A., Thiéry D., Blanc P., Guignot S. *Estimating potential releases from mine tailings: insights from reactive transport modelling*. Final Report. BRGM/RP-70601-FR, 2021, 81 p. URL: http://infoterre.brgm.fr/rechercher/switch.htm?scope=9.

16. Muniruzzaman M., Karlsson T., Ahmadi N., Role M. Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples Appl. *Geochemistry*. 2020, vol. 120, article 104677. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104677.

17. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Røberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine. A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 164, pp. 892 – 904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.021.

18. Tao M., Zhang X., Wang S., Cao W., Jiang Y. Life cycle assessment on lead-zinc ore mining and beneficiation in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 237, article 117833. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117833.

19. Abramov N. N., Dyakov A. Y., Kalashnik A. I. Identification of Water-Saturated Zones in a Protective Hydraulic Earthen Structure by Synchronous Electromagnetic and Seismic Sounding. *Power Technology and Engineering*. 2019, vol. 53, no. 2, pp. 167 – 171. DOI: 10.1007/s10749-019-01055-3.

20. Muller S., Lassin A., Lai F., Thiéry D., Guignot S. Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modeling. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 180, no. 6, article 107481. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107481.

21. Obrzud R. F., Truty A. *The hardening soil model — a practical guidebook*. Revised 21.10.2018. 2018, 216 p, available at: http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf (accessed 17.04.2022).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Калашник Надежда Анатольевна* — научный сотрудник,
Горный институт Кольского научного центра РАН,
e-mail: n.kalashnik@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7651-6562.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*N.A. Kalashnik*, Researcher, Mining Institute,
Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7651-6562.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 25.10.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 25.10.2022; accepted for printing 10.11.2022.