Научная статья
УДК 627.824.7:624.131.6

ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ХВОСТОВ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ХВОСТОХРАНИЛИЩА С КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ДАМБОЙ

М.П. Саинов[1,*], А.А. Зузов[1], Ф.В. Котов[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Аннотация. Хвостохранилища, образованные каменно-набросными дамбами, выполняют с герметичным негрунтовым противофильтрационным экраном. Однако такие сооружения не являются полностью водонепроницаемыми, т.к. фильтрат может поступать в нижний бьеф через основание и образовывать депрессионную кривую в упорной призме. С помощью численного моделирования нами было изучено, как влияет на депрессионную кривую водопроницаемость хвостов и основания. Расчёты выполнялись на примере абстрактной дамбы высотой 60 м, использовался вычислительный программный комплекс MIDAS. Коэффициент фильтрации хвостов варьировался от 0,24 до 1,5 м/сут. Были рассмотрены два случая – экран дамбы является герметичным и экран вышел из строя. Исследование показало, что массив хвостов выполняет роль противофильтрационного экрана, но высокая проницаемость основания способствует проникновению фильтрата в тело дамбы.

Ключевые слова: *хвостохранилище; каменно-набросная дамба; фильтрация; коэффициент фильтрации; численное моделирование.*

Для цитирования: Саинов М.П., Зузов А.А., Котов Ф.В. Влияние проницаемости хвостов на фильтрационный режим хвостохранилища с каменно-набросной дамбой // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12. № 1. С. 50–58.

Original article

EFFECT OF PERMEABILITY OF TAILINGS ON SEEPAGE REGIME OF TAILINGS STORAGE FACILITY WITH ROCKFILL DAM

M.P. Sainov[1,*], A.A. Zuzov[1], F.V. Kotov[2]

[1] National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Abstract. Tailings storage facilities formed by rockfill dams are constructed with a water-proof non-soil seepage control face. However, such structures are not fully water-proof, because infiltrate may enter the downstream part through the foundation and create a depression curve in the shell. With the aid of numerical modeling we studied the effect of tailing and foundation permeability on the position of the depression curve. Computations were performed on the example of an abstract dam 60 m high with use of software package MIDAS. Seepage coefficient of tailing varied from 0.24 to 1.5 m/day. Two alternatives were considered: when the dam face was water-proof and when the face failed. The study showed that the tailing mass fulfils the role of the seepage

control face, but high permeability of the foundation contributes to ingress of infiltrate into the dam body.

Key words: *tailings storage facility; rockfill dam; seepage; permeability coefficient; numerical modeling.*

For citation: Sainov M.P., Zuzov A.A., Kotov F.V. Effect of permeability of tailings on seepage regime of tailings storage facility with rockfill dam. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. Vol. 12, No. 1, pp. 50–58.

Введение

Хранилища жидких отходов горной промышленности (хвостохранилища, шламонакопители, золоотвалы) могут являться опасными объектами. В XXI веке на объектах этого типа произошло несколько крупных аварий, имевших катастрофические последствия: BaiaMare (Румыния, 30 января 2000 г.), Ajka (4 октября 2010 г., Венгрия), Sotkamo (4 ноября 2012 г., Финляндия), Mount Polley (4 августа 2014 г., Канада), Bento Rodrigues (5 ноября 2015 г., Бразилия), Brumadinho (25 января 2019 г, Бразилия), Jagersfontein (11 сентября 2022 г., ЮАР), Sino-Metals Leach Zambia (18 февраля 2025 г., Замбия).

Безопасность хранилищ жидких отходов во многом зависит от фильтрационного режима их ограждающих дамб. По данным [1] и [2] как минимум три аварии ограждающих дамб, произошедшие за период с 2000 г., стали следствием негативного воздействия фильтрационного потока. Хорошо известна авария дамбы Stava в Италии (19 июля 1985 г.), одной из причин разрушения которой было нарушение работы дренажной системы [3].

В связи с этим проектирование и эксплуатация хранилищ жидких отходов требует исследований их фильтрационного режима. Об актуальности этой темы свидетельствуют статьи, опубликованные в последнее время [4-12].

Большинство из опубликованных работ посвящено изучению фильтрационного режима хвостохранилищ намывного типа, наращиваемых в сторону верхнего бьефа. В дамбах этого типа действует фильтрационный поток, который создаёт ряд угроз для безопасности сооружения. К таким угрозам относится не только опасность водной эрозии (суффозии), но и высокое положение депрессионной кривой, которое приводит к водонасыщению грунта и способствует потери устойчивости внешнего откоса дамбы. Публикации [4, 5, 11] посвящены исследованию положению депрессионной кривой в дамбе намывного хвостохранилища. В статьях [7, 8, 10] фильтрационные исследования выполнялись для оценки устойчивости сооружения. В [11] исследовано влияние проницаемости основания на высотное положение депрессионной кривой в намывном хранилище.

Меньше внимания уделяется изучению фильтрационного режима хранилищ наливного типа, наращивание которых осуществляться в сторону нижнего бьефа. Часто такие дамбы выполняются каменно-набросными и имеют противофильтрационный элемент в виде негрунтового экрана. Экран может выполняться из геосинтетических или битумных мембран, бентонитовых матов, бетона. Примером хвостохранилища с каменно-набросной дамбой является дамба Удоканского горно-металлургического комплекса (ГМК) [13].

Однако наличие экрана не ведёт к полному исключению фильтрации из хранилища. Часто в основании дамб не устраивают противофильтрационных завес, поэтому вода может проникать из хранилища через основание. При заполнении водой хвостохранилища Удоканского КМК в основании Западной дамбы были зафиксированы фильтрационные утечки. Для сбора атмосферных и фильтрационных вод на подошве дамб предусматривают дренаж, он также необходим для контроля герметичности его противофильтрационной защиты.

Частичный или полный выход из строя противофильтрационного экрана может представлять серьёзную угрозу для устойчивости дамбы, т.к. ведёт к водонасыщению

упорной призмы, к появлению фильтрационных сил. Поэтому при проектировании ограждающих дамб выполняют расчёты устойчивости и для этого аварийного случая.

В этой связи интерес представляет изучение фильтрационного режима каменно-набросных дамб для случаев нормальных условий эксплуатации и аварийного режима. Это стало целью этого исследования. Было решено изучить положение депрессионной кривой в упорной призме каменно-набросной дамбы для различных случаев, в зависимости от влияния двух факторов.

Первый фактор – это сохранность противофильтрационного экрана. Было решено рассмотреть два случая – полная герметичность экрана и полный выход его из строя.

Второй фактор – это водопроницаемость складируемого в хранилище материала. Анализ источников показал, что коэффициент фильтрации складируемых отходов может изменяться в широких пределах в зависимости от их крупности.

По данным [5] коэффициент фильтрации составляет: для глинистых отходов $5{,}74 \cdot 10^{-6}$ см/с, для пылеватых хвостов – $2{,}29 \cdot 10^{-4}$ см/с, для песчаных хвостов – $3{,}57 \cdot 10^{-4}$ см/с. В м/сут значения коэффициента фильтрации составляют соответственно 0,005, 0,20 и 0,31. В расчётном исследовании [4] для пылеватых хвостов коэффициент фильтрации принимался $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ (0,13 м/сут), а для песчаных – $3{,}7 \cdot 10^{-4}$ см/с (0,32 м/сут). В [8] коэффициент фильтрации песчаных хвостов принимался равным от $1{,}37 \cdot 10^{-3}$ от $3{,}89 \cdot 10^{-3}$ см/с, т.е. от 1,2 до 3,4 м/сут. В хвостохранилище Makeng в Китае экспериментально определено, что коэффициент фильтрации хвостов составляет около $6 \cdot 10^{-4}$ см/с, т.е. примерно 0,5 м/сут [7].

На основании этих данных наше исследование было решено выполнить для диапазона коэффициента фильтрации песчаных хвостов, крайние значения которых отличаются в 6 раз (0,24–1,5 м/сут).

Методы

Исследование выполнялось путём численного моделирования методом конечных элементов. Для этого использовался вычислительный программный комплекс MIDAS. Оно выполнялось на примере абстрактной дамбы высотой 60 м. Дамба выполнена из каменной наброски и имеет противофильтрационный экран из тонкой полиэтиленовой геомембраны. Заложение верхового откоса дамбы составляет 3, низового откоса – 2, ширина по гребню 10 м.

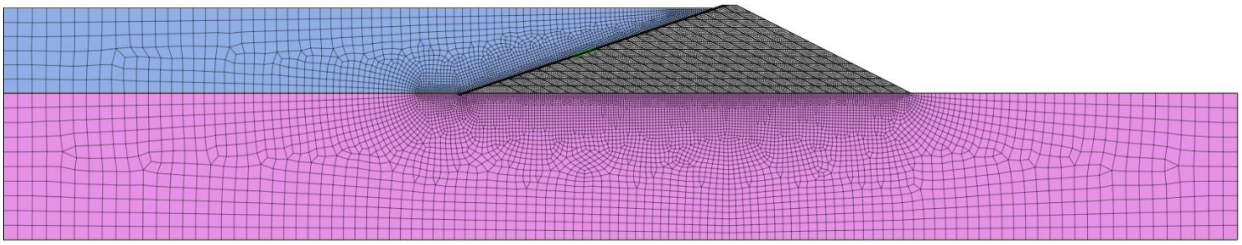


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель сооружения с противофильтрационным экраном

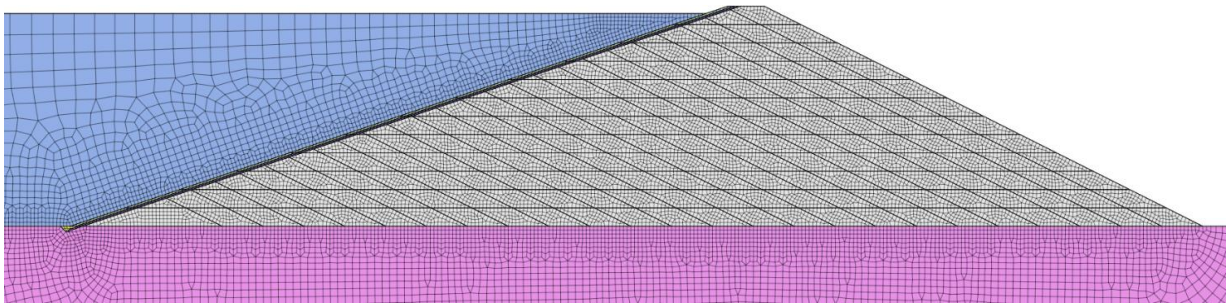


Рисунок 2 – Фрагмент конечно-элементной модели сооружения с противофильтрационным экраном

Геосинтетический экран защищён сверху и снизу слоем песчаного грунта толщиной 30 см каждый. В расчётную схему сооружения включалась сама дамба, объём хвостов и основание глубиной 60 м (рис. 1 и 2).

Расчёты выполнялись для двух случаев. Первый случай соответствует нормальным условиям эксплуатации – экран является полностью водонепроницаемым. Второй случай соответствует аварийной ситуации, когда экран полностью вышел из строя. Для каждого из случаев составлялась подробная конечно-элементная модель. Количество элементов в модели с экраном составило 20204, без экрана – 37819.

Расчёт был выполнен для случая стационарного фильтрационного режима при максимальном заполнении хранилища. Уровень верхнего бьефа принимался равным 58,0 м, нижний бьеф принимался пустым (отметка 0,0 м), соответственно фильтрационный напор составляет 58 м.

Коэффициент фильтрации материалов принимались: для каменной наброски дамбы – 60 м/сут (0,069 см/с), для основания – 6 м/сут ($6{,}9\cdot10^{-3}$ см/с). Рассматривались 3 варианта коэффициента фильтрации хвостов: 0,24, 0,60, 1,5 м/сут (различие в 2,5 раза). Для защитных слоёв из песка коэффициент фильтрации принимался равным 0,86 м/сут ($1\cdot10^{-3}$ см/с).

При решении задачи граничные условия задавались в виде уровней воды бьефов. Принималось, что хранилище полностью заполнено хвостами, а глубина прудка очень мала. Поэтому уровень верхнего бьефа задавался на поверхности хвостов, при этом учитывалось, что прудок отстоит от откоса дамбы на длину пляжа (40 м). Уровень нижнего бьефа задавался на открытой поверхности основания. В узлах, расположенных на открытой поверхности дамбы, уровень воды принимался равным их высоте.

Для того, чтобы обеспечить достаточно строгое решение задачи, учитывалось, что часть дамбы, расположенная выше депрессионной кривой, является водонепроницаемой. Т.к. её положение заранее неизвестно, задача решалась последовательными приближениями. В первом приближении вся упорная призма дамбы принималась водонепроницаемой. После этого определялись уровни фильтрационного потока, соответствующие упорной призме, т.е. условное положение депрессионной кривой. Далее граница водопроницаемой области в дамбе очерчивалась по полученной депрессионной кривой и расчёт повторялся для новых граничных условий до тех пор, результаты расчётов в двух смежных приближениях не совпадут.

Результаты

Результаты фильтрационных расчётов представлены на рис.3–9 и в табл.1. На рис.3–8 показано положение эквипотенциалей уровней грунтовых вод, а также депрессионной кривой в расчётной области.

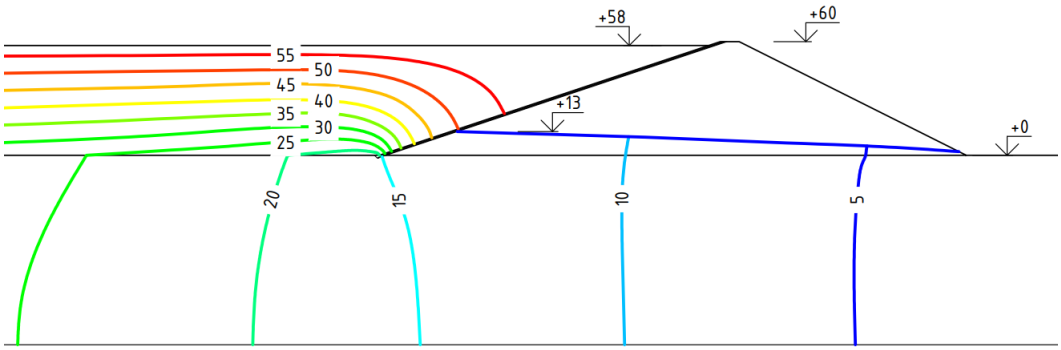


Рисунок 3 – Уровни грунтовых вод в дамбе с экраном при коэффициенте фильтрации хвостов 0,24 м/сут

Во всех рассмотренных вариантах в упорной призме дамбы устанавливается депрессионная поверхность, но её высотное положение различается. Оно зависит прежде

всего от наличия экрана – по рисункам хорошо заметно различие в распределении эквипотенциалей уровней грунтовых вод для случаев наличия и отсутствия геосинтетического экрана.

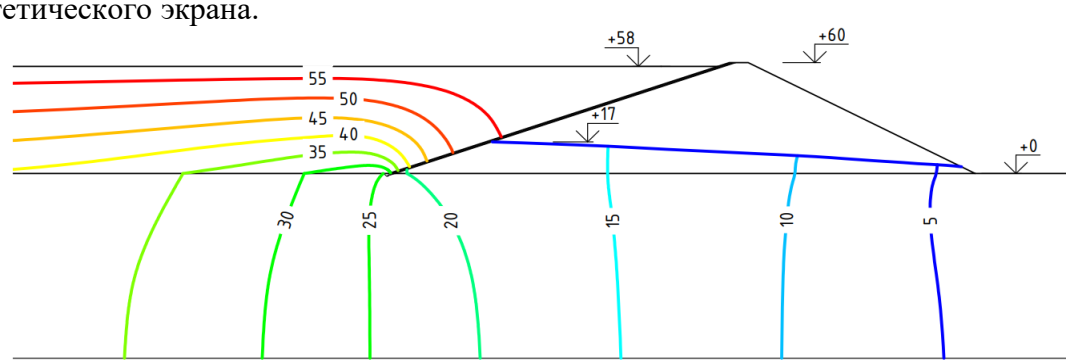


Рисунок 4 – Уровни грунтовых вод в дамбе с экраном при коэффициенте фильтрации хвостов 0,6 м/сут

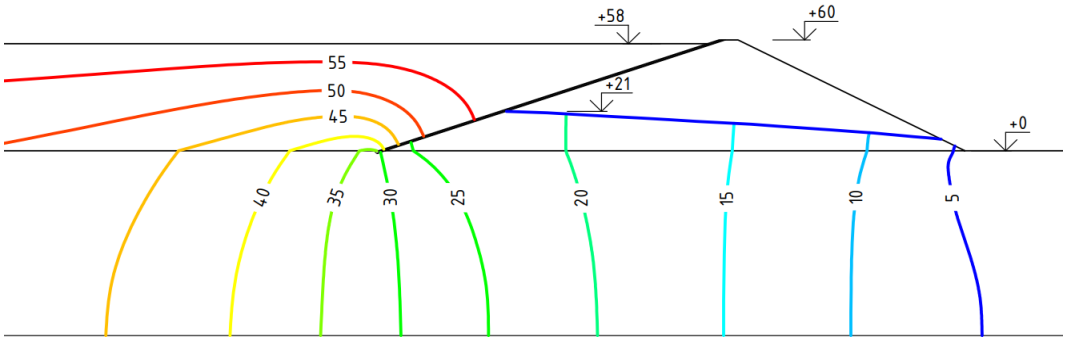


Рисунок 5 – Уровни грунтовых вод в дамбе с экраном при коэффициенте фильтрации хвостов 1,5 м/сут

При наличии экрана траекторию движения фильтрационных вод можно описать следующим образом – в массиве хвостов фильтрационный поток направлен вертикально вниз, в основании – горизонтально в направлении из верхнего бьефа в нижний. В массиве хвостов эквипотенциали перпендикулярны экрану.

В варианте №1, где хвосты имеют низкую проницаемость, основные потери напора происходят в хвостохранилище, поэтому депрессионная поверхность в упорной призме дамбы поднимается невысоко (рис.3). Глубина фильтрационного потока с верховой стороны составляет 13 м, т.е. 22% от фильтрационного напора. При этом депрессионная кривая высачивается на низовой откос, высота высачивания составляет 2 м. Следует отметить, что для варианта №1 характерны довольно высокие значения фильтрационных градиентов в массиве хвостов, они превышают 0,65 и критические значения фильтрационных градиентов.

При большей водопроницаемости хвостов депрессионная поверхность имеет более высокое положение. В варианте №3 большая часть упорной призмы оказывается глубина фильтрационного потока с верховой стороны составляет 21 м, а высота высачивания – 6 м (рис.5). В процентах от напора глубины фильтрационного потока составляют соответственно 36% и 10%. Это довольно высокие значения, что говорит о том, что при заданной проницаемости основания (6 м/сут) для обеспечения безопасности дамбы требуется противофильтрационная защита основания.

В случае выхода из строя геосинтетического экрана фильтрационный режим сооружения принципиально иной, т.к. фильтрат имеет возможность проникать из хвостохранилища непосредственно в упорную призму. В хвостохранилище эквипотенциали ориентированы примерно параллельно проницаемой части верхового откоса.

При выходе из строя геосинтетического экрана фильтрационный режим дамбы без экрана в большой степени определяется проницаемостью защитных слоёв песка,

расположенных на верховом откосе. Т.к. коэффициент фильтрации песчаного слоя существенно меньше, чем у каменной наброски, он станет выполнять роль противофильтрационного экрана, ограничивая фильтрационный поток.

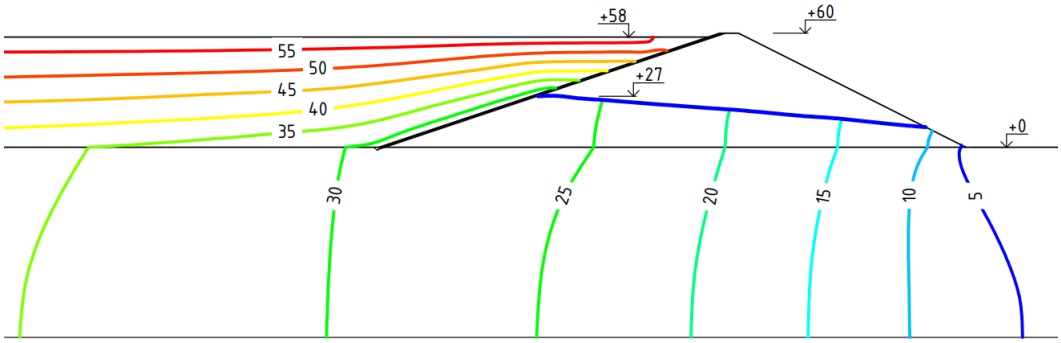


Рисунок 6 – Уровни грунтовых вод в дамбе без экрана при коэффициенте фильтрации хвостов 0,24 м/сут

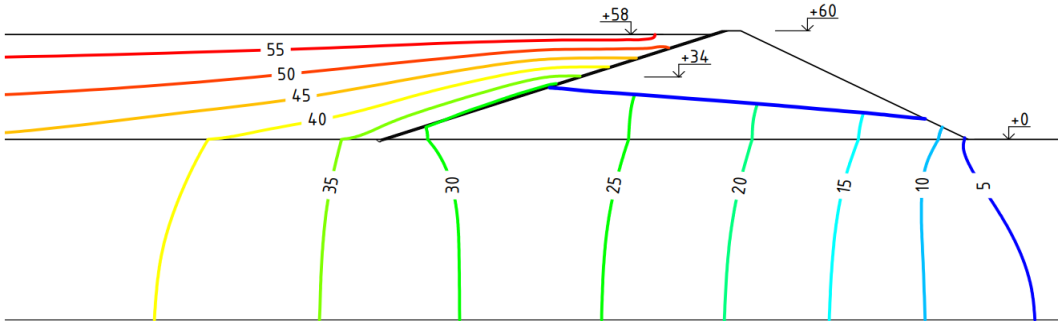


Рисунок 7 – Уровни грунтовых вод в дамбе без экрана при коэффициенте фильтрации хвостов 0,6 м/сут

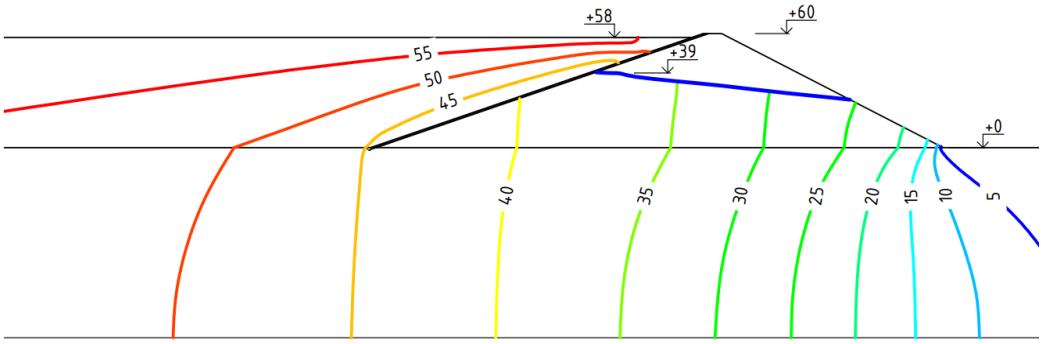


Рисунок 8 – Уровни грунтовых вод в дамбе без экрана при коэффициенте фильтрации хвостов 1,5 м/сут

Несмотря на защитную роль песчаной отсыпки, при отсутствии экрана депрессионная кривая в теле дамбы поднимается почти в двое по сравнению с вариантами с экраном. В варианте №1 глубина фильтрационного потока с верховой стороны составляет 27 м, а высота высачивания – 11 м (рис.6). В варианте №3 глубина фильтрационного потока с верховой стороны достигает 39 м, т.е. 67% от фильтрационного напора. Такое высокое положение депрессионной кривой создаёт опасность потери устойчивости откоса.

Ещё одна опасность для сооружения в случае выхода из строя геосинтетического экрана состоит в высоких значениях фильтрационных градиентов в массиве хвостов. На кратчайшем пути они достигают почти 1, что создаёт угрозу суффозии хвостов в тело дамбы.

Основные результаты фильтрационных расчётов сведены в таблице и представлены в виде графиков на рис.9.

Таблица. Глубины фильтрационного потока с верховой и низовой стороны упорной призмы для различных вариантов

№ варианта	Коэффициент фильтрации хвостов, м/сут	Глубины фильтрационного потока, м			
		с экраном		без экрана	
		с верховой стороны	с низовой стороны	с верховой стороны	с низовой стороны
1	0,24	13	2	27	11
2	0,60	17	4	28	11
3	1,50	21	6	39	25

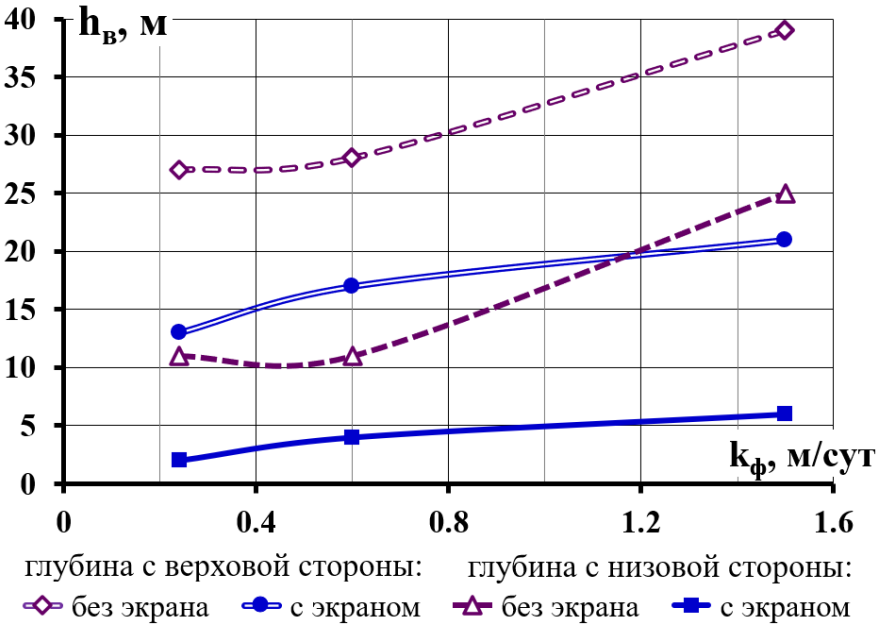


Рисунок 9 – Зависимость глубин фильтрационного потока в зависимости от водопроницаемости хвостов и наличия экрана

Рис. 9 наглядно иллюстрирует, как изменяется высотное положение депрессионной кривой в зависимости от наличия/отсутствия экрана и проницаемости хвостов. Очевидно, что чем выше коэффициент фильтрации хвостов, тем выше и депрессионная кривая. Однако зависимость глубины от проницаемости хвостов имеет нелинейный характер. При наличии в дамбе геосинтетического экрана она имеет затухающий характер, а при отсутствии экрана – нарастающий.

Выводы

1. Фильтрационный режим каменно-набросных дамб, ограждающих хранилища жидких отходов, имеет несколько принципиальных отличий от фильтрационного режима каменно-набросных плотин водохранилищ. Они связаны с особенностями их конструкций и режима работы. Т.к. складируемые отходы (хвостов) имеют ограниченную водопроницаемость, они играют роль противофильтрационного экрана дамбы, а фильтрационный режим сооружения сильно зависит от водопроницаемости складируемого материала. Если в хранилище складируются песчаные хвосты, тело дамбы может частично насыщено фильтрационным потоком и в ней может возникать депрессионная кривая.

2. Фильтрационный режим наливного хвостохранилища, образованного каменно-набросной дамбой, сильно зависит от проницаемости основания. Отсутствие в проницаемом основании противофильтрационной завесы способствует водонасыщению упорной призмы дамбы. В рассмотренных случаях, когда коэффициент фильтрации основания в несколько (от 7 до 40) раз превышает коэффициент фильтрации хвостов, глубина фильтрационного потока достигает 15–30% от фильтрационного напора.

3. Выход из строя экрана каменно-набросной дамбы приводит к значительному увеличению водонасыщения упорной призмы. В рассмотренном случае глубины фильтрационного потока возрастают примерно в 2 раза по сравнению со случаем работоспособного экрана. Количество поступающего в упорную призму фильтрата, определяется проницаемостью защитных слоёв, расположенных на контакте между каменной насыпью и массивом хвостов.

4. Фильтрация через проницаемое основание может создавать угрозу развития суффозии хвостов. Фильтрационные градиенты в хвостах могут достигать высоких значений даже при сохранении полной герметичности экрана дамбы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stark T.D., Moya L., Lin J. Rates and Causes of Tailings Dam Failures // Advances in Civil Engineering. 2022. 7895880. 21 p.

2. Azam S., Li Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // Geotechnical News. 2010, pp. 50–53.

3. Simeoni L., Tosatti G., Lucchi G., Longo M. The Stava catastrophic failure of July 19, 1985 (Italy): technical-scientific data and socioeconomic aspects // City Safety Energy Journal. 2017. No.1, pp. 17–30.

4. Peng C., Chen S., Chen W. The Finite Element Analysis of Tailings Dam Seepage. 2nd International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering (ICACHE 2016), pp. 22–26.

5. Wang G., Hu B., Tian S., Ai M., Liu W., Kong X. Seepage field characteristic and stability analysis of tailings dam under action of chemical solution // Scientific Reports. 2021. No.11. Paper ID 4073.

6. Yang J., Hu J., Wu Y., Zhang B. Numerical Simulation of Seepage and Stability of Tailing Dams: A Case Study in Ledong, China // Sustainability. 2022. No.14. Paper ID 12393.

7. Long D., Wang Y., Li C., Hu Y., Shi Y. Investigation of the Macro-Meso Seepage Failure Characteristics of Tailing Sand and Seepage Stability of Tailings Dam in Makeng Mine, Fujian, China // Geotechnical and Geological Engineering. 2023. No. 41, pp. 907–925.

8. Li H., Yang M., Dang T. Influence of mud intercalation on the stability of seepage flow in tailings dams // Frontier in Earth Science. 2023. No. 11. Paper ID 1115003.

9. Cheng Y., Wang C., Chu W., Luo S. Seepage and Deformation Analysis of Tailing Dam regarding the Upper Reservoir of Tiantai Pumped Storage Station // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 273. Paper ID 012021.

10. Du C., Tao H., Yi, F. Seepage stability analysis of geogrid reinforced tailings dam // Scientific Reports. 2024. No. 14. Paper ID 1484.

11. Alizadeh P., Latifi M. The study of the factors affecting phreatic line position and stability in upstream tailings dams // Results in Engineering. 2025. No. 25. Paper ID 104092.

12. Wei Z., Yin G., Wan L., Li G. A case study on a geotechnical investigation of drainage methods for heightening a tailings dam // Environmental Earth Sciences. 2016. No. 75. Paper ID 106.

13. Argal E. S. Control of Filtration at the Base of the Western Dam of the Tailings Dump of Udokan Mining and Metallurgical Works // Power Technology and Engineering. 2024. Vol.57. No.6, pp.858–863.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Саинов Михаил Петрович – доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, e-mail: SainovMP@mpei.ru)	*Sainov Mikhail Petrovich* – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Russia, Moscow, 14-1, Krasnokazarmennaya street, e-mail: SainovMP@mpei.ru)
Зузов Алексей Анатольевич – ассистент. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, e-mail: ZuzovAA@mpei.ru)	*Zuzov Aleksei Anatolevich* – assistant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Russia, Moscow, 14-1, Krasnokazarmennaya street, e-mail: ZuzovAA@mpei.ru)
Котов Филипп Викторович – старший преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, e-mail: KotovFV@mgsu.ru)	*Kotov Filipp Viktorovich* – senior lecturer, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe highway, 9, e-mail: KotovFV@mgsu.ru)

Статья поступила в редакцию 13.01.2026; одобрена после рецензирования 22.01.2026, принята к публикации 01.02.2026.
The article was submitted 13.01.2026; approved after reviewing 22.01.2026; accepted for publication 01.02.2026.