

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ /
HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1>

ОСОБЕННОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ СТЕН ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Научная статья

Талалаев Н.С.^{1,*}, Саинов М.П.²

¹ORCID : 0009-0001-9424-9661;

²ORCID : 0000-0003-1139-3164;

^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (talalaevnicita[at]yandex.ru)

Аннотация

Особенности устройства и применения противофильтрационных стен в конструкциях ограждающих дамб хранилищ жидких промышленных отходов были определены путём анализа информации о проектируемых и уже эксплуатируемых объектах, собранной из публикаций. Выявлено, что в ограждающих дамбах противофильтрационные стены устраиваются методами «стена в грунте», буросекущихся свай и смешивания грунта с цементной смесью. В новых объектах они устраиваются для борьбы с фильтрацией в основании, а в действующих объектах – для обеспечения герметичности при ремонте, реконструкции и ликвидации. Имеется пример устройства методом смешивания диафрагмы в каменно-набросной дамбе. Однако информация о расчётном обосновании конструкций противофильтрационных стен ограждающих дамб не обнаружена, особенности условий их работы требуют изучения.

Ключевые слова: хвостохранилище, дамба, противофильтрационная стена, стена в грунте, диафрагма, буросекущиеся сваи.

SPECIFICS OF FILTRATION-PROOF WALLS OF TAILINGS DAMS

Research article

Talalaev N.S.^{1,*}, Sainov M.P.²

¹ORCID : 0009-0001-9424-9661;

²ORCID : 0000-0003-1139-3164;

^{1,2} National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (talalaevnicita[at]yandex.ru)

Abstract

The specifics of construction and application of filtration-proof walls in the structures of dams enclosing liquid industrial waste storage facilities were determined by analysing the information on designed and already operated facilities collected from publications. It was found that in dams, filtration-proof walls are constructed by the methods of 'diaphragm wall', bored piles and mixing of soil with cement mixture. In new facilities, they are constructed to control filtration at the base and in existing facilities to provide a seal during repair, reconstruction and liquidation. There is an example of a mixing diaphragm in a rockfill embankment. However, there is no information on calculation substantiation of structures of filtration-proof walls of enclosing dams, specifics of their operation conditions require research.

Keywords: tailings dam, dam, filtration-proof wall, diaphragm wall, diaphragm, bored piles.

Введение

Противофильтрационные стены (ПФС) – это завесы, которые устраиваются в основании и теле плотин, дамб способами «стена в грунте», буросекущихся свай, струйной цементации, смешивания в целях снижения фильтрации. Этот тип противофильтрационных устройств активно применяется в конструкциях плотин и дамб водохранилищ [1], [2]. Они выполняются в скальном и нескальном основании, в теле вновь создаваемых грунтовых плотин, а также для их ремонта и реконструкции. Среди противофильтрационных стен есть уникальные, большой глубины и/или протяжённости [3].

Меньше известны случаи применения противофильтрационных стен в конструкциях ограждающих дамб хранилищ жидких промышленных отходов (ХЖПО) – хвостохранилищ, шламонакопителей, золошлакоотвалов.

Дамбы хвостохранилищ существенно отличаются от плотин водохранилищ, для некоторых из них характерен повышенный риск аварии. Высокие риски возникновения аварий характерны для хранилищ намывного и комбинированного, что обусловлено следующими причинами:

- эти дамбы не имеют противофильтрационных устройств, через них проходит фильтрационный поток;
- дамбы хранилищ намываются или отсыпаются непосредственно из складированных отходов;
- дамбы постоянно наращиваются, происходит увеличение воспринимаемыми ими нагрузок.

Для ограждающих дамб хранилищ жидких промышленных отходов проблема борьбы с фильтрацией является одной из основных. Известны случаи масштабных аварий хвостохранилищ, вызванных воздействием фильтрационного потока [4]. В этой связи актуальность приобретает вопрос о возможности применения ПФС в качестве одного из мероприятий по борьбе с фильтрацией через ограждающие сооружения складирования жидких промышленных отходов.

Целью данной публикации является выявление особенностей применения противofильтрационных стен в ограждающих дамбах ХЖПО.

Методы и принципы исследования

Для достижения поставленной цели был выполнен поиск и анализ публикаций, посвящённых применению ПФС в дамбах ХЖПО. В [5], [7], [9], [12] была найдена информация о 6 эксплуатировавшихся и 3 проектируемых ХЖПО. Общая информация об объектах приведена в табл.1.

Таблица 1 - Информация об объектах размещения жидких промышленных отходов, в конструкциях ограждающих дамб которых устроены противofильтрационные стены

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.1>

Наименование	Страна	Вид хранилища по способу возведения	Высота дамбы, м	Тип дамбы и её противofильтрационный элемент	Источник
Aznallcolar	Испания	комбинированное	55	каменно-земляная с глинистым экраном	[5]
Diavik	Канада	наливное	24	каменно-набросная с диафрагмой	[6]
Red Dog	США	наливное	10	каменно-земляная с экраном из геомембраны	[6]
Sillamae	Эстония	наливное	25	каменно-набросная	[7]
Cross Delta	США	наливное	14,5	земляная	[8]
Удоканское	Россия	комбинированное	39,5	каменно-набросная с «экраном» из гидромата	[9]
Сухой Лог	Россия	наливное	92	каменно-набросная с экраном из геомембраны	[10]
Аккусский	Казахстан	комбинированное	16	земляная с экраном из геомембраны	[11]
Олений ручей	Россия	наливное	16	земляная	[12]

Среди 9 хранилищ 6 относятся к наливным, а 3 к комбинированным. Дамбы наливных хранилищ выполнены с использованием каменной наброски. Они имеют разные противofильтрационные элементы (экран, диафрагма, комбинированные).

На 5 из 9 хранилищах противofильтрационные стены уже выполнены, а на остальных только проектируются. В последних стена выполняется как новый, дополнительный противofильтрационный элемент для ремонта, реконструкции или вывода из эксплуатации объекта.

Кроме того, был осуществлён поиск научных трудов и публикаций, посвящённых расчётному обоснованию конструкций ПФС, предназначенных для работы в ХЖПО. Но только в [12] была найдена такая информация, что свидетельствует о том, что этому вопросу уделяется недостаточно внимания. Отдельные исследования были выполнены авторами в [13], [14].

Основные результаты

Анализ показал, что ПФС указанных ХЖПО отличаются по назначению, конструкции и другим признакам. Нами была выполнена классификация противofильтрационных стен по нескольким признакам: назначение, способ возведения стены, расположение относительно дамбы и основания. Информация представлена в табл.2.

Таблица 2 - Информация о противофильтрационных стенах в конструкциях ограждающих дамб жидких промышленных отходов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.2>

Наименование	Назначение стены	Тип стены	Год устройства стены	Расположение стены	Слои, в которых выполнена стена	Глубина стены, м
Aznallcolar	первичная	СГ	1978	с ВБ	основание и первичная дамба	11
Diavik	первичная	См	2003	по оси	основание и дамба	25
Red Dog	первичная	СГ	2016	с ВБ	основание	25
Sillamae	ликвидация	СГ	2008	с НБ	основание	18
Cross Delta	ремонт	См	2015	по оси	хранилище	15,5
Удоканское	ремонт	БСС	проект	с ВБ	основание и часть дамбы	57
Сухой Лог	первичная	БСС	проект	с ВБ	основание	20
Акусский	реконструкция	БСС	проект	с НБ	основание и первичная дамба	16
Олений ручей	ремонт	СГ	проект	по оси	основание и дамба	28

Примечание: СГ – способ «стена в грунте», БСС – способ буросекущихся свай, См – способ смешивания, ВБ – верхний бьеф, НБ – нижний бьеф

В результате анализа были выделены два характерных случая применения ПФС: первичные и вторичные стены. Под первичными стенами в табл.2 мы понимаем стены во вновь создаваемых хранилищах, устраиваемые до начала их эксплуатации. Вторичные стены – это завесы, создаваемые в хранилищах при их ремонте, реконструкции или выводе из эксплуатации.

3.1. Первичные стены

Почти половина случаев применения ПФС относится ко вновь создаваемым хранилищам промышленных отходов. Как правило, это дамбы наливных хранилищ или первичные дамбы хранилищ комбинированного типа.

Первичная стена устраивается в толще нескальных грунтов основания, но она может также пересекать тело плотины. Часто дамба имеет комбинированный противофильтрационный элемент – ПФС сочетается с экраном на верховой грани дамбы.

Для устройства первичных ПФС применяются три способа: «стена в грунте», буросекущихся свай и смешивания. Глубина ПФС составляет до 25 м.

Характерным примером применения ПФС во вновь создаваемом хранилище является хвостохранилище Aznallcolar в Испании. ПФС этого хранилища выполнена на глубину 6 м в первичной дамбе и слое основания (рис.1) [5].

Уникальным случаем является ПФС в хвостохранилище рудника Diavik (Канада). ПФС этого хранилища является диафрагмой каменно-набросной дамбы (рис.2), она имеет толщину 1,2 м. Диафрагма выполнена методом смешивания с цементной смесью, крупнообломочного грунта, разработанного фрезой [6].

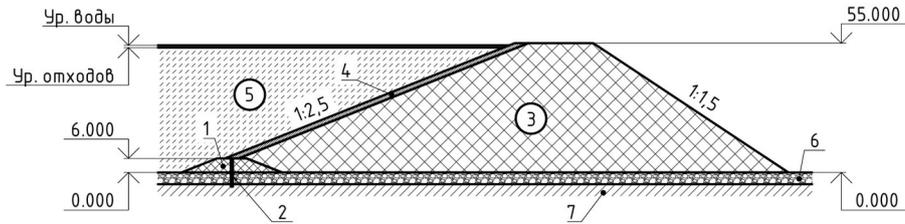


Рисунок 1 - Схема конструкции ограждающей дамбы хвостохранилища Aznallcolar (Испания):
 1 – пионерная дамба; 2 – противофильтрационная стена; 3 – тело ограждающей дамбы из каменной наброски; 4 – глинистый экран; 5 – хвосты; 6 – аллювиальные отложения; 7 – глинистый грунт основания
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.3>

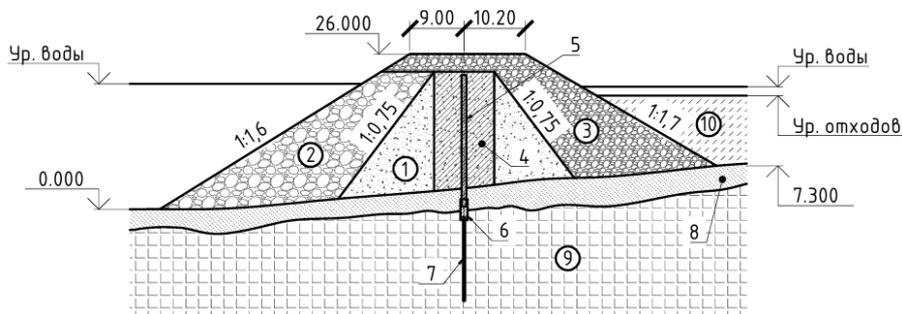


Рисунок 2 - Схема конструкции ограждающих дамб хвостохранилища рудника Diavik (Канада):
 1 – центральная зона из дресвяно-щебенистого грунта; 2 – каменная наброска; 3 – щебень; 4 – зона виброуплотнения центральной зоны; 5 – противофильтрационная стена; 6 – струйная цементация грунтов; 7 – цементация трещиноватого скального основания; 8 – водопроницаемый грунт основания; 9 – трещиноватое скальное основание; 10 – хвосты
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.4>

3.2. Вторичные стены

Вторичные стены используются для снижения фильтрации загрязнённых вод из хранилища. Они возводятся как способом «стена в грунте», так и способом буросекущихся свай. Характерной особенностью вторичных стен, создаваемых в уже действующих объектах, является то, что, как правило, они пересекают тело дамбы. В [8] описан случай, когда в процессе ремонта ПФС была выполнена не в дамбе или в основании, а в самом хранилище складированных отходов.

Интересным случаем является план применения ПФС для ремонта хранилища Удоканского горнометаллургического комбината [9]. При первом наполнении этого наливного хвостохранилища, образованного каменно-набросной дамбой, обнаружилась сильная фильтрация через оттаявший слой основания. Восстановление водонепроницаемости основания предполагается выполнить путём создания ПФС способом буросекущихся свай (рис.3). Глубина такой стены достигнет 57 м!

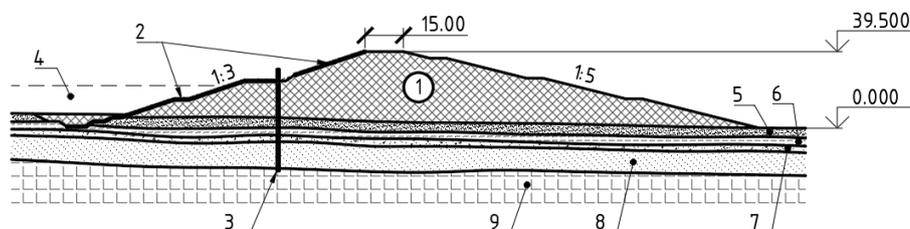


Рисунок 3 - Конструкция западной первичной дамбы хвостохранилища Удоканского горнометаллургического комбината:
 1 – тело дамбы из каменной наброски; 2 – экран из геомембраны, уложенный по верхнему откосу; 3 – противофильтрационная стена; 4 – ложе хвостохранилища; 5, 6, 7, 8 – водопроницаемые слои грунтов основания; 9 – водоупор
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.5>

Чтобы уменьшить глубину ПФС, её могут располагать не со стороны верхнего бьефа, не по оси дамбы, а со стороны нижнего бьефа. Однако при расположении стены со стороны нижнего бьефа возникает сложность её сопряжения с противofильтрационным элементом тела дамбы. При его необходимости гидроизоляции требуется устройство противofильтрационного экрана по низовой грани дамбы.

Примером такой конструкции является хвостохранилище Sillamae в Эстонии [7]. После десятилетий использования это хвостохранилище, в котором в том числе складировались радиоактивные отходы, было выведено из эксплуатации. Для того чтобы опасный фильтрат не попал в окружающую среду, при реализации проекта ликвидации по низовому контуру хвостохранилища была выполнена ПФС (рис.4).

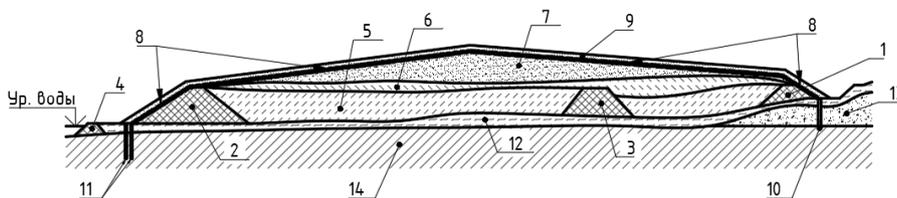


Рисунок 4 - Поперечный разрез по хвостохранилищу Sillamae (Эстония) после ликвидации:

1 – оградительная дамба со стороны берега; 2 – оградительная дамба со стороны моря; 3 – разделительная дамба хвостохранилища; 4 – берегоохранная дамба; 5 – урановые хвосты; 6 – золошлаки; 7 – защитный/выравнивающий слой из грунта; 8 – глинистый экран; 9 – рекультивационный слой; 10 – противofильтрационная стена; 11 – свайный ростерк (усиление основания); 12 – песчано-гравийный грунт основания; 13 – песчаник основания; 14 – водоупорный слой основания из глины

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.6>

Как видим, ПФС в хвостохранилищах жидких промышленных отходов могут работать в более разнообразных условиях, чем ПФС плотин водохранилищ. Они могут иметь разное расположение по отношению к дамбе – с верховой, низовой стороны, по оси. Более того, в процессе наращивания хвостохранилища положение ПФС по отношению оси дамбы может изменяться, соответственно, будут изменяться нагрузки на ПФС. Вопрос о выборе оптимального положения ПФС в конструкции оградительных дамб хвостохранилищ требует изучения.

Мало изученным является вопрос о напряженно-деформированном состоянии (НДС) ПФС ХЖПО. Только в [12] описаны результаты расчёта НДС ПФС в конструкции дамбы хвостохранилища «Олений Ручей». Расчёты выполнялись в программном комплексе PLAXIS.

Заключение

Так же как и в плотинах водохранилищах, противofильтрационные стены хвостохранилищ используют для создания новых объектов, а также для ремонта, реконструкции и ликвидации уже действующих объектов. Есть пример применения ПФС в качестве диафрагмы каменно-набросной дамбы.

Для устройства противofильтрационных стен используют способы «стена в грунте», буросекущихся свай, а также способ смешивания грунта с цементной смеси. Имеется пример использования хвостов для приготовления материала стены способом смешивания.

Расположение противofильтрационной стены в составе оградительной дамбы может быть различным, она может располагаться с верховой, с низовой стороны и по оси дамбы. Есть пример устройства стены-завесы непосредственно в хвостохранилище отходов.

Для противofильтрационных стен в дамбах хвостохранилищ жидких отходов характерно многообразие конструктивных решений и способов устройства, поэтому вопрос об условиях работы противofильтрационных стен в дамбах хвостохранилищ требует изучения.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.7>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.1.7>

Список литературы / References

1. Захаров С.В. Метод струйной цементации в гидротехническом строительстве / С.В. Захаров, В.Г. Радченко, Ю.Д. Семенов [и др.] // Гидротехническое строительство. — 2008. — № 4. — С. 2–11.

2. Борзунов В.В. Опыт проектирования и строительства грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС с применением в качестве противофильтрационного устройства диафрагмы из буросекущихся свай / В.В. Борзунов, Г.В. Денисов, Е.А. Кадушкина [и др.] // Гидротехническое строительство. — 2019. — № 6. — С. 2–10.
3. Mirghasemi A.A. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam / A.A. Mirghasemi, M. Pakzad, B. Shadravan // The International Journal on Hydropower & Dams. — 2005. — Iss. 2. — P. 2–6.
4. Lyu Z. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History / Z. Lyu, J. Chai, Z. Xu [et al.] // Advances in Civil Engineering. — 2019. — 4159306.
5. Gens A. Aznalco'llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism / A. Gens, E.E. Alonso // Géotechnique. — 2006. — № 3. — P. 165–183.
6. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining / S. Schwank // 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2019. — P. 429–433.
7. Barnekow U. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia / U. Barnekow, A. Jakubick, M. Paul [et al.] // 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. — 2003. — P. 487–494.
8. Conteras I. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing / I. Conteras, G.K. Bryant // Water Management. — 2018. — P. 861–871.
9. Argal E.S. Control of Filtration at the Base of the Western Dam of the Tailings Dump of Udokan Mining and Metallurgical Works / E.S. Argal // Power Technology and Engineering. — 2024. — Vol. 57. — № 6. — P. 858–863.
10. Петраш Н.Г. Экономическая оценка месторождения Сухой Лог в современных условиях недропользования / Н.Г. Петраш, И.А. Карпенко, М.В. Карпухина // Руды и металлы. — 2008. — № 2. — С. 89–104.
11. Шайтанов А.М. Применение комбинированного противофильтрационного элемента в составе ограждающей дамбы золошлакоотвала Аксуской электрической станции / А.М. Шайтанов, Н.С. Талалаев // Гидротехническое строительство. — 2024. — № 12. — С. 8–12.
12. Калашник А.И. Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнодобывающих предприятий северо-западной части Российского сектора Арктики: монография / А.И. Калашник, Д.А. Максимов, Н.А. Калашник [и др.]. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. — 250 с.
13. Sainov M.P. Assessment of the Performance of the Cutoff Wall in the Base of a Tailings Dam / M.P. Sainov, N.S. Talalaev // Power Technology and Engineering. — 2024. — № 58 (2). — P. 253–257.
14. Sainov M.P. Cut-off wall in foundation of reservoir dam and tailing dam: comparative evaluation / M.P. Sainov, N.S. Talalaev // Magazine of Civil Engineering. — 2024. — № 17 (6). — P. 13010.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zaharov S.V. Metod strujnoj cementacii v gidrotehnicheskom stroitel'stve [Jet grouting method in hydraulic engineering construction] / S.V. Zaharov, V.G. Radchenko, Ju.D. Semenov [et al.] // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering Construction]. — 2008. — № 4. — P. 2–11. [in Russian]
2. Borzunov V.V. Opyt proektirovaniya i stroitel'stva gruntovoj plotiny Nizhne-Burejskoj GJeS s primeneniem v kachestve protivofil'tracionnogo ustrojstva diafragmy iz buresekushihsvaj [Design and construction experience of the Nizhne-Bureysk HPP earth dam with application of a diaphragm of bored piles as an impervious device] / V.V. Borzunov, G.V. Denisov, E.A. Kadushkina [et al.] // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. — 2019. — № 6. — P. 2–10. [in Russian]
3. Mirghasemi A.A. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam / A.A. Mirghasemi, M. Pakzad, B. Shadravan // The International Journal on Hydropower & Dams. — 2005. — Iss. 2. — P. 2–6.
4. Lyu Z. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History / Z. Lyu, J. Chai, Z. Xu [et al.] // Advances in Civil Engineering. — 2019. — 4159306.
5. Gens A. Aznalco'llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism / A. Gens, E.E. Alonso // Géotechnique. — 2006. — № 3. — P. 165–183.
6. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining / S. Schwank // 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2019. — P. 429–433.
7. Barnekow U. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia / U. Barnekow, A. Jakubick, M. Paul [et al.] // 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. — 2003. — P. 487–494.
8. Conteras I. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing / I. Conteras, G.K. Bryant // Water Management. — 2018. — P. 861–871.
9. Argal E.S. Control of Filtration at the Base of the Western Dam of the Tailings Dump of Udokan Mining and Metallurgical Works / E.S. Argal // Power Technology and Engineering. — 2024. — Vol. 57. — № 6. — P. 858–863.
10. Petrash N.G. Jekonomicheskaja ocenka mestorozhdenija Suhoj Log v sovremennyh uslovijah nedropol'zovanija [Economic evaluation of the Sukhoi Log deposit in modern conditions of subsoil use] / N.G. Petrash, I.A. Karpenko, M.V. Karpuhina // Rudy i metally [Ores and Metals]. — 2008. — № 2. — P. 89–104. [in Russian]
11. Shajtanov A.M. Primenenie kombinirovannogo protivofil'tracionnogo jelementa v sostave ograzhdajushhej damby zoloshlakootvala Aksuskoj jelektricheskoy stancii [Application of the combined impervious element in the enclosing dam of the ash dump of the Aksu power plant] / A.M. Shajtanov, N.S. Talalaev // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering Construction]. — 2024. — № 12. — P. 8–12. [in Russian]
12. Kalashnik A.I. Mnogourovnevye kompleksnye issledovanija i monitoring hvostohranilishh gornodobyvajushhih predpriyatij severo-zapadnoj chasti Rossijskogo sektora Arktiki: monografija [Multilevel complex research and monitoring of

tailings dumps of mining enterprises in the north-western part of the Russian sector of the Arctic: monograph] / A.I. Kalashnik, D.A. Maksimov, N.A. Kalashnik [et al.]. — Apatity: FRC KSC RAS, 2022. — 250 p. [in Russian]

13. Sainov M.P. Assessment of the Performance of the Cutoff Wall in the Base of a Tailings Dam / M.P. Sainov, N.S. Talalaev // Power Technology and Engineering. — 2024. — № 58 (2). — P. 253–257.

14. Sainov M.P. Cut-off wall in foundation of reservoir dam and tailing dam: comparative evaluation / M.P. Sainov, N.S. Talalaev // Magazine of Civil Engineering. — 2024. — № 17 (6). — P. 13010.