Научная статья
УДК 628.393:624.136

ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СТЕНЫ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ ОТХОДОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР

М.П. Саинов[1*], Н.С. Талалаев[2]

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

Аннотация. Ограждающие дамбы хранилищ жидких промышленных отходов (хвостохранилищ, шламонакопителей, золошлакоотвалов) отличаются от плотин водохранилищ условиями работы и конструкциями, в т.ч. конструкциями противофильтрационных устройств. Авторами были изучены особенности противофильтрационных стен дамб хвостохранилищ путём составления обзора технической информации об эксплуатируемых и проектируемых объектах хранения отходов. Было установлено, что стены применяются и как самостоятельные противофильтрационные устройства, так и в комбинации с экранами. Они являются единственным решением в случаях, когда необходимо исключить фильтрацию через проницаемое основание или восстановить водонепроницаемость тела дамбы при ремонте. Используются разные способы возведения противофильтрационных стен: «стена в грунте», буросекущихся свай, смешивания грунта с цементом. В хвостохранилищах применяют особый тип конструкций стен – композитные стены, которые включают водонепроницаемые преграды из полимеров.

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

Для цитирования: Саинов М.П., Талалаев Н.С. Противофильтрационные стены ограждающих дамб хранилищ жидких отходов: краткий обзор // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 2. С. 67–78.

Original article

CUTOFF WALLS OF TAILING DAMS: A BRIEF REVIEW

M.P. Sainov[1,2*], N.S. Talalev[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 dam differs from reservoir dams by conditions of performance and structural designs including the designs of seepage control structures. The authors studied the peculiarities of seepage control walls of tailings dams by compilation of the review of technical information on the existing and designed structures for storage of tailings. It was established that the walls are also used both as autonomous seepage control facilities and in combination with impervious faces. They are the only solution in cases when it is necessary to avoid seepage through the pervious foundation or restore water permeability of the dam body during repairs. Different methods are used in construction of seepage control walls: a slurry wall, secant bored piles, mixing

© Саинов М.П., Талалаев Н.С. 2025

soil with cement. A special type of wall structural designs is used, i.e. composite walls including seepage control elements made of polymers.

Key words: *tailing; dam; cutoff wall; slurry wall; diaphragm wall; secant bored piles.*

For citation: Sainov M.P., Talalaev N.S. Cutoff walls of tailing dams: A brief review. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 67–78.

Введение

С середины XX века в гидротехническом строительстве активно применяются противофильтрационные завесы в виде сплошных стен, прорезающих грунтовый массив. Такие завесы обычно выполняются методами «стена в грунте» и буросекущихся свай.

Известно, что в СССР метод «стена в грунте» был впервые применён для создания противофильтрационной завесы ещё в 1956 г. Стена длиной 947 м и максимальной глубиной 40 м перекрыла грунтовую толщу в основании Шерубай-Наринской (Чурубай-Нуринской) плотины водохранилища Карагандинской ГРЭС-2 в Казахстане [1]. Она была выполнена из буросекущихся свай диаметром 600–700 мм, заполненных суглинисто-бентонитовым раствором.

Стен-завесы обладают рядом преимуществ по сравнению с инъекционными завесами: гарантированное пересечение водопроницаемого слоя, возможность выполнить завесу в грунте любого вида и экономичность.

Противофильтрационные стены-завесы широко применяются в строительстве плотин. Они устраиваются не только в основании плотин (бетонных и грунтовых), но и в теле грунтовых плотин, в последнем случае их относят к диафрагмам. Стены-диафрагмы применяются для восстановления водонепроницаемости грунтовых плотин при их ремонте.

В связи с этим представляет интерес опыт применения стен-завес в другой области гидротехнического строительства – инженерной защите окружающей среды при создании объектов размещения жидких промышленных отходов (хвостов, шлама, золы, шлака и др.). К ним относятся хвостохранилища, шламонакопители, золошлакоотвалов и т.п. Ограждающие сооружения этих хранилищ обычно представляют собой грунтовые дамбы с противофильтрационными устройствами. Интересно изучить, как в конструкциях ограждающих дамб хранилищ жидких отходов применяются противофильтрационные стены, и чем они отличаются от стен, применяемых в конструкциях грунтовых плотин.

Дамбы хранилищ жидких промышленных отходов представляют собой отдельный тип напорных гидротехнических сооружений. Они схожи по конструкциям и условиям работы с плотинами водохранилищ, однако имеют несколько принципиальных отличий.

Первое отличие состоит в том, что ограждающие дамбы (в отличие от плотин водохранилищ) воспринимают не только давление воды, но и давление, создаваемое весом размещаемых отходов. Следует отметить, что воды шламонакопителей и хвостохранилищ могут быть агрессивными.

Второе отличие состоит в материалах и конструкциях ограждающих дамб.

Существуют несколько видов конструкций хранилищ жидких отходов: наливные, намывные, комбинированные. Дамбы наливных хранилищ (например, шламонакопителей) по своей конструкции аналогичны грунтовым плотинам, они возводятся из карьерных грунтов и могут иметь противофильтрационные элементы. Дамбы намывных хранилищ выполняются из материала хвостов и не имеют противофильтрационных элементов. Такие дамбы испытывают силовое воздействие фильтрационного потока и их безопасность в существенной степени определяется фильтрационным режимом сооружения. Комбинированные дамбы возводятся на первом этапе как наливные, а затем как намывные.

Третье отличие связано со способом возведения сооружений. Многие дамбы постоянно наращиваются в процессе эксплуатации. Наращивание может осуществляться в сторону нижнего, верхнего бьефов или по оси. При любом способе наращивания изменяется фильтрационный режим сооружения. Но особую опасность представляет собой наиболее

распространённое наращивание в сторону верхнего бьефа – в этом случае последующий ярус дамбы опирается на недоуплотнённые хвосты, что создаёт угрозу потери несущей способности всего сооружения.

Соответственно, в конструкциях ограждающих дамб должно уделяться большое внимание противофильтрационным мероприятиям, одним из которых и может являться устройство стен-завес.

Мы задались целью составить обзор опыта применения противофильтрационных стен в ограждающих дамбах хвостохранилищ и шламонакопителей.

Методика

Для решения поставленной задачи нами было изучено большое количество научных трудов, посвященных вопросам проектирования, возведения и эксплуатации объектов размещения промышленных отходов.

Осуществлялся сбор и анализ информации по нескольким вопросам:

- Случаи аварий ограждающих дамб, вызванных негативным действием фильтрации;
- Противофильтрационные устройства в конструкциях ограждающих дамб, включающих «стены в грунте».

Однако публикаций, посвящённых опыту применения «стен в грунте» в конструкциях ограждающих дамб, известно мало [1-10].

Результаты

Аварии ограждающих дамб хранилищ промышленных отходов

Статистика свидетельствует о том, что именно фильтрация занимает главенствующее место среди причин аварий накопителей промышленных отходов. По данным [2] в 22% случаев аварии были вызваны фильтрацией.

В таблице 1 приведены сведения о крупнейших авариях, собранные в [2] из других источников. Почти в половине случаев (в 8 случаях из 18) авария была связана с фильтрацией воды через тело дамбы.

Таблица 1 – Информация об крупнейших авариях хранилищ жидких промышленных отходов

Год	Наименование (местоположение)	Высота, м	Методы наращивания	Причина аварии (количество жертв)
1928	Barahona (Чили)	61	в верховую сторону	Землетрясение (54)
1965	El Cobre (Чили)	36	в верховую сторону	Землетрясение (>300)
1972	Buffalo Creek (США)	14-18	в верховую сторону	Фильтрация (125)
1974	Bafokeng (Южная Африка)	20	в верховую сторону	Фильтрация (14)
1975	Mike Horse (США)	18	в верховую сторону	Переполнение (н.д.)
1976	Dashihe (Китай)	37	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1978	Mochikoshi №1, №2 (Япония)	28, 19	в верховую сторону	Землетрясение (1)
1978	Arcturus (Зимбабве)	25	в верховую сторону	Переполнение (1)
1979	Union Carbide (США)	43	в верховую сторону	Фильтрация (н.д.)
1985	Stava (Италия)	29,5	в верховую сторону	Фильтрация (268)
1985	Cerro Negro №4 (Чили)	40	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1988	Lixi (Китай)	40	в верховую сторону	Переполнение (20)
1991	Sullivan (Канада)	21	в верховую сторону	Фильтрация (н.д.)
1994	Tapo Canyon (США)	24	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1994	Merriespruit (ЮАР)	31	в верховую сторону	Переполнение (17)
1996	Sgurigrad (Болгария)	45	в верховую сторону	Фильтрация (107)

2010	Ajka (Венгрия)	22	в низовую сторону	Фильтрация (10)
2015	Fundão (Бразилия)	90	в верховую сторону	Фильтрация (19)

Для предотвращения негативных последствий фильтрации конструкциях дамб предусматривают дренажные и противофильтрационные устройства. Противофильтрационные устройства выполняют в теле, в основании дамб, а также по ложу хранилища.

Одним из типов применяемых противофильтрационных устройств являются «стены в грунте». Часто они применяются в составе комбинированных противофильтрационных устройств.

Примеры противофильтрационных стен в конструкциях ограждающих дамб

Примеров применения противофильтрационных стен в грунте в конструкциях дамб хвостохранилищ в технической литературе описано немного. Здесь мы собрали и проанализировали известные случаи.

Хвостохранилище Aznallcolar. В 1978 г. противофильтрационная стена была применена для создания наливного хвостохранилища Aznallcolar (Испания). Стена пересекает первичную дамбу хвостохранилища высотой 6 м и слой аллювиального песка мощностью около 5 м, достигая слоя глины [3] (рис. 1). Стена выполнена из глиноцементобетона.

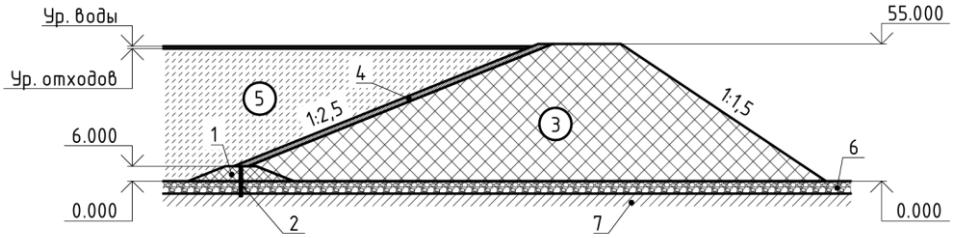


Рисунок 1 – Схема конструкции ограждающей дамбы хвостохранилища Aznallcolar (Испания)
1 – пионерная дамба; 2 – противофильтрационная стена; 3 – тело ограждающей дамбы из каменной наброски; 4 – глинистый экран; 5 – хвосты; 6 – аллювиальные отложения; 7 – глинистый грунт основания

Впоследствии дамба была наращена в сторону нижнего бьефа. Вторичная каменно-земляная дамба имеет противофильтрационный экран из глины (рис.1), который примыкает к стене-диафрагме. К 1998 г. высота хвостохранилища достигла 55 м. А 25 апреля 1998 г. произошло разрушение дамбы из-за сдвига в основании [3].

Хвостохранилище Diavik. В наливном хвостохранилище рудника Diavik (Канада) противофильтрационная стена была выполнена как в основании, так и в теле плотины. Дамба высотой до 24 м была возведена в 2003 г., она отделяет хвостохранилище от озера [4]. Дамба – каменно-набросная, её центральная часть отсыпана из пустой породы мелких фракций (до 50 мм), а боковые части – из более крупных фракций (рис.2). Противофильтрационная диафрагма толщиной 1,2 м выполнена из грунтоцементных свай, в скальном основании выполнена цементационная завеса. Грунтоцементные сваи получены путём смешивания грунта центральной части дамбы с цементом (методом Cutter Soil Mixing – фрезерного смешивания грунта).

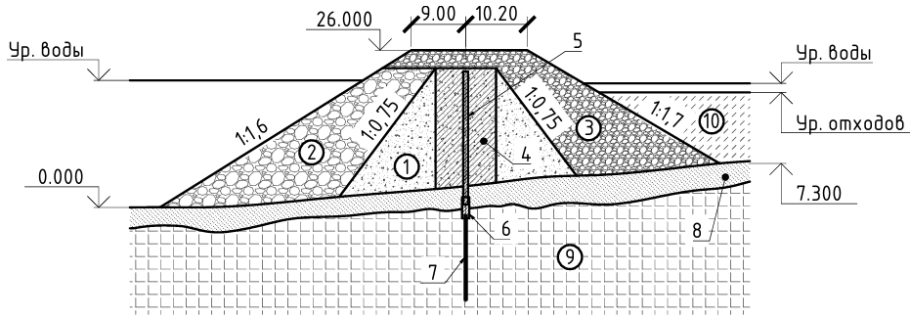


Рисунок 2 – Схема конструкции ограждающих дамб хвостохранилища рудника Diavik (Канада)

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

Хвостохранилище Red Dog. В хвостохранилище рудника Red Dog на Аляске (США) противофильтрационная стена была применена в дамбе одной из очередей строительства в 2016 г. Для предотвращения попадания в окружающую среду арктической зоны вредных химических веществ потребовалось полное исключение утечек воды из накопителя. В основании траншейным методом была выполнена «стена в грунте» толщиной 0,8 м, она прорезала нескальные грунты мощностью 25 м и была заглублена в скальные породы (рис.3,4) [4]. Протяжённость стены составила 1500 м, поэтому она возводилась в течение трёх летних сезонов.

В самой дамбе противофильтрационным элементом является экран из полиэтиленовой геомембраны (HDPE) толщиной 2,5 мм.

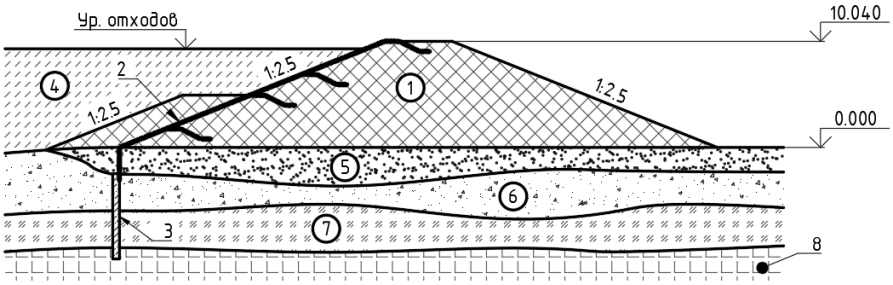


Рисунок 3 – Схема конструкции ограждающей дамбы Red Dog (США)

1 – тело дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – хвосты; 5 – подготовка основания из уплотненного песчаного грунта; 6 – песчаный грунт основания с примесью гравия; 7 – сильновыветрелый сланец основания; 8 – сланец основания

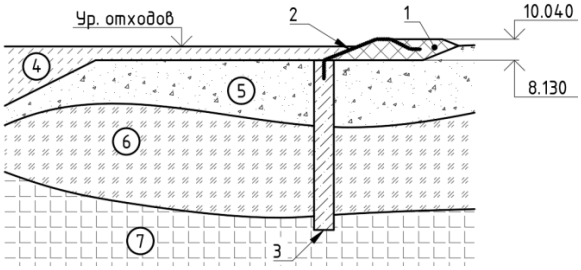


Рисунок 4 – Схема конструкции ограждающей дамбы Red Dog (США)

1 – тело дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – хвосты; 5 – песчаный грунт основания с примесью гравия; 6 – сильновыветрелый сланец основания; 7 – сланец основания

Новым направлением применения противофильтрационных стен в конструкциях ограждающих сооружений хранилищ промышленных отходов является их использование при ликвидации выведенных из строя объектов. Примером такого объекта является хвостохранилище Sillamae в Эстонии. В советские годы оно использовалось для складирования отходов производства обогащённого урана и золы ГРЭС. В нём хранится 6,5 млн.м^3 отходов [5].

Проект ликвидации хранилища Sillamae предусматривал его покрытие геомембраной для защиты от атмосферных осадков, создание дренажных и противофильтрационных устройств, а также берегозащитной дамбы на берегу Балтийского моря. Для предотвращения фильтрации воды из ложа накопителя в Балтийское море был запроектирована «стена в грунте» из глиноцементобетона. Длина стены составляет 580 м, а глубина от 12 до 18 м [5]. Проект ликвидации хранилища был реализован в 2004–2008 гг.

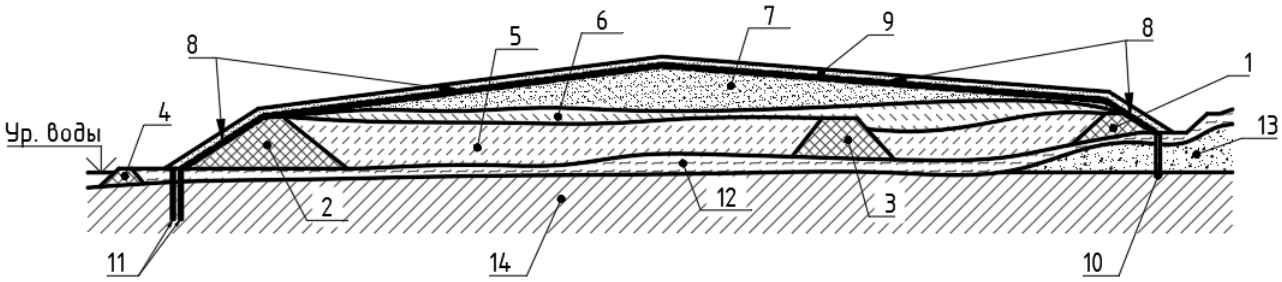


Рисунок 5 – Поперечный разрез по хвостохранилищу Sillamae (Эстония) после ликвидации
1 – ограждающая дамба со стороны берега; 2 – ограждающая дамба со стороны моря; 3 – разделительная дамба хвостохранилища; 4 – берегоохранная дамба; 5 – урановые хвосты; 6 – золошлаки; 7 – защитный/выравнивающий слой из грунта; 8 – глинистый экран; 9 – рекультивационный слой; 10 – противофильтрационная стена; 11 – свайный ростверк (усиление основания); 12 – песчано-гравийный грунт основания; 13 – песчаник основания; 14 – водоупорный слой основания из глины

Примеры применения композитных противофильтрационных стен

Следует отметить, что воды в хранилищах жидких промышленных отходов могут быть агрессивными к материалу противофильтрационных стен. По этой причине приходится применять особые конструкции стен-завес.

В [6] описан пример применения композитной противофильтрационной стены у подножия дамбы хвостохранилища в Аризоне (США). Описанная дамба хвостохранилища высотой 30,5 м предназначена для хранения отходов медных рудников. Фильтрующие воды имели высокое содержание сульфата меди и низкий водородный показатель (pH<2). По этой причине было принято решение устраивать композитную стенку, с использованием полиэтилена, который обладает стойкостью к агрессивным водам.

Композитная противофильтрационная стенка была выполнена в 1996 г. Она выполнялась на глубину до 18,3 м с врезкой в водонепроницаемый слой грунтов основания минимум на 1 м. В траншею, заполненную бентонитом, для дополнительной противофильтрационной защиты устанавливались полиэтиленовые панели шириной 2,45 м (рис.6). Толщина панелей составила 2,5 мм, для их надёжного закрепления использовались специальные замки. Стыки также герметизировались резиновым шнуром.

В [7] описан случай применения композитной противофильтрационной стены в дамбе Cross Delta хвостохранилища месторождения Big Island в Вайоминге (США). В нём хранятся отходы добычи минерала троны, сырья для производства соды.

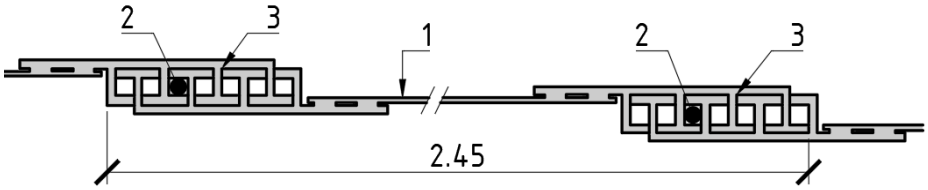


Рисунок 6 – Схема крепления между собой полиэтиленовый панелей внутри стены
1 – лист мембраны HDPE толщиной 2,5 мм; 2 – резиновый уплотняющий шнур; 3 – замок

Для снижения фильтрации потребовалось возвести противофильтрационную завесу непосредственно в чаще хвостохранилищах, в складируемых отходах. Сложность задачи заключалась в длине создаваемой завесы (1082 м). Было принято решение создавать завесу методом смешивания, из смеси разрабатываемого материала (хвосты) и цемента. Получаемая смесь приобретала прочность на сжатие примерно 0,25 МПа. Толщина стены составила не менее 45 см, глубина – до 15,5 м.

Чтобы обеспечить требуемую водопроницаемость ($1{,}0 \cdot 10^{-6}$ см/с) стена-завеса была выполнена композитной (рис.7). Ещё до затвердевания грунтоцементной смеси (не менее 18 часов) в стену с помощью специальной обоймы погружались виниловые листы.

Стена-завеса была возведена в 2015 г. Мониторинг фильтрационного режима выполненной стены подтвердил её герметичность.

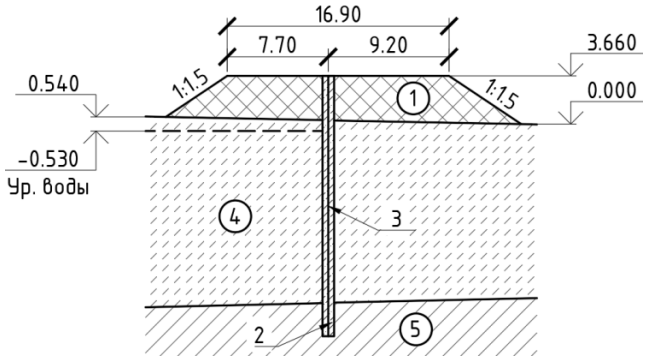


Рисунок 7 – Схема конструкции ограждающей дамбы хвостохранилища месторождения Big Island Mine (США)
1 – тело ограждающей дамбы из смеси грунта и хвостов; 2 – противофильтрационная стена из грунтоцементной смеси; 3 – виниловая пластина; 4 – хвосты; 5 – глинистый грунт основания

Планы применения противофильтрационных стен в ограждающих дамбах

Есть примеры планов применения «стен в грунте» в основании дамб новых дамб. Одним таким примером является проект хвостохранилища «Сухой Лог».

Планируется также дальнейшее применение противофильтрационных стен для ремонта или реконструкции ограждающих сооружений. Это связано с тем, что в некоторых условиях оно является единственным рациональным конструктивным решением. Примерами являются дамба Удоканского ГМК и золошлакоотвалов Аксуской ГРЭС.

*Хвостохранилище «Сухой Лог»*_планируется к созданию в Иркутской области для разработки золотоносного месторождения [8].

Строительство каменно-набросной дамбы предполагается в несколько очередей, с наращиванием в сторону нижнего бьефа. Она будет относиться к I классу ответственности сооружений, дамба четвёртой очереди будет достигать более 90 м в высоту (рис.8). В условиях наличия высокого напора для обеспечения фильтрационной прочности грунтов

основания потребуется создание противофильтрационной стены из буросекущихся свай. Глубина свай составит около 20 м, диаметр свай – 1,0 м. Эта завеса будет сопрягаться с экраном.

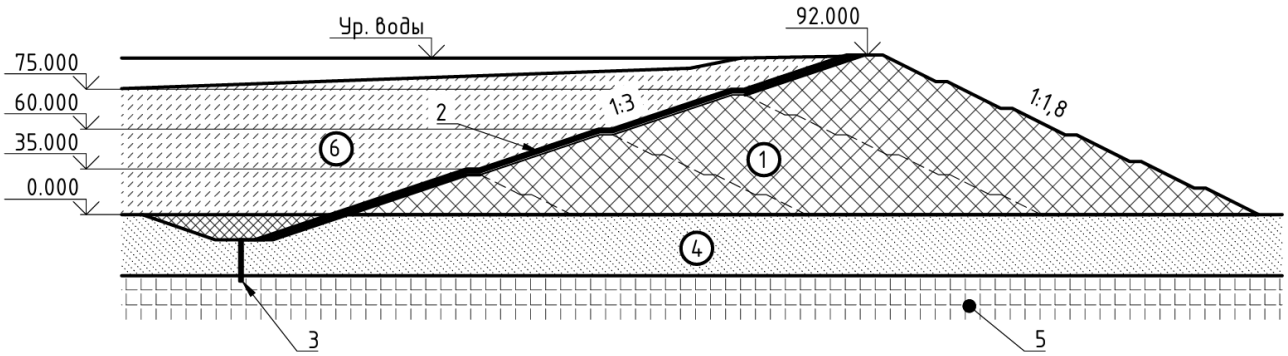


Рисунок 8 – Схема ограждающей дамбы хвостохранилища «Сухой Лог»
1 – тело ограждающей дамбы; 2 – противофильтрационный экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – нескальные грунты основания; 5 – скальные породы; 6 – хвосты

Хвостохранилище Удоканского горнометаллургического комбината расположено в Забайкальском крае. В первичной Западной дамбе Удоканского ГМК противофильтрационная стена потребовалась для выполнения ремонтно-восстановительных работ. Западная дамба имеет высоту 39,5 м, длину по гребню 184 м и относится ко II классу ответственности [9]. Она была запроектирована каменно-набросной с экраном из гидромата. Профиль дамбы принят очень пологим, т.к. она располагается на мощной толще (глубиной до 30 м) мёрзлых дисперсных грунтов (валунно-галечниковые, щебенистые грунты с глинистым заполнителем и крупными включениями). Верховой откос имеет уклон 1:3, низовой – 1:5 (рис.9).

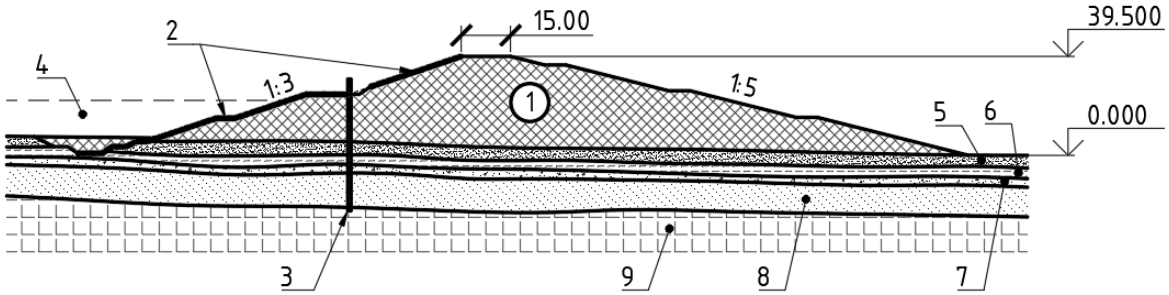


Рисунок 9 – Конструкция западной первичной дамбы хвостохранилища Удоканского горнометаллургического комбината
1 – тело дамбы из каменной наброски; 2 – экран из геомембраны, уложенный по верховому откосу; 3 – противофильтрационная стена; 4 – ложе хвостохранилища; 5, 6, 7, 8 – водопроницаемые слои грунтов основания; 9 – водоупор

Гидромат в конструкции дамбы был предусмотрен для защиты её мёрзлой упорной призмы от растепления при первоначальном наполнении, а также для защиты от проникновения в поры каменной наброски. В дальнейшем планировалось наращивание дамбы и её преобразование в комбинированную.

Возведение первичной Западной дамбы выполнялось с декабря 2019 г. по май 2020 г. При первичном заполнении хвостохранилища в мае-июне 2020 г была зафиксирована резкая сработка уровня. При визуальном обследовании была обнаружена утечка воды через нескальное основание дамбы, в котором сформировалась талая зона [9].

Для ремонта принято решение о создании в основании противофильтрационной стены из буросекущихся свай диаметром 1,2 м, расположенных с шагом 0,96 м. Стена будет расположена с верховой стороны дамбы и пересекать тело дамбы и слой нескального основания, заглубляя её в скалу (рис.10). Её глубина составит 57 м, а длина – 175 м. Стена-завеса будет создана из буросекущихся свай диаметром 1,2 м, расположенных с шагом 0,96 м. В качестве материала стены планируется использовать глиноцементобетон.

Дамбы золошлакоотвала Аксуской ГРЭС. Планируется применение противофильтрационной стены при реконструкции дамб золошлакоотвала Аксуской ГРЭС в Казахстане [10]. Реконструкция заключается в наращивании дамбы секции 1 и строительстве новых секций.

Секцию 1 предполагается наращивать на два яруса. Каждый из ярусов имеет высоту 7 м (рис.11). Наращивание дамбы требует усиления противофильтрационной защиты. В верхних ярусах противофильтрационным элементом будет являться экран из геомембраны, но в нижнем ярусе единственным способом является устройство противофильтрационной стены-завесы. Она пересечёт нижний ярус дамбы (высотой 8 м) и проницаемый слой нескального основания. Глубина завесы от гребня дамбы составит 16 м, а длина в плане – около 9 км. Стену-завесу планируется выполнить из бентонитовой глины, её толщина – 0,5 м. Она будет смыкаться с экраном из геомембраны, образуя целостный герметичный контур.

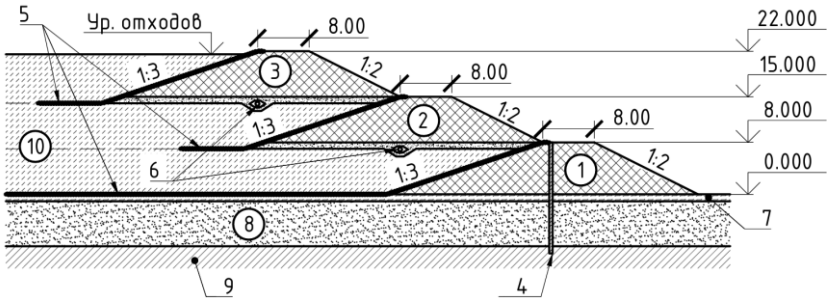


Рисунок 11 – Конструкция дамбы Аксуской ГРЭС после наращивания
1 – существующая дамба после ремонтно-восстановительных работ; 2 – дамба второй очереди; 3 – дамба третей очереди; 4 – противофильтрационная стена; 5 – экран из геомембраны; 6 – трубчатый дренаж; 7 – супесь основания; 8 – песок крупный в основании; 9 – глина основания; 10 – золошлаки

В новой секции 2Б золошлакоотвала Аксуской ГРЭС планируется строительство дамбы с комбинированным противофильтрационным устройством (экран из текстурированной геомембраны и противофильтрационная стена) (рис.12). Сопряжение геомембраны со стеной предполагается осуществлять при производстве работ погружением конца текстурированной геомембраны в глиноцементный раствор. Длина стены составит примерно 6,25 км. Её устройство позволит отказаться от покрытия ложа золошлакоотвала.

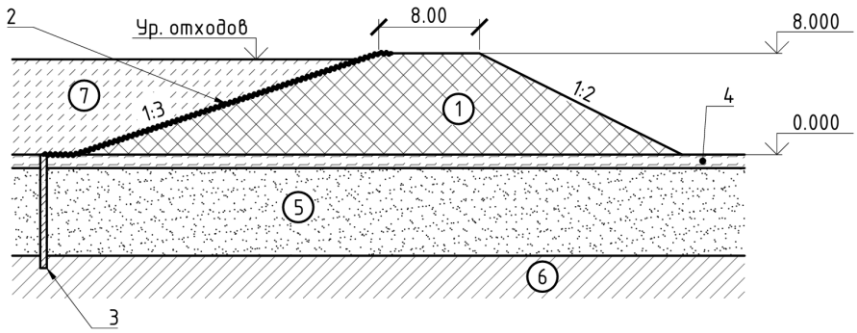


Рисунок 12 – Разрез по дамбе подсекции 2Б Аксуской электрической станции
1 – тело ограждающей дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – супесь основания; 5 – песок крупный в основании; 6 – глина основания; 7 – золошлаки

Выводы

1. Противофильтрационные «стены в грунте» редко применяются в конструкциях хранилищ жидких отходов промышленности, однако существуют случаи, когда их устройство является единственным рациональным решением. Это случай, когда необходимо исключить фильтрацию через проницаемый слой нескального основания, не изолируя ложе хранилища. Кроме того, противофильтрационные стены применяют как способ восстановления водонепроницаемости ограждающих дамб при ремонте и реконструкции, для обеспечения герметичности выведенных из строя объектов складирования отходов.
2. Противофильтрационные стены применяются как в составе комбинированных противофильтрационных устройств ограждающих дамб хранилищ жидких отходов промышленности, так и как единственное противофильтрационное устройство.
3. Для устройства противофильтрационных стен ограждающих дамб хвостохранилищ и шламонакопителей применяются разные технологии: способ «стена в грунте», способ буросекущихся свай, а также способ смешивания цемента с грунтом. Как правило, для устройства стен используются бентонитосодержащие материалы.
4. В дамбах хранилищ жидких отходов применяют особые конструкции противофильтрационных стен, которые не используют в плотинах водохранилищ. Это композитные стены, внутри которых установлены панели из пластика для дополнительной противофильтрационной защиты. Необходимость применения полимерных материалов обусловлена агрессивностью вод, фильтрующих из хранилищ, и/или высокими требованиями к водонепроницаемости стены.
5. По условиям работы противофильтрационные стены хранилищ жидких отходов отличаются от стен плотин водохранилищ, однако их проектные решения принимаются без учёта этого фактора. Условия работы противофильтрационных стен хвостохранилищ и шламонакопителей требуют дополнительного изучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ганичев И.А., Мещеряков А.Н., Хейфец В.Б. Новые способы устройства противофильтрационных завес // Гидротехническое строительство. 1961. №2. С.14–18.
2. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Advances in Civil Engineering. 2019. 4159306.
3. Gens A., Alonso E.E., Aznalco´llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism // Géotechnique. 2006. No. 3. P. 165–183.
4. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining. 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. P. 429–433.
5. Barnekow U., Jakubick A., Paul M., Jaaksoo R., Kaasik T. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia. 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. 2003. P. 487–494.
6. Owaidat L.M., Day S.R. Installation of a Composite Slurry Wall to Contain Mine Tailings. Fifth International Conference «Tailings and Mine Waste ‘98» (Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 January 1998). P. 421–429.
7. Conteras I., Bryant G.K. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing // Water Management. 2018. P.861–871.
8. Петраш Н.Г., Карпенко И.А., Карпухина М.В. Экономическая оценка месторождения Сухой Лог в современных условиях недропользования // Руды и металлы. 2008. №.2. С.89–104.

9. 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. P.858–863.

10. Шайтанов А.М., Талалаев Н.С. Применение комбинированного противофильтрационного элемента в составе ограждающей дамбы золошлакоотвала Аксуской электрической станции // Гидротехническое строительство. 2024. №12. С.8–12.

REFERENCES

1. Ganichev I.A., Meshheryakov A.N., Xejfecz V.B. *Novye sposoby ustrojstva protivofiltracionnyx zaves* [New methods of constructing anti-seepage curtains]. *Gidrotexnicheskoe stroitel`stvo*. 1961. No. 2, pp.14–18.

2. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. Advances in Civil Engineering. 2019. 4159306.

3. Gens A., Alonso E.E., Aznalco´llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. Géotechnique. 2006. No. 3, pp.165–183.

4. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining. 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, pp.429–433.

5. Barnekow U., Jakubick A., Paul M., Jaaksoo R., Kaasik T. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia. 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. 2003, pp.487–494.

6. Owaidat L.M., Day S.R. Installation of a Composite Slurry Wall to Contain Mine Tailings. Fifth International Conference «Tailings and Mine Waste ‘98» (Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 January 1998), pp. 421–429.

7. Conteras I., Bryant G.K. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing. Water Management. 2018, pp.861–871.

8. Petrash N.G., Karpenko I.A., Karpuxina M.V. *Ekonomicheskaya ocenka mestorozhdeniya Suxoj Log v sovremennyx usloviyax nedropolzovaniya* [Economic assessment of the Sukhoi Log deposit in modern conditions of subsoil use]. *Rudy i metally*. 2008. No. 2, pp.89–104.

9. 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.

10. Shajtanov A.M., Talalaev N.S. *Primenenie kombinirovannogo protivofiltracionnogo elementa v sostave ograzhdayushhej damby zoloshlakootvala Aksuskoj elektricheskoj stancii* [Application of a combined anti-seepage element in the composition of the protective dam of the ash dump of the Aksu power plant]. *Gidrotexnicheskoe stroitel`stvo*. 2024. No. 12, pp.8–12.

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)
Талалаев Никита Сергеевич – аспирант, Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет) (129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, e-mail: talalaevnicita@yandex.ru).	*Talalaev Nikita Sergeevich* – postgraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse, e-mail: talalaevnicita@yandex.ru)

ISSN 2413–9858

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2025, принята к публикации 02.04.2025.
The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 04.03.2025; accepted for publication 02.04.2025.