

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/39SAVN226.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Саинов, М. П. Современные технические решения дамб хвостохранилищ в Чили и Перу / М. П. Саинов, Д. А. А. Анампа, Г. А. Козырев, П. И. Евстафиев // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/39SAVN226.pdf>.

For citation:

Sainov M.P., Anampa D.A.A., Kozyrev G.A., Evstafiev P.I. Modern technical solutions of tailings storage facility dams in Chile and Peru. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 39SAVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/39SAVN226.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.953

Саинов Михаил Петрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Энергетических и гидротехнических сооружений»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: SainovMP@mpei.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Анампа Донайре Антони Анибал

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Аспирант

Козырев Георгий Алексеевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Россия, Москва
E-mail: kogea2004@mail.ru

Евстафиев Павел Игоревич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва
E-mail: YevstafiyevPI@mpei.ru

Современные технические решения дамб хвостохранилищ в Чили и Перу

Аннотация. В Чили и Перу построено множество хвостохранилищ для складирования отходов горнодобывающей промышленности. Ограждающие дамбы хвостохранилищ достигают большой высоты. В статье описаны применяемые в Чили и Перу принципы выбора конструкций земляных и каменно-набросных дамб, которые приспособлены для работы в сейсмически активном регионе. Описаны случаи разрушения хвостохранилищ, вызванные разжижением грунта при землетрясении.

Конструкции земляных намывных дамб разработаны эмпирическим путём. Полностью запрещено наращивание дамб в сторону верхнего бьефа. Чтобы избежать разжижения грунта при динамическом воздействии, предусматривают следующие меры по недопущению

водонасыщения дамбы: на верховом откосе выполняют экран из геосинтетических материалов, а на подошве устраивают дренаж. Для обеспечения устойчивости сооружения, низовой откос выполняют пологим (уклон положе 1:4), а грунт уплотняют катками.

Распространение получили насыпные дамбы — земляные и каменно-набросные. В каменно-набросных дамбах противифльтрационный элемент выполняют в виде экрана из железобетона или геосинтетических материалов. В основании выполняют протильтрационные завесы.

Разработанные конструктивные решения дамб позволили обеспечить их устойчивость при сильных землетрясениях.

Чили и Перу являются также лидерами и в строительстве нового типа хвостохранилищ, в которых складировются сгущенные хвосты. Приведены сведения о таких хвостохранилищах. В сгущенных отходах концентрация твёрдого вещества составляет 40–65 %, а в пастообразных отходах — 65–80 %.

Ключевые слова: хвостохранилище; сгущенные хвосты; намывная дамба; каменно-набросная дамба; землетрясение; геомембрана; разжижение грунта

Введение

Добыча полезных ископаемых всегда сопряжена с образованием большого количества отходов. Неотъемлемой частью крупных металлургических производств являются хвостохранилища. Хвостохранилища — это объекты размещения (хранения и захоронения) хвостов, т. е. отходов, которые получают при механической обработке минерального сырья и состоят из мелких фракций.

Как известно, содержание металла в руде мало и обычно не превышает 3 % по весу, поэтому большая часть добываемого сырья, пустая порода, возвращается в природную среду в виде отходов. Чем больше добывается металла, тем больше производится и отходов.

Существует два способа размещения хвостов — мокрый и сухой. При добыче металлов, как правило, применяется мокрый способ. Отходы переработки металлосодержащих руд поступают на складирование в виде пульпы. Пульпа представляет собой суспензию — смесь воды и частиц измельченной породы во взвешенном состоянии. За счёт измельчения породы и смешивания с водой объём складироваемых отходов в несколько раз превосходит объём извлечённой из недр горной породы.

Однако проблема размещения отходов состоит не только в их большом количестве, но и в том, что отходы, образующиеся в процессе добычи металлов, могут быть токсичными. В пульпе содержатся химические реагенты, оставшиеся после обработки породы. Например, отходы золотодобычи содержат опасные для человека и окружающей среды цианиды.

Ограждающие дамбы хвостохранилищ относятся к гидротехническим сооружениям и являются опасными производственными объектами. По статистике вероятность разрушения хвостохранилищ в несколько раз выше, чем у других водоподпорных сооружений, в среднем, ежегодно из 3 500 хвостохранилищ в мире разрушаются три [1]. Разрушение дамб хвостохранилищ часто влечёт за собой не только экономический и экологический ущерб, но и человеческие жертвы и неблагоприятные социальные последствия.

По этим причинам в странах с развитой горнодобывающей промышленностью, остро стоят проблемы строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации хвостохранилищ.

В этой связи интерес представляет опыт в этой сфере, накопленный в Чили и Перу. Эти страны расположены в Андах и богаты рудами цветных металлов (меди, золота, серебра).

Чили обладает 28 % мировых запасов меди и является крупнейшим её производителем [2]. Перу является вторым в мире производителем серебра и третьим по добыче меди. Добыча полезных ископаемых является одной из ключевой отраслей экономики этих стран.

По данным [2] горнодобывающая промышленность Чили ежегодно производит более 800 миллионов тонн отходов в год. По данным на 2022 г. [2] в Чили насчитывалось в общей сложности 742 хвостохранилища, из которых два находились в стадии строительства, 104 — в эксплуатации, 463 — не использовались, а 173 — являлись заброшенными.

Опыт Чили и Перу в сфере строительства и эксплуатации хвостохранилищ интересен с точки зрения способов решения двух проблем.

Первая проблема — это высокая сейсмическая активность. Именно в Андах произошло самое мощное в истории сейсмологических наблюдений землетрясение магнитудой 9,2–9,5, это Великое Чилийское землетрясение 22 мая 1960 г. Чили и Перу неоднократно сталкивались с проблемой разрушения хвостохранилищ при сейсмических воздействиях и достигли определённых успехов в обеспечении их сейсмостойкости.

Проблема обеспечения сейсмостойкости хвостохранилищ является актуальной для многих стран мира, в том числе и России. В [3–6] описаны случаи разрушения хвостохранилищ из-за землетрясений. По статистике 14–16 % аварий хвостохранилищ вызваны землетрясениями [7].

Вторая проблема — это необходимость складирования большого количества отходов в условиях засушливого климата. Для решения этой проблемы в Чили и Перу применяют передовые технологии складирования отходов в сгущенной и пастообразной консистенции.

В этой публикации мы постарались собрать и обобщить основные сведения о строительстве и эксплуатации хвостохранилищ Чили и Перу.

Методы и принципы исследования

Сведения о хвостохранилищах Чили и Перу были получены из актуальных открытых источников, из научно-технических публикаций зарубежных авторов [8–16].

Анализу подлежало не только современное положение дел с хвостохранилищами этих стран, но и история развития этой отрасли техники. Особое внимание было уделено случаям аварий дамб хвостохранилищ.

Результаты

Из истории строительства и эксплуатации хвостохранилищ

Активная добыча металлов в Перу и Чили осуществляется уже несколько столетий, поэтому к концу XIX века все рудники с высоким содержанием металлов в руде прекратили свою работу. Для промышленной добычи металлов потребовалось применение более эффективных технологий.

В XX веке добыча стала осуществляться с помощью флотации, технологии, которая позволяет отделять минералы металлов от пустой горной породы [2].

Процесс флотации сопровождается образовыванием пульпы, поэтому для её размещения создавать искусственные водоёмы — хвостохранилища. Транспорт и укладка пульпы осуществляется методом гидромеханизации, по стальным трубам, а также деревянным и железобетонным лоткам.

Ограждающие дамбы хвостохранилищ могут быть насыпными и намывными. Насыпные дамбы отсыпаются из грунтов карьеров или полезных выемок. Намывные дамбы возводятся методом гидромеханизации, как правило, из самих хвостов. Каждый из типов дамб имеет свои преимущества и недостатки. Основным преимуществом намывных дамб является их меньшая стоимость, т. к. материалом дамбы являются сами хвосты, а их укладка не требует больших трудозатрат. Ещё одним преимуществом намывных дамб является то, что они возводятся постепенно, по мере заполнения хранилища выполняется наращивание и дамб. По этим причинам намывные дамбы получили наибольшее распространение в Чили и Перу.

Однако вскоре проявился основной недостаток намывных дамб — они могут потерять свою устойчивость из-за низкой плотности, высокой степени их водонасыщения и низкой сдвиговой прочности хвостов. Риск разрушения хвостохранилищ резко возрастает при сейсмическом воздействии. По данным [8] с начала XX века в Чили землетрясения привели к разрушению 38 хвостохранилищ. В Перу 35 % аварий хвостохранилищ были вызваны землетрясениями [9].

Наиболее частой причиной разрушения стало разжижение водонасыщенных грунтов при динамическом воздействии, когда грунт теряет свою механическую прочность и ведёт себя как жидкость. Наибольшую опасность разжижение хвостов представляет для дамб намывного типа. Первая авария такого типа произошла 1 декабря 1928 года в Чили — при землетрясении магнитудой 8,2 разрушилась намывная дамба Barahona № 1 высотой 65 м [2; 10; 11].

Для того, чтобы повысить устойчивость ограждающих дамб, их стали возводить только из крупнозернистых фракций хвостов. Для разделения (сегрегации) хвостов по фракциям стали использовать гидроциклоны, устройства принцип действия которых основан на использовании центробежных сил.

Однако это не предотвратило ряд других аварий хвостохранилищ Чили и Перу [9]. Самой крупной аварией стало разрушение в Чили двух хвостохранилищ, которое произошло 28 марта 1965 года из-за землетрясения магнитудой 7,5 [10]. В результате аварии погибли более 300 человек [11]. Причиной разрушения намывной дамбы El Cobre вновь стало разжижения хвостов.

После аварии дамбы El Cobre в некоторых проектах стали отдавать предпочтение насыпным дамбам. Насыпными были построены дамбы Colihues высотой $H = 83$ м, El Indio ($H = 74$ м) и Los Leones ($H = 160$ м) [8].

С целью обеспечения безопасности хвостохранилищ в 1970 г. в Чили был принят указ, регулирующий проектирование, строительство и эксплуатацию хвостохранилищ [2; 12; 13]. В нём было рекомендовано не применять способ наращивания дамб в сторону верхнего бьефа, т. к. в этом случае ограждающая дамба опирается на хвосты. По данным [9] в Перу 73 % аварий происходило на хвостохранилищах верхового типа. С 1970-х годов в Чили и Перу при проектировании дамб стали отдавать предпочтение способам наращивания в сторону нижнего бьефа и по центру.

В указе 1970 г. были установлены ряд требований к дамбам хвостохранилищ [8]:

- значение коэффициента запаса сейсмостойкости сооружений должно составлять не менее 1,2;
- требования к плотности укладываемых хвостов;
- требования по устройству ленточного дренажа на подошве дамбы с целью уменьшения их водонасыщения.

После разрушения 12 ноября 1996 г. хвостохранилища Amatista в Перу от землетрясения магнитудой 7,5 [2; 9] нормативные требования были дополнены и ужесточены. В 2007 году в Чили был издан новый указ по проектированию, строительству и эксплуатации дамб хвостохранилищ.

Новым указом был введён полный запрет на способ наращивания дамб в верховую сторону. Аналогичный запрет на был введён и в Перу.

В указе были установлены ряд новых требований [8]:

- требования к геометрическим параметрам профиля дамбы;
- требование к содержанию в складываемых хвостах пылеватых и тонкозернистых фракций;
- требования к мониторингу деформаций и фильтрационного режима хвостохранилищ.

Так как в большинстве случаев разрушенные дамбы имели довольно крутой внешний откос (уклон от 1:1,2 до 1:1,7) в инженерной практике стали выполнять этот откос пологим.

Эти требования и рекомендации стали основой для разработки новой, сейсмостойкой конструкции земляных намывных дамб. Спроектированные по новым правилам смогли перенести последующие землетрясения без разрушения. Сильнейшее из них, землетрясение Maule, произошло в 2010 г. Его основной толчок 27 февраля 2010 г. имел магнитуду 8,8 и является шестым по силе в мире [2; 10].

Помимо землетрясений частыми причинами разрушения хвостохранилищ в Перу в XXI веке являются нарушения при строительстве (25 %) и ошибки при проектировании (20 %) [9]. Аварии происходят в виде потери устойчивости, а также водной эрозии. Разнообразие причин аварий подчёркивает важность установления и строго соблюдения нормативных правил, а также анализа успешного опыта проектирования и строительства.

Технические решения по обеспечению водонепроницаемости хвостохранилищ

Противофильтрационные мероприятия выполняют для недопущения водонасыщения дамбы и во избежание попадания токсичных веществ в окружающую среду. Запрещён сброс из хвостохранилищ неочищенных вод (фильтрата) в водные объекты. Противофильтрационные мероприятия различаются для хвостохранилищ по добыче меди и по золотодобыче.

Хвостохранилища золотодобычи представляют бóльшую опасность для окружающей среды. Технологический процесс извлечения золота выполняют в два этапа — грубой и чистой флотации, поэтому устраивают два хвостохранилища. В хранилищах второй стадии из-за наличия в хвостах цианидов должна быть обеспечена полная герметичность. Поэтому верховой откос дамбы и ложе хранилища полностью покрывают геомембраной [12]. В хранилищах первой стадии геомембрана может быть выполнена неполной. Примером хвостохранилища золотодобычи служит Tambora в Перу.

В хранилищах добычи меди покрытие геомембраной выполняют только при необходимости и только частичным, на верховом откосе дамбы. Для снижения фильтрации через основание, в нём выполняют противофильтрационную завесу.

Геосинтетические противофильтрационные покрытия проектируются в составе геомембран и слоёв геотекстиля. Используют геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП). Также используют геомембраны из поливинилхлорида (ПВХ), их преимуществом является наличие меньшего количества сварных швов. Для защиты от прокола геомембрану укладывают на слой нетканого

иглопробивного геотекстиля. Для защиты от ультрафиолетового излучения слой нетканого геотекстиля.

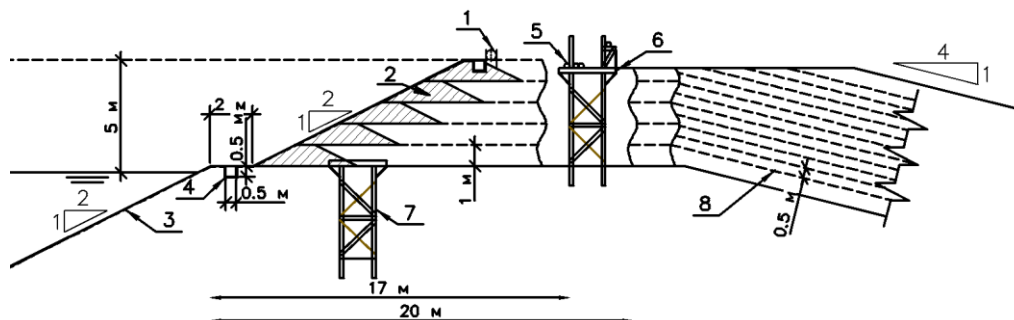
В дамбе Tunshurucu в Перу противофильтрационный экран выполнен из битумной геомембраны [12]. Преимуществами битумной мембраны является то, что она может работать в экстремальных погодных условиях и более долговечна, чем синтетическая.

Противофильтрационные завесы в основании дамб выполняют различными способами — используют траншейные стены, «стены в грунте» и инъекционные завесы. Траншейные стены выполняют глубиной до 6 м, а средняя глубина «стен в грунте» составляет 12 м [12]. Для устройства противофильтрационных стен используют пластичный бетон, т. е. бетон с добавкой бентонитовой глины. Коэффициент фильтрации такого материала составляет 10^{-7} см/сек. Инъекционные завесы выполняют из цемента, силикатных материалов или акриловых смол [12].

Технические решения земляных дамб

Земляные дамбы возводятся постепенно, по мере заполнения хвостохранилища путём намыва из циклонированных песков. Применяется правило, что в таком песке содержание частиц размером менее 0,075 мм не должно превышать 18 % [12]. Это необходимо для того, чтобы проницаемость внешних зон была как минимум в 100 раз превышала проницаемость хвостов [8]. По данным [8] коэффициент фильтрации циклонированных песков составляет от 10^{-3} до 10^{-4} см/с.

Намыв циклонированных песков осуществляют с гребня в сторону нижнего бьефа (рис. 1). Наращивание дамбы может осуществляться в сторону нижнего бьефа или по оси, в дамбах золотодобычи — только в сторону нижнего бьефа.



1 — пульпопровод пылеватых хвостов; 2 — ограждающие дамбочки; 3 — экран из полиэтиленовой геомембраны; 4 — анкер геомембраны; 5 — пульпопровод циклонированного песка; 6 — используемая деревянная эстакада; 7 — неиспользуемая деревянная эстакада; 8 — слои циклонированного песка, уплотняемые укаткой

Рисунок 1. Схема строительства дамбы из циклонированного песка [12]

Внешний откос дамбы выполняют пологим, обычно с уклоном 1:4 [12]. Уложенный песок уплотняется гладкими вибрационными катками до достижения коэффициента уплотнения 0,95.

Под намываемым телом дамбы предварительно устраивают ленточный дренаж. Внутренний (верховой) откос дамбы выполняют с уклоном 1:2, часто его покрывают геомембраной. Ширина гребня дамбы принимается не менее 20 м.

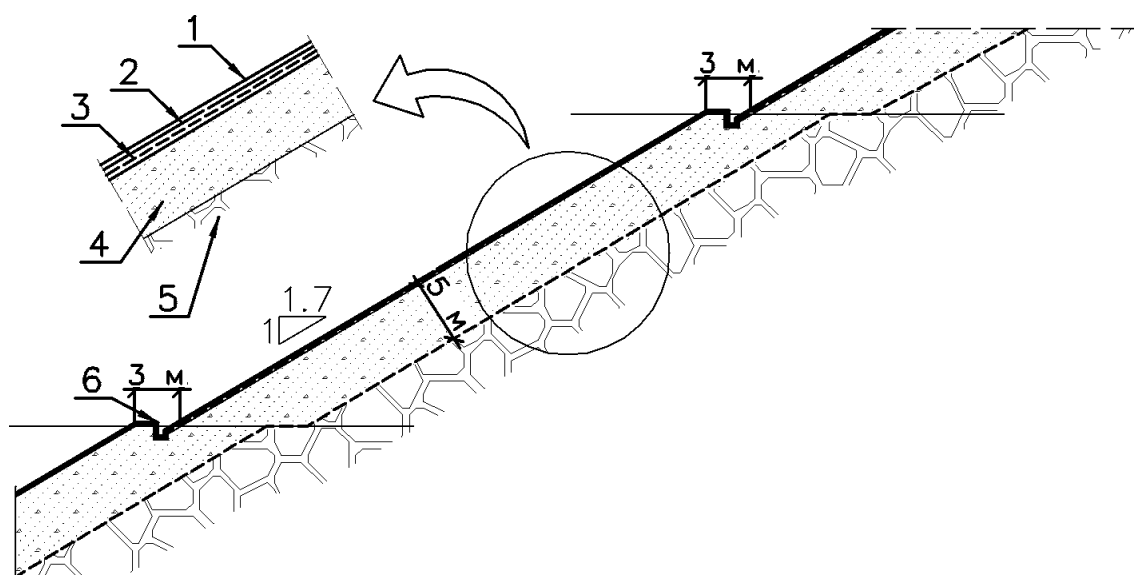
Первой дамбой, которая была построена по таким правилам, является дамба хвостохранилища Las Tórtolas в Чили [10]. Текущая высота этой дамбы составляет около 90 м. Аналогичную конструкцию имеют ещё более высокие дамбы: Quillayes (1998 г.) проектной высотой 198 м и El Maipo высотой 237 м (2006 г.) [10; 12].

В Чили и Перу запроектированы и возводятся ещё несколько сверхвысоких дамб из циклонированного песка: в Чили — Ovejeria (130 м), Quebrada Blanca (310 м), в Перу — Quebrada Linga (305 м), Quebrada Enlozad (200 м), Quebrada Honda (180 м), Quebrada Cortadera (300 м) [10; 12].

Технические решения каменно-набросных дамб

Каменно-набросные дамбы возводят методом наращивания в низовую сторону. Для возведения дамбы используют карьерный камень или камень из отвалов. Камень отвалов используют с крупностью не более 25,4 см, его укладывают слоями 1 м с уплотнением вибрационным катком [12].

Часто в дамбах из отвального камня противофильтрационный элемент устраивают из геомембраны. При этом верховой откос дамбы выполняется с уклоном 1:1,7–1:2. Под экраном устраивают слой песчаного грунта с содержанием гравия, гальки крупностью не более 7,6 мм (рис. 2). Для экрана обычно используют геомембрану из ПЭВП толщиной 2 мм. Она укладывается на нетканый геотекстиль плотностью 400 г/м², а сверху укрывается защитным слоем геотекстиля плотностью 200 г/м².



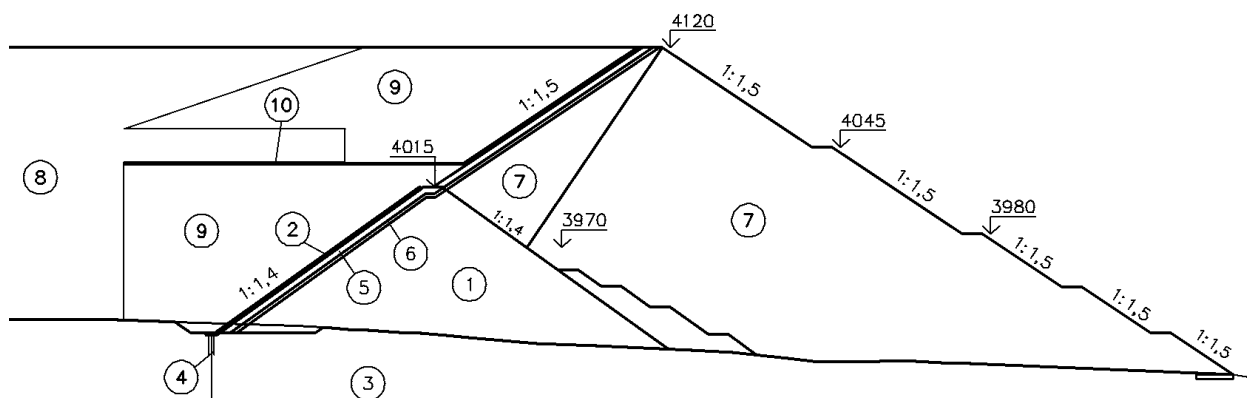
1 — защитный слой нетканого геотекстиля плотностью 200 г/м²; 2 — геомембрана из ПЭВП толщиной 2 мм; 3 — слой нетканого геотекстиля плотностью 400 г/м²; 4 — сортированная гравийно-песчаная смесь крупностью до 75 мм; 5 — сортированная каменная наброска (крупностью не более 250 мм); 6 — сварной шов геомембраны

Рисунок 2. Схема конструкции гидроизоляции верхового откоса дамбы из каменной наброски [12]

Ряд эксплуатируемых каменно-набросных дамб имеет проектную высоту более 150 м: в Чили — Candelaria (160 м), Los Diques (156 м), Andacollo (150 м), Los Leones (160 м), в Перу — Quebrada Ayash (265 м), Las Bambas (220 м), Constancia (170 м), Quebrada Tunshurucu (245 м) [10; 12].

Конструкции каменно-набросных дамб Перу (Antamina, Las Bambas) имеют несколько иную конструкцию по сравнению с описанной.

Дамба Antamina начала возводиться 2000 году. Дамба первой очереди имеет высоту 130 м, после наращивания полная высота дамбы должна достигнуть 240 м [13]. Она спроектирована и построена как типичная плотина с железобетонным экраном. Её верховой откос имеет уклон 1:1,4, а низовой — 1:1,5 (рис. 3).



1 — каменная насыпь дамбы первой очереди; 2 — железобетонный экран; 3 — скальное основание; 4 — инъекционная завеса; 5 — подэкрановая зона; 6 — транзитная зона; 7 — каменная насыпь дамбы второй очереди; 8 — хвосты; 9 — крупнозернистые хвосты; 10 — экран

Рисунок 3. Схема конструкции
каменно-набросной дамбы Antamina (Перу) (составлена авторами)

Проектная высота дамбы Las Bambas составляет 220 м [14]. Первичная дамба высотой 80 м выполняется каменно-набросной. Её верховой откос имеет уклон 1:1,75 и сформирован из бетонных бордюрных блоков. На них закреплён геокомпозит на основе ПВХ. Толщина геомембраны составляет 1,5 мм, геотекстиль имеет плотность 200 г/м². В скальном основании дамбы предусмотрена цементационная завеса.

Применение хранилищ со сгущенными и пастообразными отходами

Чили и Перу являются одними из мировых лидеров в применении технологии складирования сгущенных и пастообразных отходов обогащения руды. Её использование началось в конце 1990-х годов. Но сейчас большинство хранилищ со сгущенными и пастообразными складированием отходов располагаются в Чили и Перу, а интенсивность подачи отходов достигает 100 тысяч тонн в сутки [14].

В обычной пульпе содержание твердых веществ (по весу) составляет 25–40 %. Складирование отходов такой консистенции требует резервуаров большой ёмкости и площади. Помимо этой проблемы в условиях Чили и Перу существует ещё климатическая проблема, климат этих стран — засушливый, для них характерно недостаточное атмосферное увлажнение и высокие температуры воздуха. Для Чили и Перу характерен дефицит воды. В Чили 4 эксплуатируются хвостохранилища, которые обеспечиваются не пресной, а морской водой [10].

Испарение ведёт к излишним потерям воды из хвостохранилищ, необходимой для технологического процесса добычи металла. В таких условиях выгодно заранее (перед складированием) извлечь из отходов избыток воды, сгустив пульпу. Сгущение пульпы до состояния тяжёлой суспензии осуществляется с помощью синтетических флокулянтов в специальном оборудовании. Использование технологий позволяет вернуть до 80 % воды для повторного водоснабжения технологического процесса [10].

В зависимости от консистенции помимо обычных выделяют сгущенные и пастообразные хвосты. В сгущенных отходах концентрация твёрдого вещества составляет 40–65 %, а в пастообразных — 65–80 % [14]. Такие отходы обладают высокой вязкостью, для их гидротранспорта необходимо специальное насосное оборудование (центробежные и объёмные насосы).

Хранилища сгущенных и пастообразных отходов имеют ряд отличий от традиционных. При их складировании не происходит сегрегации отходов по крупности, их складирование осуществляется слоями. Благодаря высокой вязкости поверхность отходов может быть не горизонтальной, а иметь небольшой наклон. Теоретически уклон может достигать 4 %, однако на практике средний уклон не превышает 2 % [14]. Благодаря наклонному размещению отходов для складирования того же объёма требуется дамба меньшей высоты.

Хранилища пастообразных отходов могут быть устроены принципиально иначе по сравнению с традиционными. В обычном хвостохранилище во внутренней зоне находится прудок, в котором происходит отстаивание пульпы, а поверхность хвостов образует пляж, наклон которого направлен от периметра хранилища к его центру. В хранилище с пастообразными хвостами их подачу можно осуществлять во внутренней зоне, в этом случае уклон поверхности будет направлен от центра к периферии.

Применяются два типа хранилищ сгущенных и пастообразных хвостов. Хвостохранилища первого типа устраиваются в понижениях рельефа, в ущельях, балках, оврагах, которые перегораживаются дамбой. Это хранилища балочного типа. Примером такого хранилища является хвостохранилище Нуасчуасаја в Перу [14].

Хранилища второго типа используются при равнинном рельефе. Они полностью или частично ограждаются дамбами по периметру. Часто они имеют ячеистое строение в плане, они разделены внутренними дамбами на отдельные участки. Отдельно устраивается резервуар для сбора осветлённой воды. Хвостохранилища второго типа распространены в Чили, ряд таких хранилищ устроены в пустыне Атакама.

В Чили функционирует 8 хвостохранилищ сгущенных отходов, 6 — пастовых отходов, а в Перу — 7 хвостохранилищ сгущенных отходов, 3 — хвостохранилищ пастовых отходов [14]. В хвостохранилище Тоготосчо (Перу) складировается до 140 тысяч тонн сгущенных отходов в сутки, для подачи используются 10 объёмных насосов. В будущем при реализации проекта Talabre (Чили) планируется утилизировать 400 тысяч тонн в сутки [14].

Сгущение хвостов на специальных установках является дорогостоящим, но имеет экологический и экономический эффект.

Кроме того, в Чили и Перу развивается ещё одна новая технология складирования отходов горной промышленности — сухое складирование [16; 17].

Заключение

1. В Чили и Перу разработаны и применяются типовые технические решения дамб хвостохранилищ различного типа, которые обеспечивают необходимый уровень безопасности в условиях высокой сейсмической активности. В этих странах осуществлён полный отказ от способа наращивания ограждающих дамб в сторону верхнего бьефа.
2. Во многом безопасность дамб обеспечивается за счёт борьбы с фильтрацией и водонасыщением тела дамбы. В теле плотины часто устраивается экран из геомембраны, противофильтрационный элемент часто устраивается и в основании. Обязательным элементом намывных земляных дамб является ленточный дренаж у подошвы.
3. Чили и Перу являются лидерами в применении современных технологий сгущения хвостов, применяются хвостохранилища со сгущенными и пастообразными отходами. Это позволяет уменьшить объёмы хвостохранилищ и занятые ими площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.1155/2019/4159306.
2. Cacciuttolo C., Atencio E. Past, Present, and Future of Copper Mine Tailings Governance in Chile (1905–2022): A Review in One of the Leading Mining Countries in the World // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, 19, 13060. DOI: 10.3390/ijerph192013060.
3. Okusa S., Anma S. Slope failures and tailings dam damage in the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake // *Engineering Geology*. 1980. 16(3-4). Pp.195–224. DOI: 10.1016/0013-7952(80)90016-2.
4. 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. DOI: 10.1155/2019/4159306.
5. Ishihara K., Ueno K., Yamada S., Yasuda S., Yoneoka T. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. 68. Pp. 3–22. DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.10.010.
6. Valenzuela L. Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile // *Obras y Proyectos*. 2016. 19. Pp. 6–22. DOI: 10.4067/S0718-28132016000100001.
7. Stark T.D., Moya L., Lin J. Rates and Causes of Tailings Dam Failures // *Advances in Civil Engineering*. 2022. 7895880. DOI: 10.1155/2022/7895880.
8. Villavicencio G., Espinace R., Palma J., Fourie A., Valenzuela P. Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*. 2014. 51. Pp. 449–464. DOI: 10.1139/cgj-2013-0142.
9. Quintana-Castro J.J., Salas-Cachay L.R., Espinoza-Ayala K.K., Escalante-Pillaca G.H., Cubas-Parimango N.O., Gallarday-Bocanegra T.E., BediaGuillen C.S., Guia-Pianto M.B., Soto Juscamayta L.M. Historical Cases of Tailings Dam Failures in Peru: An Analysis of The Triggering Factors // *International Journal of Religion*. 2024. 5(11). Pp. 8494–8518. DOI: 10.61707/x7xfvp19.
10. Valenzuela L. Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile // *Obras y Proyectos*. 2016. 19. Pp. 6–22. URL: <https://sci-hub.ru/10.4067/s0718-28132016000100001>.
11. Williams D.J. Lessons from Tailings Dam Failures — Where to Go from Here? // *Minerals*. 2021. 11, 853. DOI: 10.3390/min11080853.
12. Cacciuttolo C., Pastor A., Valderrama P., Atencio E. Process Water Management and Seepage Control in Tailings Storage Facilities: Engineered Environmental Solutions. Applied in Chile and Peru // *Water*. 2023, 15. 196. DOI: 10.3390/w15010196.
13. Alvarado Ancieta C.A. Desarrollo histórico, tipología, inventario y técnica de las presas y embalses en el Perú [Историческое развитие, типология, перечень и технология строительства плотин и водохранилищ в Перу] // *Revista de Obras Públicas [Журнал общественных работ]*. 2007, 3, Pp. 39–72. URL: https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2007/2007_septiembre_3480_04.pdf.

14. Vargas C.C., Pulido A.M. Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance. Sustainability. 2022. 14, 10901. DOI: 10.3390/su141710901.
15. Cacciuttolo C., Valenzuela F. Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining // Water. 2022, 14, 1741. DOI: 10.3390/w14111741.
16. Vargas C.C., Campomanes G.P. Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution // Minerals. 2022, 12, 889. DOI: 10.3390/min12070889.
17. Cacciuttolo, C.; Atencio, E. An Alternative Technology to Obtain Dewatered Mine Tailings: Safe and Control Environmental Management of Filtered and Thickened Copper Mine Tailings in Chile // Minerals. 2022, 12, 1334. DOI: 10.3390/min12101334.

Sainov Mikhail Petrovich

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

E-mail: SainovMP@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Anampa Donayre Anthony Anibal

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Kozyrev Georgiy Alekseevich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: kogea2004@mail.ru

Evstafiev Pavel Igorevich

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

E-mail: YevstafiyevPI@mpei.ru

Modern technical solutions of tailings storage facility dams in Chile and Peru

Abstract. A great number of tailings storage facilities for storing wastes of mineral resource industry have been constructed in Chile and Peru. Protections dams of tailings storage facilities reach great heights. The article describes the used in Chile and Peru principles in selection of structural designs of earth and rockfill dams for operation in high seismicity region. Cases of tailings storage facility destruction caused by soil liquefaction during an earthquake are described.

Structures of earth hydraulically filled dams have been elaborated by empirical way. Raising of dams towards the upstream side is fully prohibited.

To prevent soil liquefaction under dynamic impact, the following measures are taken to prevent water saturation of the dam: a geosynthetic face is installed on the upstream slope, and drainage is installed at the base. To ensure the stability of the structure, the downstream slope is made gentle (with a slope of approximately 1:4), and the soil is compacted with rollers.

Embankment dams (earthfill and rockfill dams) have become widespread. In rockfill dams, the seepage control element is a face made of reinforced concrete or geosynthetic materials. Seepage control curtains are installed at the foundation.

The design solutions developed for these dams ensure their stability during strong earthquakes.

Chile and Peru are leaders in construction of tailings storage facilities of the new type, where thickened tailings are stored. Information about such tailings storage facilities is given. In thickened waste, the concentration of solids is 40–65 %, and in pasty waste, 65–80 %.

Keywords: tailings storage facility; thickened tailings; hydraulic fill dam; rockfill dam; earthquake; geomembrane; soil liquefaction