

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОТВАЛА ПОЛУСУХИХ ХВОСТОВ

С. П. Бахаева[✉], Е. А. Коновалова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ baxaevas@mail.ru

Аннотация: Приведена оценка уровня риска гидродинамической аварии на хвостохранилище методом дерева отказов, результаты инженерных исследований пространственно-временного изменения физико-механических свойств отвала полусухих хвостов кеков цианирования. Установлено, что в результате укладки хвостов тонкими слоями 2–5 м, промораживания их в зимний период и консолидации техногенного массива уменьшилась их влажность, увеличились плотность и прочностные характеристики. Представлен уникальный опыт реализации научно-технических решений по формированию отвала полусухих хвостов на гидроизолированном основании. Реализация этих решений позволила в два раза увеличить общую вместимость отвала, снизить уровень риска гидродинамической аварии за счет исключения негативного влияния гидростатических и гидродинамических сил на дамбу и обеспечить ее устойчивость при сейсмической интенсивности района 8 баллов с коэффициентом устойчивости не ниже нормативного (при вероятности обрушения не больше 2,9 %) за счет выполнения специального мероприятия, позволившего увеличить сопротивление сдвигу вдоль основания отвала.

Результаты исследований и десятилетний опыт эксплуатации отвала полусухих хвостов могут быть полезны проектным и эксплуатирующим организациям при размещении хвостохранилищ на ограниченных площадях в северной климатической зоне.

Ключевые слова: отвал полусухих хвостов, дамба, гидродинамическая авария, уровень риска, дерево отказов, коэффициент устойчивости, вероятность обрушения, вероятный ущерб

Благодарность: Авторы признательны А. В. Зайцеву, техническому директору; В. А. Кошелеву, замдиректора по промышленной безопасности и охране труда; Э. Н. Дроздову, главному маркшейдеру, за помощь в проведении исследований и предоставленные материалы.

Для цитирования: Бахаева С.П., Коновалова Е.А. Управление устойчивостью отвала полусухих хвостов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):53-60. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-53-60>.

SEMI-DRY TAILINGS DUMP STABILITY MANAGEMENT

S. P. Bakhaeva[✉], E. A. Kononova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University”,
Kemerovo, Russian Federation
✉ baxaevas@mail.ru

Abstract: The article presents an assessment of the risk level of a hydrodynamic accident at a tailings dump using the “fault tree” method, and the results of engineering studies of the spatial-temporal change in the physical and mechanical properties of a dump of semi-dry tailings of cyanidation cakes. It was established that as a result of laying tailings in thin layers of 2 to 5 m, freezing them in the winter period and consolidation of the man-made massif, their humidity decreased, density and strength characteristics increased. The unique experience of implementing scientific and technical solutions for making the dump of semi-dry tailings on an inclined waterproof base is presented. The implementation of those solutions has allowed to double the total dump capacity. The risk level of a hydrodynamic accident has been reduced by eliminating the negative impact of hydrostatic and hydrodynamic forces on the dam. The dam stability has been ensured at a seismic intensity of 8 points in the area with a coefficient greater than the standard (with a probability of collapse of no more than 2.9%) due to a special measure to increase the shear resistance along the base of the dump.

The results of the research and ten years of experience in the operation of a semi-dry tailings dump can be useful to design and operating organizations when placing tailings storage facilities in limited areas in the northern climate zone.

Keywords: semi-dry tailings dump, dam, hydrodynamic accident, risk level, fault tree, stability factor, failure probability, probable damage

Acknowledgments: The authors are grateful to A. V. Zaitsev, Technical Director; V. A. Koshelev, Deputy Director for Industrial Safety and Labor Protection; E. N. Drozdov, Chief surveyor for research assistance and materials provided.

For citation: Bakhaeva SP, Konovalova EA. Semi-dry tailings dump stability management. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):53-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-53-60>.

Введение

На горнопромышленных предприятиях, связанных с эксплуатацией золоторудных месторождений полезных ископаемых, отходы обогащения I–III класса опасности обычно складировать в хвостохранилища, сооружение которых ведет к антропогенному воздействию на больших территориях [4], вызывает опасные гравитационно-геологические процессы и явления [22], требует огромных материальных затрат на строительство и поддержание в надлежащем состоянии ограждающих дамб. В случае разрушения дамбы возникает высокий риск развития гидродинамической аварии, излив хвостов на прилегающую территорию с нанесением экологического [3, 14] и других видов ущерба.

В связи с ограничением площади под размещение хвостохранилища, проектными решениями предусматривалось формирование отвала полусухих хвостов, предназначенного для складирования тонкодисперсных (90 % – класс минус 0,074 мм) кеков цианирования золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ), обезвоженных на фильтр-прессах до влажности 25 %.

Площадка отвала полусухих хвостов включала спланированное гидроизолированное основание, покрытое полимерным (комбинированным, четырехслойным) экраном, для размещения полусухих кеков цианирования, огороженное с нагорной части обваловкой. В нижней части площадки располагался прудок-накопитель для сбора выделяющейся из кеков влаги и атмосферных осадков. Разделение площади, занимаемой отвалом хвостов и прудком-накопителем, выполнено фильтрующей обваловкой, располагаемой на гидроизолированном основании. Собираемая в прудке-накопителе вода с помощью плавающей насосной станции по трубопроводу подавалась в систему оборотного водоснабжения золотоизвлекательной фабрики.

В верхней части площадки отвала полусухих хвостов располагалось здание станции фильтрации кеков цианирования. Подача хвостовой пульпы на станцию фильтрации с ЗИФ осуществлялась по пульповоду. Отфильтрованная вода перекачивалась обратно на ЗИФ по водоводу оборотного водоснабжения. Полусухие кеки выдавались из здания цеха фильтрации ленточным конвейером и складировались в отвал мобильными конвейерами и поворотным стакером-отвалообразователем в верхней части площадки.

В геоморфологическом отношении проектируемый отвал полусухих хвостов располагался на высокой левобережной террасе второго уровня реки Хайкта и на ее склоне. Поверхность территории площадки техногенная (ранее на данном участке производилась отработка россыпного месторождения золота), имела переменный угол наклона от 2° до 5°, в тальвеге лога – около 12°, что обеспечивало сток воды в прудок-накопитель и осушение мелкодисперсных кеков цианирования (рис. 1).

Первоначально эксплуатация первой секции сооружения

проходила в проектном режиме. Однако, когда тангенциальная составляющая веса отвала превысила сопротивление сдвигу по контакту отвала с основанием, в весенний период возникли подвижки намывного массива. По результатам инструментального маркшейдерского мониторинга было обнаружено, что происходит смещение отвала полусухих хвостов вниз по наклонной площадке.

Для оценки состояния отвала, установления причин его смещения и принятия конструктивных решений по снижению риска и размера последствий от гидродинамической аварии были разработаны научно-технические решения, реализация которых позволила предотвратить возникновение аварийной ситуации.

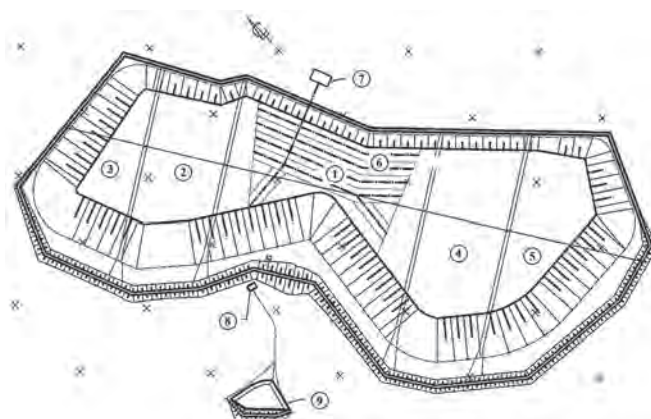


Рис. 1. Проектное положение отвала полусухих хвостов:

- 1 – 1-я секция (1–2-й года); 2 – 2-я секция (3–4-й года);
 - 3 – 3-я секция (4–5-й года); 4 – 4-я секция (6–7-й года);
 - 5 – 5-я секция (7–8-й года); 6 – отвал полусухих хвостов, $V = 7,85$ млн m^3 ,
 - 7 – станция фильтрации кеков цианирования;
 - 8 – станция обезвреживания аварийных сливов; 9 – фильтрующий прудок-отстойник обезвреженных аварийных сливов /
- Fig. 1. Design position of semi-dry tailings dump:
- 1 – 1st section (years 1–2); 2 – 2nd section (years 3–4);
 - 3 – 3rd section (years 4–5); 4 – 4th section (years 6–7);
 - 5 – 5th section (years 7–8); 6 – semi-dry tailings dump, $V = 7.85$ mln. m^3 ; 7 – cyanation cake filtering plant;
 - 8 – overflow treatment plant;
 - 9 – filtering pond for treated overflow

Цель исследований

Изучить пространственно-временную изменчивость физико-механических характеристик полусухих хвостов кеков цианирования и разработать рекомендации по условиям формирования устойчивого отвала на наклонном основании из полимерного экрана.

Материал и методы исследования

Для реализации поставленной цели использовались экспериментальные и теоретические методы исследований: инженерно-геологическое и гидрогеологическое изучение состояния массива полусухих хвостов с бурением скважин на полную мощность отвала, отбором проб грунтов (хвостов)

и лабораторные испытания с определением их физико-механических характеристик; геомеханический мониторинг, включающий инструментальные маркшейдерские наблюдения деформаций ограждающей дамбы; анализ степени риска гидродинамической аварии методом дерева отказов; оценка напряженно-деформируемого состояния системы отвал – основание; анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала.

Оценка уровня риска гидродинамической аварии

На этапе декларирования безопасности введенных в эксплуатацию первой и второй секций расчетом вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии на комплексе ГТС отвала полусухих хвостов, методом дерева отказов выявлены основные виды опасных повреждений ГТС, способные привести к чрезвычайной ситуации (рис. 2); выполнена оценка уровня риска (табл. 1) и последствий гидродинамической аварии.

В результате установлено, что сценарием наиболее тяжелой аварии, имеющей максимальные негативные последствия, является мгновенное разрушение тела дамбы прудка-накопителя первой секции (см. рис. 1) в результате потери устойчивости, истечение потока токсичных отходов в нижний бьеф и распространение их по прилегающей территории.

Уровень безопасности оценивался как пониженный, уровень риска аварии – условно приемлемый (1), вероятность возникновения аварии по расчетному значению коэффициента риска составила $P_a = 0,0051$ (табл. 1).

В соответствии с требованиями «Методических рекомендаций...» [25] вероятность возникновения аварии оценивалась по расчетному значению коэффициента риска $r_a = v \cdot \lambda$:

$$P_a = 0,5 \cdot \operatorname{erfc} \cdot \left(\beta \frac{\ln \left(\frac{r_a}{r_k} \right)}{\ln \left(\frac{r_{доп}}{r_k} \right)} \right), \quad (1)$$

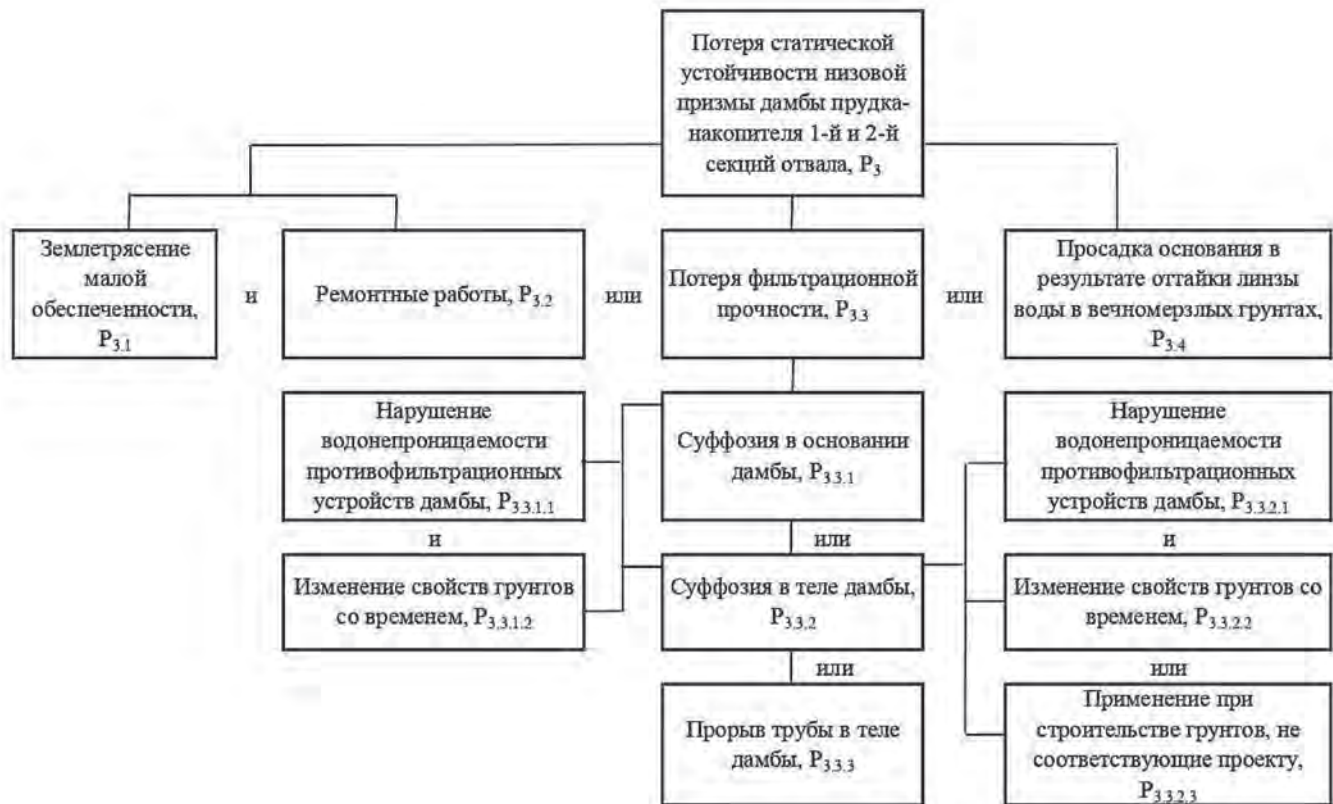


Рис. 2. Дерево отказов дамбы прудка-накопителя 1-й и 2-й секций отвала / Fig. 2. "Fault tree" for containment pond dam of the 1st and 2nd sections of the dump:

P_3 – loss of static stability of downstream dam of the containment pond at the 1st and 2nd sections of the dump, $P_{3.1}$ – Earthquake of low probability, $P_{3.2}$ – Repair work, $P_{3.3}$ – Loss of seepage strength, $P_{3.3.1}$ – Seepage failure at the dam foundation, $P_{3.3.1.1}$ – Damage of the watertightness of the dam anti-seepage devices, $P_{3.3.1.2}$ – Changes in soil properties over time, $P_{3.3.2}$ – Seepage failure in the dam body, $P_{3.3.2.1}$ – Damage of the watertightness of the dam anti-seepage devices, $P_{3.3.2.2}$ – Changes in soil properties over time, $P_{3.3.2.3}$ – Use of soils in construction that do not correspond to the design, $P_{3.3.3}$ – Pipe burst in the dam body, $P_{3.4}$ – Subsidence of the foundation as a result of thawing of the water lens in permafrost soils

Таблица 1 / Table 1

Оценка уровня риска аварии / Accident risk level assessment

Интегральный код (Integral code of)		Коэффициент (Coefficient)			Уровень безопасности (Safety level)	P_a , 1/год	Уровень риска аварии ГТС (HS accident risk level)
опасности аварии ГТС (HS accident hazard)	уязвимости ГТС (HS vulnerability)	λ	v	r_a			
1 123	1 210	0,5313	0,3167	0,17	Пониженный (Low)	0,0051	Условно приемлемый (Conditional acceptable)

где r_k – катастрофическое значение коэффициента риска ($r_k = 1$); $r_{доп}$ – допустимое значение коэффициента риска, при превышении которого не будет обеспечен нормальный уровень безопасности ГТС ($r_{доп} = 0,15$); β – коэффициент вероятности, зависящий от класса гидротехнического сооружения (для IV класса, $\beta = 1,95$); $\operatorname{erfc}x$ – вероятностная функция (по формуле (2), $x = 1,82$).

$$\operatorname{erfc}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (2)$$

При мгновенном разрушении тела дамбы и средней скорости движения 4,3 м/с поток мог достигнуть русла реки Хайкта, расположенной в 500 м от накопителя, через две минуты. При этом общий размер вероятного вреда в ценах 2010 года составлял 237 млн рублей (663 млн рублей – в ценах 2025 года).

Нарушение устойчивости отвала полусухих хвостов

В силу разнообразия видов отходов горнодобывающей промышленности [20], особенностей их инженерно-геологических свойств [21] и воздействия на окружающую среду [1, 10, 16] различными аспектами мониторинга этих объектов с целью снижения риска возникновения аварий и их поражающих факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду, занимаются специалисты различного профиля: горные инженеры [7, 15], геологи и гидрогеологи [8, 11], гидротехники [2], экологи [4, 14], предлагающие проведение комплексных видов мониторинга в течение всего времени эксплуатации сооружений [12].

Для анализируемого здесь отвала полусухих хвостов от начала его формирования вдоль гребня ограждающей дамбы, со стороны низового откоса на участке напорного фронта, были заложены рабочие реперы наблюдательной станции. Конструкция рабочих реперов – металлические стержни диаметром 3 мм, с резьбой в верхней части для закрепления постоянных отражательных призм.

Маркшейдерской службой рудника был организован инструментальный мониторинг. Наблюдения велись точным электронным тахеометром 5Та5 со стационарной станции в виде жестко закрепленного в нижнем бьефе металлического штатива, что позволяло исключать влияние погрешностей центрирования и измерения высоты инструмента и отражателя.

Погрешность положения наиболее удаленного репера, отстоящего от станции на расстоянии 550 м, не превышала в плане 6,65 мм (3), по высоте – 5,66 мм (5).

$$m_p = \pm \sqrt{\frac{m_p^2}{\rho^2} l^2 + m_l^2}, \quad (3)$$

$$m_l = \pm (5 + 3 \cdot 10^{-6} d), \quad (4)$$

$$m_h^2 = m_l^2 \sin^2 \delta + \frac{m_\delta^2}{\rho^2} l_n^2 \cos^2 \delta + m_k^2 \frac{4d^2}{R^2}, \quad (5)$$

где m_p – средняя квадратическая погрешность (СКП) измерения угла ($m_p = 5''$); ρ – коэффициент для перехода из градусной меры в радианную ($\rho = 206265$); l – наклонная длина от инструмента до отражателя, мм; m_l – СКП измерения длин линий, мм, при измерении электронным тахеометром 5Та5 определяется по формуле (4); d – горизонтальное проложение, км;

m_δ , m_k – средние квадратические погрешности, обусловленные соответственно погрешностями измерения угла наклона ($m_\delta = 5''$), коэффициента рефракции (максимальное значение средней квадратической погрешности коэффициента рефракции при измерении углов наклона в начале и в конце дня – $m_{k_{max}} = \pm 0,03d^2/R$); δ – угол наклона ($\delta_{max} = 15^\circ$), – наклонная длина; R – радиус Земли ($R = 6370$ км).

В первые месяцы наблюдались оседания реперов, график оседаний имел затухающий характер от 10 до 1 мм/сут, что было связано с уплотнением пород тела дамбы. Согласно журналу маркшейдерских наблюдений, полное затухание фильтрационно-деформационных процессов в намывном массиве завершилось через 100 дней, что согласуется с подобными исследованиями горного института КНЦ РАН [6]. В последующие годы деформации по реперам, установленным по гребню дамбы, не выявлялись. Однако на третий год эксплуатации, в весенний период, при визуальном обследовании в районе секции № 1 на поверхности верхнего яруса отвала (на расстоянии 3–4 м от бровки откоса) были обнаружены трещины криволинейного очертания с шириной раскрытия 10–15 см. Вторая линия трещин располагалась на расстоянии 7–8 м от бровки, ширина раскрытия составляла 30–40 см, видимая глубина – до 1 м. Более мелкие трещины наблюдались практически на всей поверхности отвала, возникли подвижки отвала в статическом режиме. Важно было предотвратить динамический процесс, так как в этом случае тело оползня приобретает кинетическую энергию: силам трения, которые стремятся остановить движение оползня, противопоставляется не только сила тяжести, но и инерциальные силы движущейся массы [5]. Формирование первой секции отвала было остановлено, работы переведены на вторую секцию, и принято решение о проведении исследований для оценки напряженного состояния системы отвала – основание первой секции, максимальная высота намытых хвостов составляла на тот момент 31 м.

В приоткосной части отвала в пределах призмы возможного обрушения были заложены дополнительные рабочие реперы. Инструментальными маркшейдерскими наблюдениями зафиксировано медленное смещение (со скоростью 1,5 мм/сутки) отвала хвостов в сторону прудка. Направление векторов смещений в плане коррелировало со склоном рельефа основания отвала.

Инженерные исследования отвала полусухих хвостов

Полевыми инженерно-геологическими и гидрогеологическими исследованиями (бурением скважин на полную мощность с отбором кернов сформированного отвала полусухих хвостов (метасоматиты переизмельченные, темно-серого цвета) с замерами уровня грунтовых вод, выполненными в 2013 году) установлено: техногенный горизонт подземных вод не встречен, влажность верхнего слоя (до 7 м) достигает 34 %, с глубиной (от поверхности отвала) влажность уменьшается: в срединной части равна 17–19 %, на контакте с основанием – 22 %. Высокая влажность верхних слоев связана с дополнительным водонасыщением хвостов атмосферными осадками. Мерзлые грунты обнаружены на всей территории отвала, глубина промерзания изменялась от 1,5 до 13 м, такой диапазон промерзания связан с календарными сроками складирования хвостов в отвал. По результатам лабораторных испытаний хвостов на одноплоскостной срез и трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме установлены прочностные характеристики: угол

внутреннего трения – $31\text{--}37^\circ$; сцепление – $0,003\text{--}0,009$ МПа, а также плотность – $1,88\text{--}2,14$ т/м³.

Расчетный коэффициент устойчивости отвала (1,05) по полученным при лабораторных испытаниях физико-механическим характеристикам грунтов отвала оказался меньше нормативного значения (1,2). Вероятность мгновенного разрушения тела дамбы прудка-накопителя увеличивалась. В этой связи возникла необходимость разработки научно-технических решений по обоснованию безопасности отвала полусухих хвостов, которые кардинально меняли технологию формирования отвала.

После реализации научно-технических решений в 2016 году проведены повторные инженерно-геологические исследования грунтов отвала (пробурено пять скважин с отбором проб через два метра по глубине), по результатам которых установлено, что за три года эксплуатации отвала в результате консолидации техногенного массива улучшились его характеристики, влияющие на устойчивость, что совпадает с результатами исследований других ученых [23].

Улучшенные характеристики, влияющие на устойчивость отвала:

- влажность хвостов значительно уменьшилась и от поверхности к основанию отвала составляла $25\text{--}11\text{--}22\%$;
- плотность и прочностные характеристики увеличились в $1,2\text{--}1,5$ раза;
- большая часть хвостов оказалась в замороженном состоянии.

Для рекомендуемого нами контура отвала расчетный коэффициент устойчивости (1,25) системы отвал – основание, рассчитанный по результатам инженерно-геологических и гидрогеологических исследований 2016 года, оказался больше нормативного значения (1,20).

Научно-технические решения по формированию отвала

Суть научно-технических решений, основанных на многократных оценках устойчивости системы отвал – основание, заключалась в следующем:

1. В нижней части площадки под размещение полусухих хвостов поверх противофильтрационного полимерного экрана отсыпать фильтрующую дамбу из глыбовых скальных очень прочных ($R_c > 120$ МПа) пород вскрыши карьера. Ширина по гребню должна быть достаточной для проезда и разворота автосамосвалов.
2. Организовать автотранспортную доставку хвостов (автомобилем «БелАЗ-7547» грузоподъемностью 42 т), подаваемых с конвейера станции фильтрации в кузов автосамосвала и бульдозерную («Cat D-6L» фирмы Катерпиллер) раскладку хвостов по площади третьей секции отвала (рис. 3).
3. Формирование отвала производить бульдозером от фильтрующей дамбы вверх по склону по всей площадке секции небольшими слоями по $2\text{--}5$ м с тщательным уплотнением колесным транспортом.
4. При достижении поверхностью отвала отметки гребня фильтрующей дамбы производить очередное наращивание фильтрующей дамбы и отсыпку следующего слоя хвостов производить также снизу (от фильтрующей дамбы) вверх.
5. Предусмотреть на площадке подъездные автодороги к станции фильтрации кеков цианирования, станции и установкам оборотного водоснабжения и обезвреживания аварийных сливов, прудкам-накопителям, емкости оборотных растворов.

6. Обеспечить ширину ($6\text{--}8$ м) гребня дамб и обваловок, позволяющую в случае необходимости движение по ним автотранспорта и землеройной техники для производства ремонтных работ.

7. Для снижения динамических нагрузок постоянное движение транспорта по гребню дамб и обваловок запретить.

8. От поверхностного дождевого стока площадку отвала защитить кюветом существующей автодороги, проходящей выше по рельефу над площадкой отвала полусухих хвостов, выполняющим функции нагорной канавы.

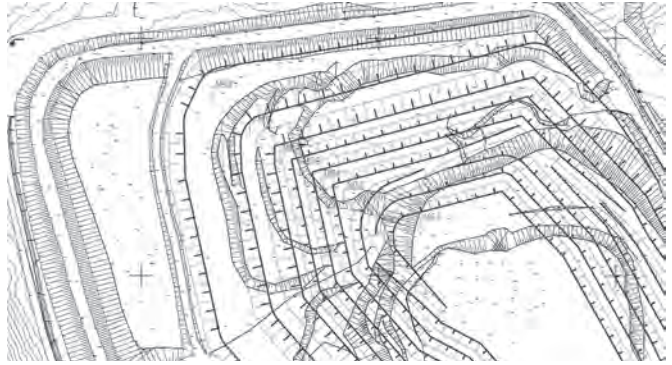


Рис. 3. Схема формирования третьей секции отвала полусухих хвостов в соответствии с научно-техническими решениями /

Fig. 3. Scheme of the 3rd section formation at the semi-dry tailings dump in accordance with scientific and technical solutions

Расчетами устойчивости отвала полусухих хвостов с учетом результатов инженерно-геологических исследований, выполненных в 2016 году, обоснована возможность увеличения высоты отвала с отметки 580 м до отметки 605 м.

Реализация научно-технических решений по обоснованию безопасности отвала полусухих хвостов обеспечила:

- увеличение общей вместимости отвала кеков с $7,85$ млн м³ (по первоначальному проекту) до $16,52$ млн м³ (по проекту технического перевооружения, реализующего научно-технические решения по формированию отвала);
- снижение уровня риска гидродинамической аварии за счет сокращения объемов воды в отстойном прудке, которая в зимний период промораживалась с хвостами, в летний – испарялась за счет распределения хвостов на большой площади;
- исключено негативное влияние гидродинамических и гидростатических сил, которые являются основными разрушающими факторами, действующими на ограждающие дамбы [17].

Дальнейшее наращивание отвала до отметки 605 м под генеральным углом $17\text{--}18^\circ$ производилось ярусами, отсыпаемыми под углом естественного откоса – 33° по 10 м до горизонта 580 м и по 5 м до горизонта 605 м. Для обеспечения генерального угла наклона отвала между отсыпаемыми ярусами оставлялись бермы, ширина которых рассчитывалась из условия устойчивости отвала.

При достижении поверхностью отвала конечной отметки 605 м оставшуюся воду из отстойного пруда откачали с помощью насосных установок и заполнили емкость скальной вскрышной породой, измельченной до фракции $60\text{--}100$ мм. Таким образом возникновение гидродинамической аварии, способной привести к чрезвычайной ситуации (ущерб окружающей среде), исключалось в связи с отсутствием в емкостях воды. Вероятность возникновения аварии $P_a = 0$ событий в год (табл. 2).

Вместе с тем появилась необходимость оценки риска развития деформаций и нарушения устойчивости откосов отвала полусухих хвостов кеков цианирования, высота которого на этапе его консервации достигла 80 м.

Анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала

Анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала полусухих хвостов на этапе его консервации в 2022 году произведен по методике для опасных производственных объектов и включал:

- идентификацию опасностей;
- оценку частоты, частости и накопленной частости (вероятности);
- последствий в случае деформаций анализируемого сооружения для здоровья, жизни людей, имущества и окружающей природной среды.

Оценке риска развития деформаций при фактическом положении отвала предшествовали многократные расчеты устойчивости откосов, выполненные методом итерации с использованием теорий предельного равновесия, алгебраического и векторного сложения сил.

Критерием безопасности отвала полусухих хвостов является расчетный коэффициент устойчивости, который обуславливается отношением гравитационных и тангенциальных сил, действующих в теле отвала полусухих хвостов и сил сопротивления сдвигу по наклонному контакту в виде полимерного экрана.

При сейсмической интенсивности района 8 баллов по шкале MSK-64 (карта С) общего сейсмического районирования ОСП-2015 (СП 14.13330.2018) оценка напряженно-деформированного состояния выполняется на базе гибридного моделирования [9, 24], пространственной конечно-элементной модели [13], методом конечных элементов [19], а также по расчетному коэффициенту устойчивости:

$$n = \frac{\sum[(P_i \cos \alpha_i - Q_i \sin \beta_i) \operatorname{tg} \varphi_i + C_i l_i]}{\sum(P_i \sin \alpha_i - Q_i \cos \beta_i)}, \quad (6)$$

$$Q_i = K_0 \cdot K_1 \cdot P_i \cdot k_c, \quad (7)$$

где P_i – вес блока, мН; α_i – угол наклона основания в блоке, град.; Q_i – сейсмическая сила, мН; β_i – угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы, измеренный в вертикальной плоскости, град.; φ_i – угол внутреннего трения грунта в блоке, град.; $C_i l_i$ – силы сцепления, направленные параллельно соответствующим границам блоков, мН; K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (для отвалов $K_0 = 1,0$); K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений (для откосов отвалов $K_1 = 0,12$); k_c – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях ускорения свободного падения g ($k_c = 0,05$).

Анализ результатов расчета коэффициента устойчивости по восьми сечениям показал, что наиболее напряженный участок расположен с юго-западной стороны, минимальный расчетный коэффициент устойчивости здесь составил 1,15, что меньше нормативного значения 1,20.

В качестве мероприятия по увеличению сопротивления сдвигу вдоль основания отвала были рассчитаны параметры пригрузки из скальной вскрышной породы карьера, который формировался под углом естественного откоса 34–35°, шириной по гребню 20–25 м до уровня бермы между первым и вторым ярусами (ориентировочно до отметки 570 м).

Поверочными расчетами установлено, что в этом случае при нормативном 1,20 расчетный коэффициент устойчивости отвала составит: для детерминистического подхода FS (deterministic) – 1,236; вероятностного FS (mean) – 1,248. Вероятность обрушения (PF) откосов отвала полусухих хвостов, сформированного до отметки 605 м (80 м), не превысит 2,9 % (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 51).

Выводы

1. Важнейшей составляющей в обеспечении безопасных условий эксплуатации хвостохранилищ является комплексный геомеханический мониторинг, включающий визуальные

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнических сооружений отвала полусухих хвостов / Results of calculation of probable harm that may be caused to life, health of individuals, property of individuals and legal entities as a result of an accident at hydraulic structures of the semi-dry tailings dump

Параметр (Parameter)	Год расчета вероятного вреда от гидродинамической аварии (Year of calculation of probable damage from a hydrodynamic accident)			
	2010 (1-я и 2-я секции) (section 1 and 2)	2013 (3-я секция) (section 3)	2016 (комплекс) (complex)	2021 (комплекс) (complex)
Уровень безопасности (Safety level)	Пониженный (low)	Нормальный (normal)	Нормальный (normal)	Нормальный (normal)
Уровень риска (Risk level)	Условно приемлемый (conditional acceptable)	Приемлемый (acceptable)	Приемлемый (acceptable)	Приемлемый (acceptable)
Вероятность, событий в год (Probability, events per year)	$1,05 \times 10^{-2}$	$1,52 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$	10^{-6}
Ущерб, тыс. руб. ¹ (Damage, thousand Rub. ²)	663 086	600 019	605 343	0

¹Пересчет ущерба вероятного вреда от гидродинамической аварии в цены 2025 года выполнен с помощью инфляционного калькулятора на сайте: <https://уровень-инфляции.рф>.

наблюдения и инструментальный маркшейдерский контроль напряженно-деформированного состояния отвала полусухих хвостов. Организация мониторинга от начала формирования хвостохранилища позволила на ранней стадии обнаружить первые признаки нарушения устойчивости системы отвал – основание и разработать научно-технические решения, позволившие предотвратить развитие деформаций на ранней стадии.

2. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования тела отвала в период его эксплуатации показали, что при складировании хвостов формируется сложная неоднородная структура техногенного массива, происходит существенное изменение прочностных характеристик пород и степени его обводнения, поэтому немаловажно определять физико-механические свойства хвостов с учетом времени консолидации. При этом основное влияние на улучшение упомянутых характеристик оказала технология формирования отвала, позволяющая обеспечить дренаж полусухих хвостов и их консолидацию. Результаты наших исследований совпадают с выводами, полученными другими учеными на подобных сооружениях [8], [20] и [24].

3. Реализация научно-технических решений по формированию отвала полусухих хвостов позволила изменить:

- уровень безопасности сооружения от пониженного до нормального;
- уровень риска гидродинамической аварии от условно приемлемого до невероятного (настолько невероятного, что может быть исключен из рассмотрения [18]);
- вероятность события от $1,05 \times 10^{-2}$ до 10^{-6} ;
- вероятный ущерб от гидродинамической аварии с 605 млн рублей до нуля (табл. 2);
- общую вместимость отвала с 7,85 млн м³ (по первоначальному проекту) до 16,52 млн м³ (по проекту технического перевооружения), разработанному проектной организацией согласно нашим научно-техническим рекомендациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Артемова ОС, Язовцева АМ. Оценка предотвращенного эколого-экономического ущерба при решении проблем на Джидинском вольфрам-молибденовом комбинате. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;11. [Artemova OS, Yazovtseva AM. Assessment of prevented ecological and economic damage when solving problems at the Dzhibida tungsten-molybdenum plant. *Mining information and analytical bulletin*. 2010;11 (In Russ.)]
2. Беллендир ЕН, Филиппова ЕА, Буряков ОА и др. Специфика оценки состояния и управление безопасностью высоких намывных отвалов. *Гидротехническое строительство*. 2015;4. [Bellendir EN, Philippova EA, Buryakov OA, et al. Specifics of condition assessment and safety management of high reclaimed waste dumps. *Hydrotechnical construction*. 2015;4 (In Russ.)]
3. Гальперин АМ, Кутепов ЮИ, Круподеров ВС. Инженерно-геологическое обеспечение формирования и последующего использования отвальных массивов на горных предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;1:20-1. [Galperin AM, Kutepov YuI, Krupoderov VS. Engineering and geological support for the formation and subsequent use of waste mass at mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin*. 2015;1:20-1 (In Russ.)]
4. Еременко ЕА, Фузеина ЮН, Ворошилов ЕВ и др. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района. *Вестник Московского университета*. 2021;1:3-13 [Eremenko EA, Phuzeina YuN, Voroshilov EV, et al. Anthropogenic transformation of the relief of the Vorkuta industrial region. *Bulletin of the Moscow University*. 2021;1:3-13 (In Russ.)]
5. Захаров ВН, Малинникова ОН, Трофимов ВА и др. Оценка устойчивости оползневого склона и развития его деформаций во времени. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;6:11-22 [Zakharov VN, Malinnikova ON, Trofimov VA, et al. Assessment of the stability of a landslide slope and the development of its deformations over time. *Physical and technical problems of mining development*. 2014;6:11-22 (In Russ.)]
6. Калашник НА. 4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;11(4):10-5. [Kalashnik N.A. 4D modeling of soil consolidation of the tailings storage facility of JSC Kovdorsky GOK. *Bulletin of Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;11(4):10-5. (In Russ.)]
7. Ковлеков ИИ. Безопасность гидротехнических сооружений при эксплуатации месторождений на Севере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;7:154-63. [Kovlekov II. Safety of hydraulic structures during the exploitation of deposits in the north. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;7:154-63 (In Russ.)]
8. Кутепов ЮИ, Кутепова НА, Сергина ЕВ. Изменение напряженного состояния и физико-механических свойств намывных пород при формировании горных природно-технических систем. *Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. Москва, 2014. [Kutepov YuI, Kutepova NA, Sergina EV. Changes in the stress state and physical and mechanical properties of alluvial rocks during the formation of mountain natural and technical systems. *Sergeevskie chteniya. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Moscow, 2014 (In Russ.)]
9. Лолаев АБ, Бадоев АС, Оганесян ЭХ и др. Повышение устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища при ее эксплуатации. *Хронос*. 2019;6(33):57-61. [Lolaev AB, Badoev AS, Oganesyanyan EH, et al. Increasing the stability of the tailings dam during its operation. *Chronos*. 2019;6(33):57-61 (In Russ.)]
10. Маковозова ЗЭ, Аксенова МА, Кесвани Ч и др. Вопросы оценки влияния опасных экзогенных процессов на устойчивость природнотехногенных систем на примере Фиагонского хвостохранилища. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;7:76-86 [Makovozova ZE, Aksenova MA, Kesvani Ch, et al. Issues of assessing the impact of hazardous exogenous processes on the stability of natural and man-made systems using the example of the Fiagdon tailings dump. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;7:76-86 (In Russ.)]
11. Максимов ДА. Влияние фильтрационных нарушений на уровень фильтрующихся вод и состояние насыпного гидротехнического сооружения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;5-1:280-91. [Maksimov DA. The influence of filtration disturbances on the level of filtered waters and the state of the embankment hydraulic structure. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;5-1:280-91 (In Russ.)]
12. Поспехов ГБ, Кондакова ВН, Кутепова НА. Обоснование методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогаительных предприятий. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;5(121). [Pospekhov GB, Kondakova VN, Kutepova NA. Justification of the methodology for monitoring the state of waste storage facilities of coal preparation plants. *Mine surveying and subsoil use*. 2022;5(121) (In Russ.)]
13. Сайидкосимов СС, Раимжанов БР, Умаров ФЯ и др. Прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния дамб хвостохранилищ на базе пространственной конечно-элементной модели. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;9:38-55. [Sayyidkosi-

symov SS, Raimzhanov BR, Umarov FYa, et al. Predictive assessment of the stress-strain state of tailings dams based on a spatial finite element model. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;9:38-55 (In Russ.)]

14. Хохлаев АВ, Рыбников ПА, Цейтлин ЕМ, Коновалов и др. Использование интегрального показателя экологического риска для обоснования природоохранных решений в условиях неопределенности на примере накопителей жидких промышленных отходов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;11-1:71-89. [Khokhryakov AV, Rybnikov PA, Tseitlin EM, et al. Using an integrated indicator of environmental risk to justify environmental decisions under conditions of uncertainty using the example of liquid industrial waste storage facilities. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;11-1:71-89 (In Russ.)]

15. Ческидов ВВ. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений. *Горная промышленность*. 2017;4(134):78-80. [Cheskidov VV. Hydrogeomechanical monitoring of the state of slope structures. *Mining industry*. 2017;4(134):78-80 (In Russ.)]

16. Чяснавичус Ю. Анализ поражающих факторов, возникающих в результате аварии на хранилищах жидких отходов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;9:299-302. [Chyasnavichyus Yu. Analysis of damaging factors arising from accidents at liquid waste storage facilities that have a negative impact on the environment. *Mining information and analytical bulletin*. 2012;9:299-302 (In Russ.)]

17. Шарипов ДШ. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ. *Науки о Земле и недропользование*. 2021;44(1):63-72. [Sharipov DSh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting the stability of tailings storage facilities. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2021;44(1):63-72 (In Russ.)]

18. Шевченко ЛА, Поздняков АН. Методика оценки комплексного риска возникновения аварий, инцидентов, несчастных случаев и экологического ущерба на опасных производственных объектах электроэнергетики на примере ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014;1(101). [Shevchenko LA, Pozdnyakov AN. Methodology for assessing the complex risk of accidents, incidents, accidental injuries and environmental damage at hazardous production facilities in the electric power industry using the example of Yuzhno-Kuzbasskaya GRES OJSC. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014;1(101) (In Russ.)]

19. Bessimbayeva OG, Khmyrova EN, Oleinikova EA, et al. Simulation of ash dump embankment stability. *Mining Science and Technology*. 2023;8(4):303-12.

20. Kondakova VN, Pankratova KV, Pomortseva AA, et al. Analysis of the problem of classification of mining wastes. *Engineering and Mining Geophysics*. 2020;2020:1-8.

21. Kutepova NA, Moseykin VV, Kondakova VN, et al. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *Mining Information and Analytical Bulletin* (Scientific and Technical Journal). 2022;12.

22. Kutepov YuI, Kutepova NA, Kutepov YuYi, et al. Engineering-geological and geoeccological aspects of formation of dry dumps on hydrodumps. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;938:012007.

23. Lolaev A, Oganessian A, Badoev A, et al. The algorithm of a geotechnical massif forming considering the consolidation time and network planning method. Proceedings of 2-nd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG). Sousse, Tunisia, 2019.

24. Lolaev A., Oganessian A., Badoev A., Oganessian E. Proceedings of 3-rd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG). Sousse, Tunisia, 2020.

25. Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водного хозяйства и промышленности, 2-е изд. Разработаны авторским коллективом сотрудников ОАО «НИИ ВОДГЕО» и ЗАО «ДАР/ВОДГЕО». Москва, 2009. [Methodological recommendations for assessing the risk of accidents at hydraulic structures in water management and industry, 2nd edition. Developed by a team of authors from the Research Institute VODGEO and DAR/VODGEO. Moscow, 2009 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Светлана Петровна Бахаева –

доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: baxaevas@mail.ru

Екатерина Александровна Коновалова –

преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, Российская Федерация, e-mail: konovalovaea@kuzstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Svetlana P. Bakhayeva –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: baxaevas@mail.ru

Ekaterina A. Konovalova –

lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: konovalovaea@kuzstu.ru

Критерии авторства / Contribution: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье Поступила в редакцию: 05.05.2025.

Поступила после рецензирования: 07.06.2025.

Принята к публикации: 17.06.2025.

Article info Received: 05.05.2025.

Revised: 07.06.2025.

Accepted: 17.06.2025.