

## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ (ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ)

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-49-59

УДК 622

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛА ПРИ СОВМЕСТНОМ СКЛАДИРОВАНИИ ВСКРЫШНЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД И ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

### GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF THE DUMP STABILITY DURING JOINT STORAGE OF OVERBURDEN SANDY-CLAYEY ROCKS AND BENEFICIATION WASTE

**Бахаева С. П.**<sup>1</sup>

доктор техн. наук, доцент, e-mail: baxaevas@mail.ru

**Bakhaeva S.P.**<sup>1</sup> Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor

**Тур К. А.**<sup>2</sup>

Заведующий сектором гидрогеомеханических исследований, e-mail: kirill.turik@mail.ru

**Tur K.A.**<sup>2</sup> Head of the Sector for Hydrogeomechanical Research o

**Илюшкин В. Д.**<sup>2</sup>

Старший инженер, e-mail: ilushkinvladislav@gmail.com

**Ilyushkin V.D.**<sup>2</sup> Senior Engineer

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>2</sup> СФ АО "Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр "ВНИМИ" 653004, Россия, г. Прокопьевск, ул. Гагарина, 24.

<sup>2</sup> SF JSC "Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying cases - Interdisciplinary Scientific Center "VNIMI" 653004, Russia, Prokopyevsk, st. Gagarin, 24

#### **Аннотация:**

*Проведен анализ научных исследований и практического опыта российских и зарубежных ученых по совместному складированию вскрышных пород и отходов горно-перерабатывающей промышленности. Представлены научно-технические решения, обоснованные компьютерным и физическим моделированием внутреннего отвала для условий водонасыщенных дисперсных пород.*

**Ключевые слова:** совместное складирование, хвосты обогащения, кеки, внутренний отвал, физическое моделирование, компьютерное моделирование, хвостохранилище, аварии.

#### **Abstract:**

*The analysis of scientific research and practical experience of Russian and foreign scientists in the joint storage of overburden and mining waste is carried out. Scientific and technical solutions are presented, substantiated by computer and physical modeling of the internal dump for the conditions of water-saturated dispersed rocks.*

**Key words:** joint storage, tailings, cakes, internal dump, physical modeling, computer modeling, tailing dump, accidents

### Введение

Сложившаяся в мировой практике ситуация в области обращения с отходами в горно-перерабатывающей промышленности ведет к опасному загрязнению окружающей природной среды и создает реальную угрозу здоровью населения. По статистическим данным Комитета по авариям и разрушениям Международной комиссии по большим плотинам [1] из 1150 случаев разрушений, зафиксированных в 35 странах мира, связаны с разрушением грунтовых сооружений и их оснований.

Совсем недавно произошла трагедия на железнорудной шахте в городе Брумадинью бразильского штата Минас-Жерайс на предприятии Vale в Бразилии, в результате которой погибли 248 человек, и было выпущено 12 млн. м<sup>3</sup> хвостов обогащения [2]. Эта авария произошла через 4 года после прорыва дамбы на Fundao. Катастрофические последствия произошедших аварий побуждают находить новые пути решения по размещению хвостов (остатки сырья исходного материала, образовавшиеся при их переработке с целью получения готовой продукции) [3].

Одним из направлений снижения нагрузки на окружающую среду и степени риска гидродинамических аварий, связанных с разрушением ограждающих сооружений накопителей жидких отходов, является совместное складирование вскрышной породы и отходов обогащения.

Многообразие научных исследований в области совместного складирования вскрышной породы и отходов обогащения на земной поверхности [4,5], выработках открытых горных работ [6] и ущельях [7,8] показывает актуальность этой проблемы для горно-перерабатывающей промышленности.

С целью увеличения приемной способности хранилища группой ученых: Адигамов Я.М., Аксенов С.Г. [9] предлагается увеличить плотность укладки пород за счет отжатия воды при послонной укладке пород вскрыши и кольматации каждого слоя путем подачи на него пульпы отходов обогащения. Для обеспечения устойчивости и дренажа излишней воды из хвостов по контуру хвостохранилища возводят опорную дамбу и пионерные насыпи из скальных пород вскрыши.

При складировании пастообразных хвостов на наклонное основание Кисляков В.Е., Шершнева А.А. [4,5] предлагают первоначальный ярус отвала формировать из скальных пород вскрыши, а хвосты размещать между наклонным основанием и откосом первоначального яруса.

В диссертационной работе Шершнева А.А. [10] приводится способ формирования внешнего отвала с оставлением в центральной части свободного пространства под размещение в нем пастообразных отходов обогатительной фабрики.

Способ полусухого складирования хвостов

обогащения в настоящее время набирает популярность во всем мире. В обзоре материалов конференции по хвостам и шахтным отходам Dr. Michael Davies [11] отмечает, что на международном уровне эта проблема обсуждается с конца 1990-х годов и приводит статистические данные о стремительном росте доли складирования сгущенных, пастообразных и смешанных хвостов.

Группы ученых для условий Турции [12], республики Мозамбик [13] и Бразилии [14] также констатируют высокий риск аварий при эксплуатации "традиционных" хвостохранилищ и предлагают различные варианты размещения сухих хвостов, полученных на ленточном пресс-фильтре и центрифуге.

Ретроспективный анализ научных исследований по совместному складированию вскрышных пород и отходов горно-перерабатывающей промышленности показал схожесть схем, предлагаемых российскими и зарубежными учеными – создание ограждающего сооружения скальными фильтрующими породами и заполнение полученной емкости хвостами, обезвоженными на фильтр-прессах до определенной влажности. Для отжима излишней влаги из хвостов предусматривается укладка их на наклонное основание и уплотнение, что позволяет организовать отжим сток воды в прудок-отстойник.

### Об опыте формирования устойчивого отвала полусухих хвостов

Научно-технические решения по обоснованию параметров устойчивого отвала полусухих хвостов (тонкодисперсных кеков цианирования, обезвоженных на фильтр-прессах до влажности 25%) выполнялись отдельными авторами настоящей статьи для условий Березитового рудника в 2007 году. Эти решения были реализованы в проектной документации, разработанной ОАО "Иргиредмет" (Иркутск) и исполнены при формировании отвала полусухих хвостов рудника ООО "Березитовый рудник".

Для защиты почв, грунтовых вод и поверхностных водных объектов основание отвала было предварительно покрыто полимерным (комбинированным четырехслойным) экраном. В целях обеспечения отжима и стока остаточной водной составляющей из обезвоженных хвостов отвал расположен на естественном склоне 2-7°. В нижней части отвала создан пруд-отстойник, оконтуренный со стороны отвала фильтрующей дамбой, по бокам дамбами обвалования, со стороны рельефа – ограждающей дамбой с полимерным экраном. Воду из прудка забирают для оборотного водоснабжения фабрики, что позволяет снизить гидростатические нагрузки на ограждающую дамбу и исключить негативное воздействие опасных отходов на окружающую среду.

После трех лет формирования отвала полусухих хвостов (в 2013 году) были проведены исследования физико-механических свойств техногенных грунтов, слагающих отвал полусухих хвостов. Исследования заключались в бурении скважин на всю мощность отвала высотой около 20 м. При складировании в отвал кеков влажностью 25%, до глубины 7 м влажность техногенного массива достигала 33%. Высокая влажность верхнего слоя пород объясняется муссонным характером климата в данном регионе, а также отсутствием организованного стока воды от атмосферных осадков с поверхности отвала. С глубиной влажность пород уменьшалась, на контакте с основанием составляла 19-22%. Техногенный водоносный горизонт в отвале не был встречен. По итогам исследований физико-механических свойств грунтов были определены параметры отвала высотой около 50 м с результирующим углом наклона 17 – 18° на последующие годы эксплуатации и разработаны мероприятия по повышению устойчивости: организация стока воды, отсыпка обратных фильтров на участках фильтрации и другие.

1. В 2015 году с целью исследования наличия свободной воды и влажности пород в теле отвала рядом со скважинами, пробуренными в 2013 году, гидравлической, самоходной, автономной буровой установкой TAMROCK PANTERA 1500 (DP1500) с поверхности верхних ярусов отвала пробурены четыре вертикальные контрольные скважины. Глубина скважин около 20 м, интервал опробования 1 м. Скважины пробурены через всю толщу полусухих хвостов, складированных с момента последних изысканий (2013 год).

По материалам опробования техногенных грунтов (метасоматиты переизмельченные: до глубины 1 м - твердые, замороженные; до глубины 8 м - пластинчатые влажные; ниже – пластинчатые переувлажненные; с глубины 8 м выхода шлама нет), отобранных из контрольных скважин (26 образцов), в пробирно-аналитической лаборатории ООО "Березитовый рудник" выполнено исследование их гранулометрического состава и влажности. Установлено: гранулометрический состав около 0,074 мм, влажность от 11 до 25 %.

Таким образом, инженерно-геологическими исследованиями было подтверждено, что влажность пород со временем уменьшается за счет организации стока атмосферных осадков с поверхности отвала, а также инфильтрации воды из верхних слоев вниз с последующей разгрузкой по основанию через фильтрующую дамбу в прудок-накопитель, из которого вода забирается на обратное водоснабжение.

К осени 2015 года отвал полусухих хвостов был сформирован в четыре яруса, высота которых изменялась от 8 до 20 м, углы откоса от 49 до 16°. Общая высота отвала составляла 35-53 м при

результирующих углах наклона около 20°. Площадка основания отвала имела переменный угол наклона от 2° до 5°, в тальвеге лога около 7°, что обеспечивало сток воды в прудок-накопитель и осушение мелкодисперсных кеков цианирования, в то же время наклонное основание способствовало смещению отвальных пород в сторону прудка-накопителя. Анализом фактических параметров и инструментальных маркшейдерских наблюдений за деформациями отвала установлено следующее: на участках, где высота ярусов составляла 8 – 13 м (результирующий угол наклона до 29°), между ярусами выдерживались бермы более 7 м признаки деформаций не были обнаружены при общей высоте отвала 53 м. В то же время на локальном участке при формировании четвертого яруса были завышены угол откоса (до 49°) и высота (до 20 м) яруса, при натурном обследовании на всем протяжении этого участка наблюдались опасные инженерно-геологические явления в виде различного рода деформаций (оползни, оплывины, просадки). Превышение высоты четвертого яруса отвала сказалось на характеристиках грунтов, которые на этом участке были переувлажнены и имели меньшие значения плотности и сцепления.

На основании оценки фактического положения отвала полусухих хвостов, проведенных исследований физических свойств техногенных грунтов, а также инструментальных наблюдений был выполнен прогноз параметров устойчивого отвала высотой до 65 м при условии выполнения мероприятий по усилению упорной призмы в основании отвала.

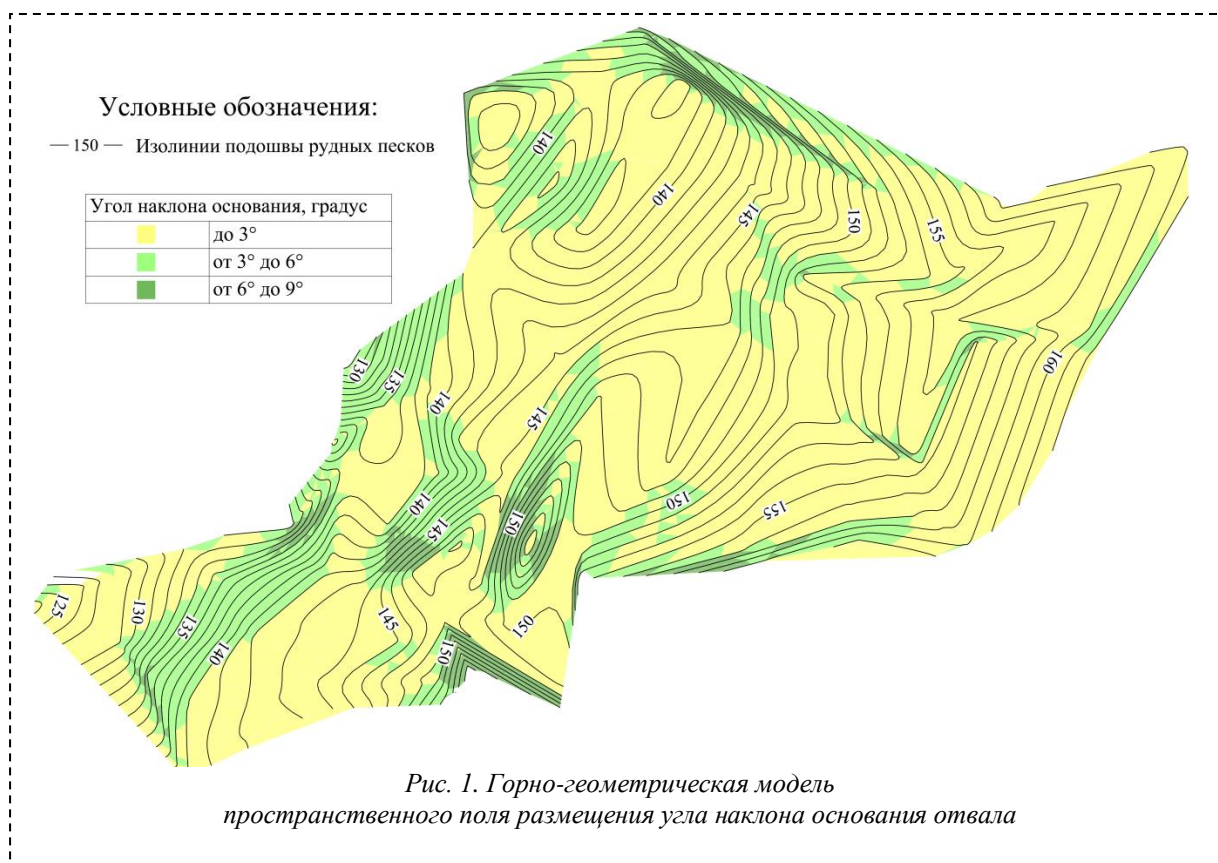
#### **Совместное складированию хвостов обогащения и вскрышных пород для условий ильменит-цирконового месторождения**

В 2019 году перед коллективом лаборатории устойчивости бортов карьеров возникла не простая задача, заключающаяся в разработке технологических решений по складированию отходов обогащения на Южно-Александровском карьере.

Геологической особенностью Южно-Александровского карьера, является отсутствие скальных пород, высокая влажность вскрышных пород, представленных песчано-глинистыми отложениями, а также весьма своеобразными хвостами – мелкодисперсной пылевой фракцией каолина.

Процентное содержание отдельных литотипов пород, предназначенных для складирования в отвал: суглинки и супеси – 6,2%, пески – 42,3%, глины 18,3%, лигниты – 0,9%, песчаники – 0,9%, пески некондиционные – 3,4%, хвосты обогащения (с содержанием влаги 25%) – 28%.

С целью снижения риска возникновения техногенной аварии и отказа от создания опасного гидротехнического сооружения



(хвостохранилища) было предложено совместное складирование пастообразных хвостов обогащения и песчано-глинистых пород вскрыши в выработанном пространстве карьера – формирование внутреннего отвала одновременно с извлечением запасов полезного ископаемого.

#### Программа исследований

Как уже упоминалось выше породы Южно-Александровского карьера существенным образом отличаются от тех, что были исследованы нами на ООО "Березитовый рудник". Поэтому была разработана специальная программа экспериментальных исследований изменения состояния смеси отвальных пород и хвостов обогащения под влиянием воды.

Программа исследований включала:

1. Создание горно-геометрической модели пространственного поля размещения угла наклона основания отвала.

2. Прогноз параметров устойчивого внутреннего отвала.

3. Компьютерное и физическое моделирование внутреннего отвала.

4. Экспериментальные исследования: дренажных свойств грунта, который планируется отсыпать в основании отвала; устойчивости смеси песчано-глинистых вскрышных пород и хвостов обогащения на контакте с основанием; инфильтрации воды с поверхности отвала; физико-механических характеристик смеси отвального

массива лабораторными методами при начальной влажности грунтов 21% до полного насыщения пород водой после имитации атмосферных осадков в количестве 8,5 мм/м<sup>2</sup>.

#### 2. Создание горно-геометрической модели пространственного поля размещения угла наклона основания отвала

Одним из важнейших факторов, влияющих на устойчивость отвалов, является угол наклона его основания. В этой связи возникает необходимость создания горно-геометрической модели, которая изображается в виде системы изолиний топофункции угла падения подошвы рудного пласта. Означенная топофункция реально в природе не существует, является производной поверхности подошвы рудного пласта и строится косвенным методом по отметкам подошвы, измеренным в скважинах.

Высота сечения изолиний соизмеряется с уровнем случайной составляющей, присущим размещению показателя и удовлетворяет неравенству

$$h \geq t_p \sigma_{сл}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{сл}$  – оценка случайной составляющей размещения показателя;  $t_p$  – квантиль закона распределения погрешностей определения показателя,  $t_p = 1,5$ .

Для топоповерхности угла падения подошвы рудного пласта больше подходит модель неоднородного случайного поля и так как

Таблица 1. Смесь отвальных пород для компьютерного и физического моделирования

Литотип пород	Суглинок и супесь	Песок	Глина	Лигнит	Песчаник	Песок	Хвосты
Доля в смеси, %	6,2	42,3	18,3	0,9	0,9	3,4	28
Масса, кг	1,9	13,2	5,7	0,3	0,3	1,1	8,7
Объем, см <sup>3</sup>	972	6923	2899	153	122	553	4350

Физико-механические свойства смеси отвальных пород и контакта отвала с основанием приведены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства смеси отвальных пород

Типы пород	Характеристики пород				
	средневзвешенные			расчетные при $n=1,2$	
	плотность $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	сцепление $C$ , т/м <sup>2</sup>	угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	сцепление $C_n$ , т/м <sup>2</sup>	угол внутреннего трения $\varphi_n$ , град.
Смесь пород	2,06	1,38	7	1,15	6
Контакт отвала с основанием	-	1,1	6	0,92	5

Таблица 3. Параметры внутреннего отвала

Угол наклона основания	Результирующий угол многоярусного отвала (град) при общей высоте (м)													
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
до 3°	35	35	25	19	16	14	12	11	10	10	9	9	9	9
6°	35	35	26	21	17	15	14	13	12	11	11	10	10	10
9°	35	35	27	22	19	17	16	15	14	13	12	12	12	11

закономерная изменчивость показателя много больше его случайной составляющей, то высоту сечения можно определить по формуле профессора Г.И. Вилесова

$$h = aNtg\delta/1000, \quad (2)$$

где  $a$  – минимальное расстояние между изолиниями наклонов,  $a = 10$  мм;  $N$  – знаменатель численного масштаба плана;  $\delta$  – средний угол наклона основания отвала.

Для рассматриваемых здесь условий высота сечения изолиний равна 3°.

Горно-геометрическая модель пространственного поля размещения угла наклона основания отвала построена с использованием программного обеспечения AutoCAD Civil 3D (рис.1).

Диапазон изменения угла наклона основания, на котором будет размещена смесь отвальных пород – от 0 до 9°. Из анализа построенной модели следует, что наибольшее распространение по всей площади Южно-Александровского участка имеет угол наклона основания до 3°. Вместе с тем имеются локальные участки, на которых угол наклона основания достигает 9° – это участки повышенного риска образования оползней, где необходимо предусматривать специальные мероприятия.

## 2. Прогноз параметров устойчивого отвала

Прогнозу параметров устойчивого отвала предшествовали лабораторные испытания физико-механических свойств смеси вскрышных пород и хвостов обогащения.

Процентное соотношение литотипов смеси отвальных пород представлено в таблице 1.

Прогноз параметров отвала с учетом вероятных сейсмических воздействий на уровне проектного землетрясения 6 баллов выполняется известными методами ВНИМИ [20].

Окончательные параметры отвала принимаются при условии выполнения критерия устойчивости – коэффициента устойчивости, нормативное значение ( $n_n$ ) которого установлено Правилами [21].

Оценка устойчивости отвала в плоской постановке задачи сводится к построению множества потенциальных поверхностей скольжения по профильным линиям ориентированным нормально к изолиниям угла наклона основания отвала.

По любой потенциальной поверхности скольжения можно записать функционал коэффициента устойчивости

$$n_p = \frac{\int_L [C(l) + tg\varphi(l)\sigma_n(l) - q(l) \sin \beta'] dl}{\int_L [\tau_n(l) + q(l) \cos \beta'] dl} \quad (3)$$

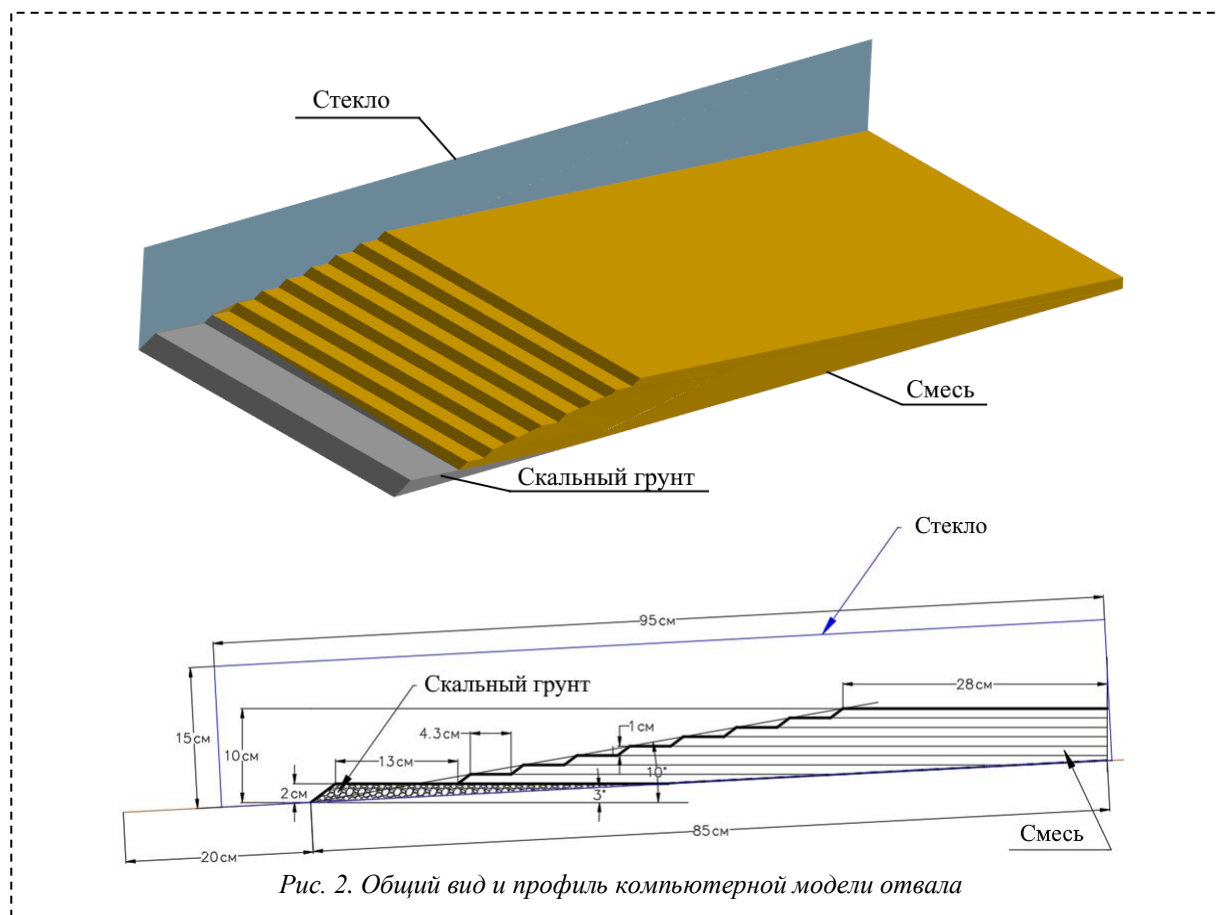


Рис. 2. Общий вид и профиль компьютерной модели отвала

где  $C$  и  $\varphi$  - сцепление (МПа) и угол внутреннего трения (градус) вдоль поверхности скольжения  $L$ ,  $l \in L$ ;  $l$  - координата вдоль поверхности скольжения (м);  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  - нормальные и касательные компоненты напряжений на той же поверхности;  $q$  - компонента напряжения, возникающая по поверхности скольжения за счет воздействия сейсмических сил на откос (МПа);  $\beta$  - угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы, измеренный в вертикальной плоскости (градус).

Числитель выражения (3) представляет собой интегральное предельное значение удерживающих сил, а знаменатель - интегральное значение сдвигающих сил по потенциальной поверхности скольжения.

Оценка устойчивости выполнялась в автоматизированном режиме методом конечных элементов в программе Phase2, а также методом предельного равновесия (алгебраического и векторного сложения сил [21], Бишоп [16], Янбу [17]) с использованием программы Slide2 до тех пор, пока для всех потенциальных поверхностей скольжения выполнялось условие устойчивости -  $n_p \geq n_n$  (рис. 3).

Результаты определения прогнозных параметров отвала приведены в таблице 3.

### 3. Компьютерное и физическое моделирование внутреннего отвала

Физическому моделированию предшествовало создание трехмерной компьютерной модели отвала, которая позволила визуализировать объект и найти его оптимальную конструкцию.

В основу разработки компьютерной модели отвала положены: проектная высота отвала - 20 м; горно-геометрическая модель пространственного поля размещения угла наклона основания (рисунок 1); физико-механические характеристики отвальной смеси, исследованные лабораторными методами (таблица 2) и прогнозны параметры отвала (таблица 3).

Компьютерная модель отвала реализована средствами AutoCAD Civil 3D (рисунок 2) и использовалась для расчета параметров физической модели отвала.

Исследования на физических моделях позволяют воссоздать картину изменения массива под воздействием внешних факторов и дают возможность проследить характер протекающих в массиве процессов.

Исходя из процентного соотношения отдельных литологических разностей грунтов вскрыши, которые планируется складировать во внутренний отвал Южно-Александровского карьера и объема хвостов обогащения рудных песков, предоставленных в лабораторию СФ АО

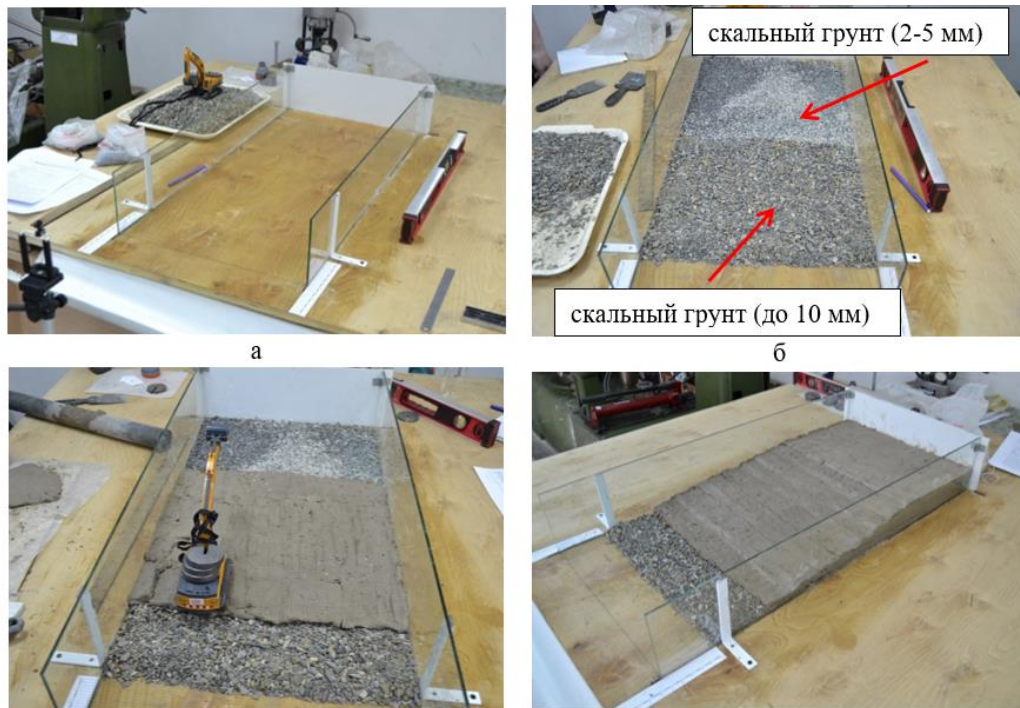


Рис.4. Создание физической модели отвала

а) стенд для размещения физической модели; б) гравий для подготовки основания отвала; в) отсыпка и уплотнение ярусов отвала; г) физическая модель внутреннего отвала на полную высоту

ВНИМИ для выполнения физического моделирования отвала, были рассчитаны масса и объем всех литотипов грунтов для модели (таблица 1).

Учитывая суммарный объем грунтов, предоставленных из выработок Южно-Александровского карьера для физической модели, а также фактическую площадь участка под размещение отвала, установлен масштаб модели, адекватно отражающий реальный объект – 1:200.

При выполнении исследований на физических моделях важно учитывать критерии подобия, которые вводят в физико-механические свойства грунтов [18].

На основании общих положений теории подобия процессы разрушения массивов, описываются следующей системой критериев:

$$\begin{cases} c_m = \alpha_l^{-1} \alpha_\gamma^{-1} c_n \\ tg\varphi_m = tg\varphi_n \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha_l^{-1}$  – линейный масштаб модели;  $\alpha_\gamma^{-1}$  – отношение удельного веса породы в массиве к удельному весу эквивалентного ей материала;  $c_m$  – сцепление в модели;  $c_n$  – сцепление в массиве;  $tg\varphi_n$  и  $tg\varphi_m$  – коэффициенты угла внутреннего трения соответственно породы и эквивалентного ей материала.

В нашем случае физическое моделирование отвала выполнялось из реальных пород вскрыши и хвостов обогащения, которые планируется отсыпать в отвал. Исходя из условия (4) при масштабе модели 1:200 сцепление контакта отвал-основание равно  $0,0055 \text{ т/м}^2 \approx 0 \text{ МПа}$ . Равновесие

отвала обеспечивается только за счет сил трения.

Стенд для моделирования геомеханических процессов внутреннего отвала был выполнен из фанеры. С помощью специального устройства обеспечено регулирование угла наклона основания стенда от 3 до 9 градусов (диапазон углов наклона реального основания отвала). Контроль угла наклона стенда выполнялся с помощью электронного уровня.

С целью предотвращения поглощения воды в поры фанеру покрыли водоотталкивающим средством, которое обеспечило сцепление на контакте основания с физической моделью  $\approx 0 \text{ МПа}$ .

Для удобства наблюдений за возможными деформациями отвального массива боковые стенки, ограждающие участок отвала выполнены из стекла. Стенки были закреплены к основанию модели и стыки обработаны герметическим средством для исключения просачивания воды.

На горизонтальной плоскости стенда очерчены границы отвала. С двух сторон, вдоль боковых стенок отвала установлены линейки для фиксации горизонтальных смещений при возникновении сдвига отвала по контакту с основанием.

Для сбора стекающей воды в основании модели отвала установлен желоб, по которому происходил сток воды в мерную емкость.

Фрагменты поэтапного создания модели проиллюстрированы на рисунке 4.

#### 4. Экспериментальные исследования на модели отвала

В ходе работы осуществлялась подача воды в основание отвала и на его поверхность (имитация атмосферных осадков в виде дождя). Всего было выполнено 7 экспериментов, отличающихся между собой объемом и способом подачи воды.

В результате проведенных лабораторных испытаний установлено:

1. Смесь отвальных пород с хвостами обогатительной фабрики практически не пропускают воду – является водоупором.

2. Гравийные грунты основания отвала (пластовый дренаж) хорошо дренируют воду, коэффициент фильтрации равен 88,3 м/сутки.

3. Устойчивость отвала обеспечивается даже при полном водонасыщении грунтов отвала. Однако надо понимать, что здесь мы говорим о кратковременной устойчивости. При длительном насыщении отвального массива водой, грунты перейдут в текучее состояние, что подтверждено лабораторными испытаниями свойств грунтов.

4. В период обильного водонасыщения зафиксирована суффозия (выщелачивание и вынос мелких минеральных частиц потоками грунтовых вод, фильтрующихся в толще горных пород [19]).

5. При изменении угла наклона основания до 6° на откосах увеличились локальные деформации поверхности отвала (оплывание грунта), так как породы отвала практически не пропускают воду.

6. В результате изменения угла наклона основания до 9° в целом отвал оставался в состоянии равновесия, горизонтального сдвига отвала по контакту с основанием не наблюдалось. Однако грунты на поверхности отвала оплывали. Поверхность отвала стала вязкая и не пригодная для проезда транспорта. Инфильтрация воды в основание была практически незаметна.

7. При обильном водонасыщении, отвал смеси вскрышных пород с хвостами обогащения при расположении его на дренажной постели из гравийных грунтов не смещается по наклонному основанию – сохраняет длительную устойчивость.

После завершения экспериментов, которые проводились в течение пяти дней, с поверхности модели отвала были отобраны образцы грунта для определения физических свойств.

Несмотря на обильное поступление воды на поверхность отвала площадью около 0,38 м<sup>2</sup> влажность пород изменилась всего на 0,63%; плотность грунта – не изменилась. По коэффициенту фильтрации породы отвала следует отнести к водоупорным – горные породы, не пропускающие или почти не пропускающие свободную воду при естественных напорных градиентах.

#### Рекомендации

На основании выполненного моделирования отвала и экспериментальных исследований на модели рекомендуется для обеспечения

безопасности при формировании внутреннего отвала при совместном складировании обводненных песчано-глинистых пород вскрыши и хвостов обогатительной фабрики выполнить следующее:

1. В основании отвала сформировать пионерную дамбу высотой около 2 м исключительно неразмокаемыми скальными грунтами.

2. По всей площади основания внутреннего отвала отсыпать пластовый дренаж: слой песчано-гравийных грунтов с высоким коэффициентом фильтрации мощностью около 1 м. Это позволит организовать дренаж основания отвала, повысить сопротивление сдвигу контакта "отвал-основание", что приведет к увеличению коэффициента устойчивости в период паводка и активного снеготаяния.

3. После отсыпки первого яруса и инженерной подготовки основания отвала поверх пластового дренажа размещать вскрышные породы совместно с хвостами обогащения.

4. Разравнивание, послонную планировку и уплотнение отвальной смеси бульдозером производить сразу же после выгрузки отвальной массы продольными и поперечными зигзагообразными проходами на максимально большой площади, что обеспечит более высокие прочностные характеристики грунтов отвала за счет испарения излишней влаги и их уплотнения.

5. Перевозку хвостов обогащения организовать так, чтобы они были доставлены на отвал, разгружены и уплотнены раньше, чем произойдет их высыхание или смерзание.

6. Для предотвращения набухания и выноса частиц грунта из тела отвала, откосы укрепить многослойным обратным фильтром, пригружая его хорошо фильтрующими скальными грунтами.

#### Выводы

1. Физическое моделирование отвала позволило установить, что при совместном складировании хвостов обогащения (28%) и вскрышных пород (72%) устойчивость отвала высотой 20 м с углами наклона основания до 9°, обеспечивается при условии формирования упорной призмы из скальных грунтов и фильтрующей постели из щебня (гравия) в основании отвала.

2. Смесь хвостов обогащения и пород вскрыши является водоупором, поэтому на поверхности отвала необходимо выполнить водоотводные сооружения для организованного отвода атмосферных осадков, что позволит исключить оплывание откосов.

3. В результате проделанной работы исключено создание такого опасного производственного объекта как хвостохранилище. С помощью физического моделирования была обоснована возможность совместного



складирования хвостов обогащения и вскрышных пород во внутренний отвал.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chronology of major tailings dam failures. [Electronic resource] URL: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (дата обращения: 24.05.2019).
2. Deadly Brazil Mine Accident Puts Waste Dams in Spotlight [Electronic resource] URL: <https://www.wsj.com/articles/deadly-brazil-mine-accident-puts-waste-dams-in-spotlight-11548874428> (дата обращения: 20.01.2020).
3. Ю.В. Кириченко, М.П. Зайцев, А.Н. Кравченко. Инженерно-геологические особенности формирования хвостохранилищ. – Москва: МГГУ, 2006.
4. Способ отвалообразования на наклонное основание: [Текст]: 2520611 С1 РФ / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнева (РФ). – № 2013110206/03; заявл. 06.03.2013; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18. – 5 с.
5. Способ отвалообразования на наклонное основание: [Текст]: 2507397 С1 РФ / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнева (РФ). – № 2012357723/03; заявл. 20.08.2012; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5. – 6 с.
6. Разработка технологии подготовки карьеров к складированию хвостов обогащения / О.В. Зотеев, А.А. Зубков, В.Н. Калмыков, И.М. Кутлубаев // "Горный информационно-аналитический бюллетень". – 2017. – выпуск 9, с. 109 – 114.
7. Патент Республики Армения № 2623 А2, кл. E21C41/00. Способ формирования многоярусных отвалов в ущельях / Г.Г. Казарян – Ереван, 2012 – 8 с.
8. Казарян, Г.Г. Способ совместно-раздельного складирования вскрышных пород карьера и хвостов обогащения в сложных рельефных условиях / Казарян, Г.Г. // Вестник ГИУА. Серия "Металлургия, материаловедение, недропользование". – 2013. – выпуск 16, № 1. – с. 84 – 93.
9. Способ совместного складирования вскрышных пород и отходов обогащения: [Текст]: 1691458 СССР / Я.М. Адигамов, С.Г. Аксенов, А.К. Елисеев, В.С. Куц, Е.П. Писанец (СССР). – № 4695893/03; заявл. 11.04.89; опубл. 15.11.91, Бюл. № 42. – 7 с.
10. Шершнева, А.А. Обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения: специальность 25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шершнева Андрей Александрович; ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет". – Красноярск, 2016. – с. 147 – Текст: непосредственный.
11. Dr. Michael Davies. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals / Dr. Michael Davies // Tailings and Mine Waste Conference. – Vancouver. – 2011.
12. Design of the Eldorado Gold Efemçukuru Filtered Tailings Facility / Karvin Kwan, Richard Dawson, Calvin Boese, Dale Churcher // Proceedings Tailings and Mine Waste. – Vancouver. – 2011.
13. Dewatered tailings disposal – a cost effective alternative to wet disposal / M.J. Gowan // Proceedings Tailings and Mine Waste. – Vancouver. – 2015.
14. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil / Reinaldo Brandao Gomes, Giorgio De Tomi, Paulo santos Assis // j mater res technol – 2016. – №5 (4). – P. 339-344.
15. И.И. Кириченко, Ю.А. Химерик. Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет. – Киев: Вища школа, 1987.
16. Bishop A.W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes // Géotechnique. 1955. Vol. 5. Iss. 1. P. 7–17
17. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, 1954. pp. 43–49
18. Е.А. Федорова. Моделирование деформаций отвалов, нагруженных шагающим экскаватором при подрезке откосов. – Чита: Вестник ЧитГУ, 2011. – выпуск 69, №2. – с. 112 – 116.
19. С.В. Троянский, А.С. Белицкий, А.И. Чекин. Гидрогеология и осушение месторождений полезных ископаемых. – Москва: Углетехиздат, 1956.
20. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Ленинград: ВНИМИ, 1972.

21. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. - Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1998
22. Ограждающие дамбы хвостохранилищ, риск опасных происшествий и уроки, полученные на практике / Бюллетень Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) №121 – 2001 – Риск чрезвычайных происшествий на плотинах хвостохранилищ. Практические уроки.
23. С. П. Бахаева, Д. В. Гурьев Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств полусухих хвостов на устойчивость отвала // Безопасность труда в промышленности. – 2014. - №8. – С. 54 – 56.
24. Svetlana Bakhaeva, and Elena Chernykh Study of the Conditions for Construction of the Haulage Berm in the Deposit Ledger-Wall // Environment, Energy and Earth Sciences (E3S) Web of Conferences 105, 01034/ - 2019 - *IVth International Innovative Mining Symposium*. - <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501034>

## REFERENCES

1. Chronology of major tailings dam failures. [Electronic resource] URL: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (data obrashcheniya: 24.05.2019).
2. Deadly Brazil Mine Accident Puts Waste Dams in Spotlight [Electronic resource] URL: <https://www.wsj.com/articles/deadly-brazil-mine-accident-puts-waste-dams-in-spotlight-11548874428> (data obrashcheniya: 20.01.2020).
3. YU.V. Kirichenko, M.P. Zajcev, A.N. Kravchenko. Inzhenerno-geologicheskie oso-bennosti formirovaniya hvostohranilishch. – Moskva: MGGU, 2006.
4. Sposob otvaloobrazovaniya na naklonnoe osnovanie: [Tekst]: 2520611 S1 RF / V.E. Kislyakov, A.A. SHershnev (RF). – № 2013110206/03; zayavl. 06.03.2013; opubl. 27.06.14, Byul. № 18. – 5 s.
5. Sposob otvaloobrazovaniya na naklonnoe osnovanie : [Tekst] : 2507397 S1 RF / V.E. Kislyakov, A.A. SHershnev (RF). – № 2012357723/03; zayavl. 20.08.2012 ; opubl. 20.02.14, Byul. № 5. – 6 s.
6. Razrabotka tekhnologii podgotovki kar'erov k skladirovaniyu hvostov obogashche-niya / O.V. Zoteev, A.A. Zubkov, V.N. Kalmykov, I.M. Kutlubaev // "Gornyj informaci-onno-analiticheskij byulleten". – 2017. – vypusk 9, s. 109 – 114.
7. Patent Respubliki Armeniya № 2623 A2, kl. E21S41/00. Sposob formirovaniya mnogoyarusnyh otvalov v uschel'yah / G.G. Kazaryan – Erevan, 2012 – 8 s.
8. Kazaryan, G.G. Sposob sovmestno-razdel'nogo skladirovaniya vskryshnyh porod kar'era i hvostov obogashcheniya v slozhnyh rel'efnyh usloviyah / Kazaryan, G.G. // Vestnik GIUA. Seriya "Metallurgiya, materialovedenie, nedropol'zovanie". – 2013. – vypusk 16, № 1. – s. 84 – 93.
9. Sposob sovmestnogo skladirovaniya vskryshnyh porod i othodov obogashcheniya : [Tekst] : 1691458 SSSR / YA.M. Adigamov, S.G. Aksenov, A.K. Eliseev, V.S. Kuc, E.P. Pi-sanec (SSSR). – № 4695893/03; zayavl. 11.04.89 ; opubl. 15.11.91, Byul. № 42. – 7 s.
10. SHershnev, A.A. Obosnovanie tekhnologii otsypki otvalov skal'nyh vskrysh-nyh porod pri skladirovanii othodov obogashcheniya : special'nost' 25.00.22 "Geotekhnologiya (podzemnaya, otkrytaya i stroitel'naya)" : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / SHershnev Andrej Aleksandrovich ; FGAOU VO "Sibir-skij federal'nyj universitet". – Krasnoyarsk, 2016. – s. 147 – Tekst : neposredstvennyj.
11. Dr. Michael Davies. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals / Dr. Michael Davies // Tailings and Mine Waste Conference. – Vancouver. – 2011.
12. Design of the Eldorado Gold Efemçukuru Filtered Tailings Facility / Karvin Kwan, Richard Dawson, Calvin Boese, Dale Churcher // Proceedings Tailings and Mine Waste. – Van-couver. – 2011.
13. Dewatered tailings disposal – a cost effective alternative to wet disposal / M.J. Gow-an // Proceedings Tailings and Mine Waste. – Vancouver. – 2015.
14. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil / Reinaldo Brandao Gomes, Giorgio De Tomi, Paulo santos Assis // j mater res technol – 2016. – №5 (4). – P. 339-344.
15. I.I. Kirienko, YU.A. Himerik. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Proektirova-nie i raschet. – Kiev: Vishcha shkola, 1987.
16. Bishop A.W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes // Géotech-nique. 1955. Vol. 5. Iss. 1. P. 7–17
17. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, 1954. pp. 43–49
18. E.A. Fedorova. Modelirovanie deformacij otvalov, nagruzhennyh shagayushchim ekskavatorom pri podrezke otkosov. – CHita: Vestnik CHitGU, 2011. – vypusk 69, №2. – s. 112 – 116.

19. S.V. Troyanskij, A.S. Belickij, A.I. Shekin. *Gidrogeologiya i osushenie mesto-rozhdenij poleznyh iskopaemyh*. – Moskva: Ugletekhizdat, 1956.
20. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov, stroyashchihsya i ekspluatiruemyh kar'ero*v. Leningrad: VNIMI, 1972.
21. *Pravila obespecheniya ustojchivosti otkosov na ugol'nyh razrezah*. Sankt-Peterburg: VNIMI, 1998
22. *Ograzhdayushchie damby hvostohranilishch, risk opasnyh proisshestvij i uroki, poluchennye na praktike* / *Byulleten' Mezhdunarodnoj komissii po bol'shim plotinam (SIGB) №121 – 2001 – Risk chrezvychajnyh proisshestvij na plotinah hvostohranilishch. Prakticheskie uroki*.
23. S. P. Bahaeva, D. V. Gur'ev *Issledovanie vliyaniya izmenchivosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv polusuhih hvostov na ustojchivost' otvala // Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. – 2014. - №8. – S. 54 – 56.
24. Svetlana Bakhaeva, and Elena Chernykh *Study of the Conditions for Construction of the Haulage Berm in the Deposit Ledger-Wall // Environment, Energy and Earth Sciences (E3S) Web of Conferences 105, 01034/ - 2019 - IVth International Innovative Mining Symposium*. - <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501034>

Поступило в редакцию 03.08.2020

Received 03 August 2020