

На правах рукописи



Шершнев Андрей Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ СКАЛЬНЫХ
ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ
ОБОГАЩЕНИЯ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск, 2017

Работа выполнена на кафедре открытых горных работ ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кисляков Виктор Евгеньевич

Официальные оппоненты: *Авдеев Павел Борисович*
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный
университет», кафедра «Открытые горные
работы», профессор

Пыталев Иван Алексеевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
кафедра «Разработка месторождений полезных
ископаемых», доцент

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет», г. Владивосток

Защита диссертации состоится «11» мая 2017 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан «__» марта 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бондина Светлана Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Объем отходов обогащения, накапливающихся в процессе эксплуатации рудных месторождений, может достигать сотни миллионов кубических метров. Это сопровождается изъятием из сфер сельскохозяйственного, лесного и других фондов значительных площадей ценных земель для размещения хвостохранилищ (рисунок 1).

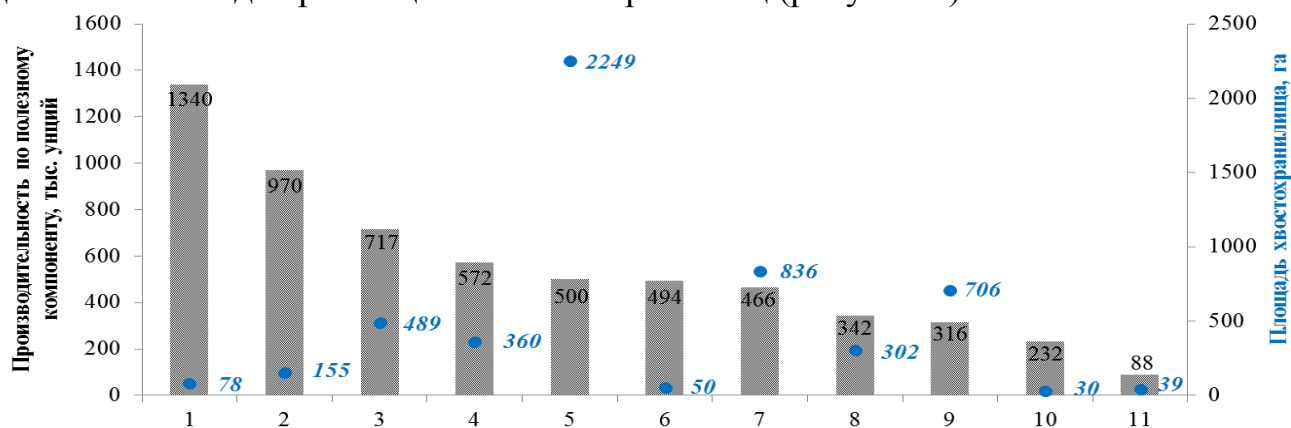


Рисунок 1 – Площади хвостохранилищ при производительности горно-обогатительных предприятий со сроком эксплуатации:

1 – Cortez Gold Mine, 14 лет; 2 – Yanacocha Mine, 23 года; 3 – Tarkwa Mine, 23 года; 4 – Pueblo Viejo Gold Mine, 4 года; 5 – Paracatu Mine, 29 лет; 6 – Geita Gold Mine, 16 лет; 7 – ОАО «Васильковский ГОК», 37 лет; 8 – Morila Gold Mine, 16 лет; 9 – Kalgoorlie Mine, 27 лет; 10 – Cripple Creek & Victor Gold Mine, 21 год; 11 – Боголюбовское месторождение, 10 лет (по проекту)

При значительных объемах отходов обогащения многие месторождения становятся малопривлекательными для освоения из-за высоких затрат на проведение изысканий, проектирование, строительство, эксплуатацию и рекультивацию хвостохранилищ.

Помимо этого хвостохранилище наносит существенный вред окружающей среде. В первую очередь, это связано с загрязнением поверхностных и грунтовых вод, а также воздушной среды и почвы. Присутствует риск тяжелых последствий в случае разрушения дамбы хвостохранилища, о чем свидетельствует информация, опубликованная Комитетом Международной Комиссии по крупным хвостовым дамбам, о произошедших за последние 45 лет 221 инциденте, 135 из них были авариями, в результате которых было выброшено 41,9 млн м³ жидких отходов, распространившихся на значительные расстояния, что вызвало обширные разрушения и человеческие потери.

Решение проблемы сокращения объемов жидких отходов и соответственно площадей, изымаемых под их хранение, обеспечит экологическую и технологическую безопасность ведения работ. Это предопределяет целесообразность обоснования технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании пастообразных отходов.

Степень разработанности темы. Исследования в области сокращения площадей хвостохранилищ проводились в разное время как отечественными, так и

зарубежными учеными, наибольший вклад внесли работы В.Ф. Баранова, Г.Т. Сарвина, К.М. Семеновой, Е.И. Robinsky, В.И. Кибирева, О.А. Медведевой, С.Н. Киричко, С. Aldea, В. Cornelius, М. Davies, М. Biesinger, Т. Meggyes, А.Ф. Илимбетова, М.В. Рыльниковой и др. Практические решения по повышению вместимости и сокращению площадей хвостохранилищ предложены различными организациями, среди которых особо можно выделить разработки ЗАО «Механобр инжиниринг», WesTech Inc., Outotec, FLSmidth, Moly Mines Limited и др. Однако все существующие решения не обеспечивают полную экологическую и технологическую безопасность хранения отходов в хвостохранилище. Поэтому данный вопрос актуален для изучения в настоящее время.

Целью работы является обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения, позволяющей частично или полностью сократить объемы строительства хвостохранилищ на горно-обогатительных предприятиях.

Идея работы заключается в складировании предварительно сгущенных до пастообразного состояния отходов обогащения в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород.

Основные задачи исследования. Для реализации поставленной цели следует выделить следующие задачи.

1. Обобщение и анализ известных видов отходов обогащения, их способы транспортирования и складирования.

2. Исследование свойств пастообразных отходов золотосодержащих руд, влияющих на параметры их складирования (растекание, консолидация и устойчивость к воздействию дождевых осадков) в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород.

3. Обоснование параметров технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения.

4. Оценка экономической эффективности складирования отходов обогащения, предварительно сгущенных до пастообразного состояния, в ограниченное отвалами вскрышных пород пространство.

Научная новизна работы

1. Определено влияние степени сгущения пастообразных отходов, высоты их складирования и времени растекания на распределение массы пастообразных отходов по площади; на угол откоса при складировании, после консолидации и воздействия дождевых осадков.

2. Установлено влияние параметров и способа складирования пастообразных отходов разной степени сгущения на объем, занимаемый ими в пространстве, ограниченном отвалами вскрышных пород.

3. Получена зависимость максимальной высоты заполнения пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, при складировании пастообразных отходов вдоль центральной оси, с превышением точки выпуска над верхней площадкой отвала, от степени сгущения пастообразных отходов и высоты их складирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны принципиально новые технологические схемы складирования пастообразных

отходов обогащения в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, на горизонтальное или слабонаклонное основание (патент РФ № 2509891), на наклонное основание (патенты РФ № 2507397 и 2520611), позволяющие частично или полностью сократить объёмы строительства хвостохранилищ на горно-обогатительных предприятиях. Обоснованы параметры при складировании пастообразных отходов вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска над верхней площадкой отвала. Определены области использования предложенных технологических схем складирования пастообразных отходов.

Выполнена систематизация разработанных технологических схем складирования пастообразных отходов и их параметров.

Разработанные технологические схемы складирования пастообразных отходов обогащения приняты к возможному внедрению на объектах ООО «Сисим» при разработке проектной документации.

Результаты исследований рекомендуется использовать при проектировании горных работ на строящихся и действующих рудных месторождениях, где предусмотрено измельчение в конечной стадии обогащения руд; в учебном процессе на кафедре открытых горных работ ИГДГГ СФУ.

Методология и методы исследований. В работе осуществлено аналитическое обобщение сведений, содержащихся в научно-технической, патентной и специальной литературе. Проведены экспериментальные исследования свойств пастообразных отходов, влияющих на параметры их складирования (растекание, консолидацию и устойчивость к воздействию дождевых осадков) в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород; математическое моделирование; статистическая обработка экспериментальных данных с применением программных пакетов Microsoft Office, AutoCAD.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для повышения эффективности складирования отходов обогащения в отвалах скальных вскрышных пород их следует располагать вблизи фабрик, формируя в них пространство, объем которого необходимо увязывать с орографией поверхности основания отвалов и свойствами складироваемых отходов.

2. Увеличить вместимость отвалов отходами обогащения можно за счет роста угла откоса складирования посредством повышения плотности отходов при сгущении их до пастообразного состояния.

3. Для сокращения потерь полезных компонентов следует исключить растекание складироваемых отходов за счет атмосферных осадков по площади отвалов, оставлением в складированном пространстве объема, не заполненного отходами.

Степень достоверности работы. Подтверждена сходимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными и достоверной вероятностью; значительным объемом статистических данных; патентной защитой новых технических решений.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: IV международной научной конференции «Актуальные вопросы современной науки» секция «Науки о Земле», г. Санкт-Петербург (2012 г.); XXI заочной научной конференции Research Journal of International Studies, г. Екатеринбург (2013 г.); XI международной научно-технической конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» в Филиппинах, г. Манила (2013 г.); городской этап конкурса научно-технического творчества молодежи города Красноярск «Молодежные научно-исследовательские и инвестиционные проекты», Красноярск (2013 г.); на кафедре открытых горных работ ИГДГГ СФУ (2012-2016 гг.).

Личный вклад автора. Заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая постановку цели и задач исследования, в анализе и обобщении экспериментальных результатов, в разработке новых технологических схем складирования пастообразных отходов в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, позволяющих частично или полностью сократить объемы строительства хвостохранилищ на горно-обогатительных предприятиях.

Публикации. По теме диссертационных исследований опубликовано 12 работ, из них: 5 в изданиях, рекомендованных списком ВАК и 3 патента на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 147 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Содержит 100 библиографических источников, 44 таблицы, 52 рисунка и 107 формул.

Благодарности. Автор сердечно благодарит своего научного руководителя В.Е. Кислякова за помощь и поддержку на протяжении всех этапов исследования, а также выражает благодарность всему коллективу кафедры открытых горных работ ИГДГГ СФУ за ценные замечания и комментарии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, показаны научная новизна и значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации результатов.

В первой главе приведен обзор известных видов отходов обогащения, их способы транспортирования и складирования. Представлен анализ хвостохранилищ по содержанию техногенного минерального сырья.

Во второй главе исследованы свойства пастообразных отходов золотосодержащих руд, влияющие на параметры их складирования (растекание, консолидация и устойчивость к воздействию дождевых осадков) в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород. Проведен анализ

возможностей действующих фабрик сгущать отходы обогащения до пастообразного состояния.

В третьей главе предложены и систематизированы принципиально новые технологические схемы складирования пастообразных отходов в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород. Обоснованы параметры складирования пастообразных отходов через коэффициент использования пространства пастообразными отходами и коэффициент использования вскрышных пород. Приведен расчет устойчивости отвала скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения и выполнена оценка площадей, занимаемых пастообразными отходами.

В четвертой главе приведена оценка экономической эффективности технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения на примере месторождения Боголюбовское.

Основные результаты проведенных исследований отражены в следующих ниже приведенных защищаемых положениях.

Пастообразные отходы (далее – ПО) обогащения руд представляют собой не сегрегирующий при укладке материал с высоким содержанием твердого составляющего (до 75 %), с напряжением сдвига свыше 200 Па. Принципиальная возможность получения и характеристики пасты для каждого типа руд определяется исследованиями и во многом зависят от содержания в пульпе частиц размером до 20 мкм, которых должно быть не менее 20–30 % от общего количества.

Предложены следующие технологические схемы складирования ПО в отвалах скальных вскрышных пород.

Технологическая схема складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание, рисунок 2 (Патент 2509891 РФ). Складирование скальных вскрышных пород на горизонтальном или слабонаклонном основании параллельными насыпями позволит сформировать между ними пространство под ПО. Складирование ПО по данной технологической схеме предусмотрено с насыпи скальных вскрышных пород под откос. Для исключения распространения пастообразного материала в отвальный массив на внутренние откосы предусмотрена укладка наиболее мелкой породы вскрыши. Расстояние между насыпями скальных вскрышных пород определяется по формуле:

$$A = \frac{2K_p^{\delta} \left[\frac{h \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha')}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha'} + B \right]}{K_e \cdot K_p^{\epsilon}} - \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'}, \text{ м}, \quad (1)$$

где K_p^{δ} – коэффициент разрыхления руд; h – высота насыпи вскрышных пород, м; α – угол откоса насыпи вскрышных пород, град; α' – угол откоса мелкой породы вскрыши, град; B – ширина насыпи вскрышных пород по гребню, м; K_e – коэффициент вскрыши; K_p^{ϵ} – коэффициент разрыхления вскрышных пород.

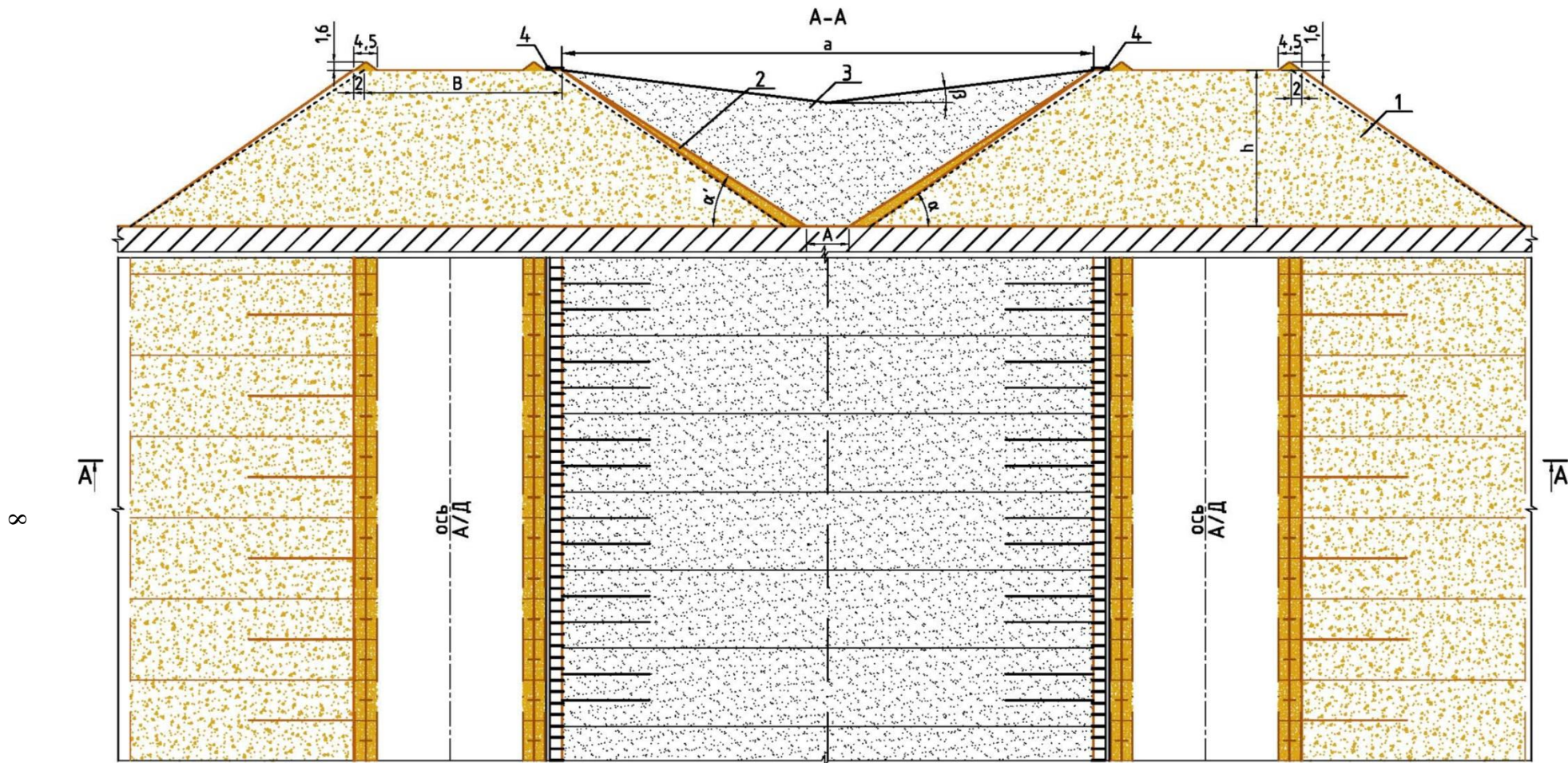


Рисунок 2 – Технологическая схема складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание:
1 – насыпь вскрышных пород; 2 – мелкие породы вскрыши, отсыпанные на внутренние откосы насыпи вскрышных пород; 3 – ПО обогащения; 4 – пульпопровод

Технологическая схема складирования ПО на наклонное основание, рисунок 3 (Патент 2507397 РФ).

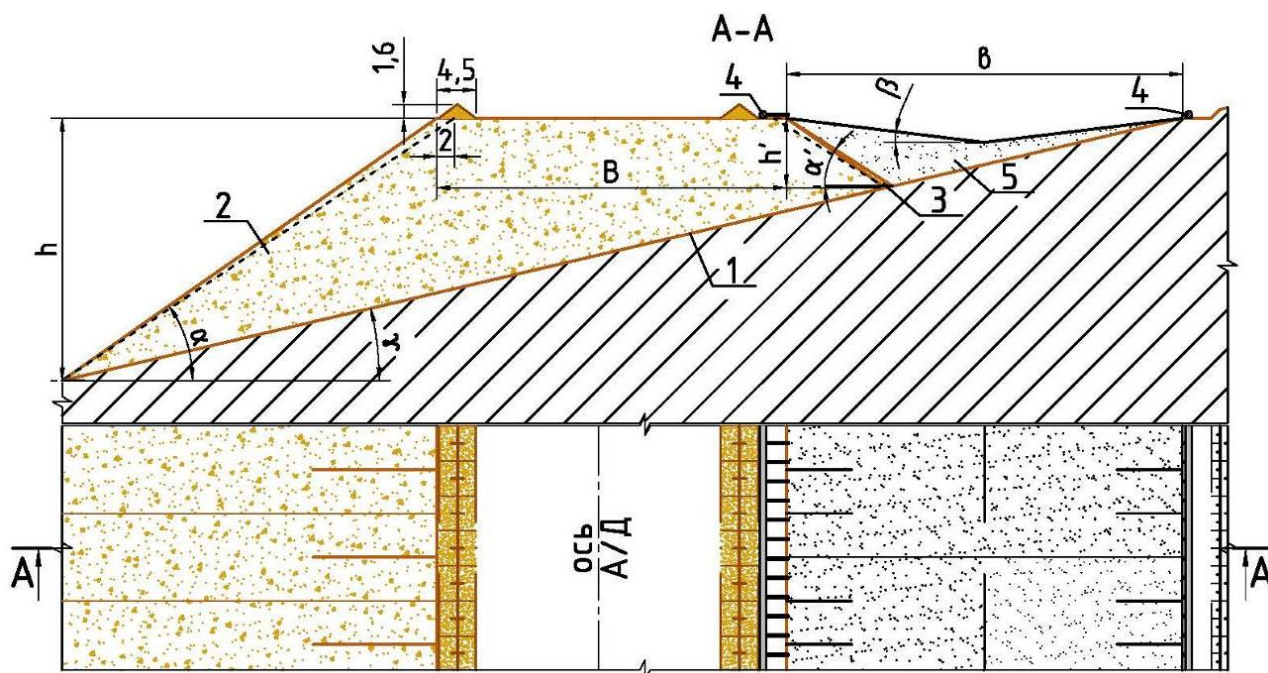


Рисунок 3 – Технологическая схема складирования ПО на наклонное основание:
 1 – наклонное основание; 2 – насыпь вскрышных пород; 3 – мелкие породы вскрыши, отсыпанные на внутренний откос насыпи вскрышных пород; 4 – пульпопровод; 5 – ПО обогащения

При формировании насыпи скальных вскрышных пород на наклонном основании, между ними образуется пространство под ПО. Высоту насыпи скальных вскрышных пород со стороны склона h' , определяют из условия:

$$h' = \sqrt{\frac{2V_в \cdot K}{K_в \cdot L_о \cdot (\text{ctg}\alpha' + \text{ctg}\gamma)}}, \text{ м}, \quad (2)$$

где $V_в$ – объем породы вскрыши, м^3 ; K – коэффициент содержания воды в ПО обогащения; $L_о$ – длина отвала, м; $K_в$ – коэффициент вскрыши; α' – угол откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпи вскрышных пород, град; γ – уклон местности, град.

Эффективность заполнения формируемого пространства ПО по предложенным технологическим схемам оценили двумя коэффициентами.

1. Коэффициент использования пространства ПО ($k_{\text{п}}$) – отношение объема ПО уложенных в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, к объему последнего.

2. Коэффициент использования вскрышных пород ($k_в$) – отношение объема вскрышных пород необходимого для создания пространства к объему складированных в созданное пространство ПО.

Расчетные формулы коэффициентов использования пространства ПО и использования вскрышных пород для представленных технологических схем сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Формулы расчета коэффициентов использования пространства ПО и использования вскрышных пород

Способ складирования ПО		Коэффициент использования пространства ПО	Коэффициент использования вскрышных пород
На горизонтальное или слабонаклонное основание	S_1 и S_2 имеют форму трапеции	$k_u = \frac{h \cdot \sin(\alpha' - \beta)}{\sin \alpha' \cdot \sin \beta \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}$	$k_e = \frac{2 \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \sin \alpha' \cdot \sin \beta}{G \cdot h \cdot \sin(\alpha' - \beta)}$
	S_1 – трапеция, S_2 – треугольник	$k_u = 1 - \frac{a^2}{4 \operatorname{ctg} \beta \cdot h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}$	$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}{G \cdot (h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') - \frac{a^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{4})}$
	S_1 и S_2 имеют форму треугольника	$k_u = \frac{\sin(\alpha' - \beta)}{\sin \alpha' \cdot \cos \beta}$	$k_e = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \cos \alpha' \cdot \cos \beta}{G \cdot a^2 \cdot \sin(\alpha' - \beta)}$
На наклонное основание		$k_u = 1 - \frac{e}{2 \cdot h'} \cdot \operatorname{tg} \beta$	$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') - (B + 2h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')^2 \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \sin \alpha'}{\sin(\gamma + \alpha')}}{G \cdot e \cdot (h' - \frac{e}{2} \cdot \operatorname{tg} \beta)}$

где S_1 – площадь пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, м²; S_2 – площадь незаполненного пространства ПО, м²; β – угол откоса ПО при растекании, значение которого зависит от содержания твердого компонента в ПО (G), град.

Вышеизложенное является доказательством первого положения выносимого на защиту, а именно: Для повышения эффективности складирования отходов обогащения в отвалах скальных вскрышных пород их следует располагать вблизи фабрик, формируя в них пространство, объем которого необходимо увязывать с орографией поверхности основания отвалов и свойствами складировемых отходов.

Для обоснования параметров технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения, предварительно сгущенных до пастообразного состояния, были проведены экспериментальные исследования по растеканию ПО.

В качестве исследуемого материала применялись хвосты обогатительных фабрик золотосодержащих руд Боголюбовского месторождения, расположенного в Мотыгинском районе Красноярского края. Гранулометрический состав исследуемого материала представлен в таблице 2.

Сгущение хвостов обогатительных фабрик золотосодержащих руд до пастообразного состояния производилось в бетономесителе, до следующих плотностей – таблица 3.

Таблица 2 – Гранулометрический состав исследуемого материала

Класс, мм	Выход	
	г	%
+0,071	140	39,2
-0,071 +0,04	97	27,2
-0,04 +0,02	35	9,8
-0,02 +0	85	23,8
Исходный	357	100

Таблица 3 – Плотность исследуемых ПО

Параметр	Величина								
Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Плотность ПО, т/м ³	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10

При растекании на горизонтальном основании образцов ПО цилиндрической формы с первоначальной площадью в основании (S) 9,6 см², исходной высотой (h) 2, 4, 6, 8 см, в течение времени (t) от 5 до 40 мин с шагом 5 мин, фиксировалась высота и площадь образца (рисунок 4).

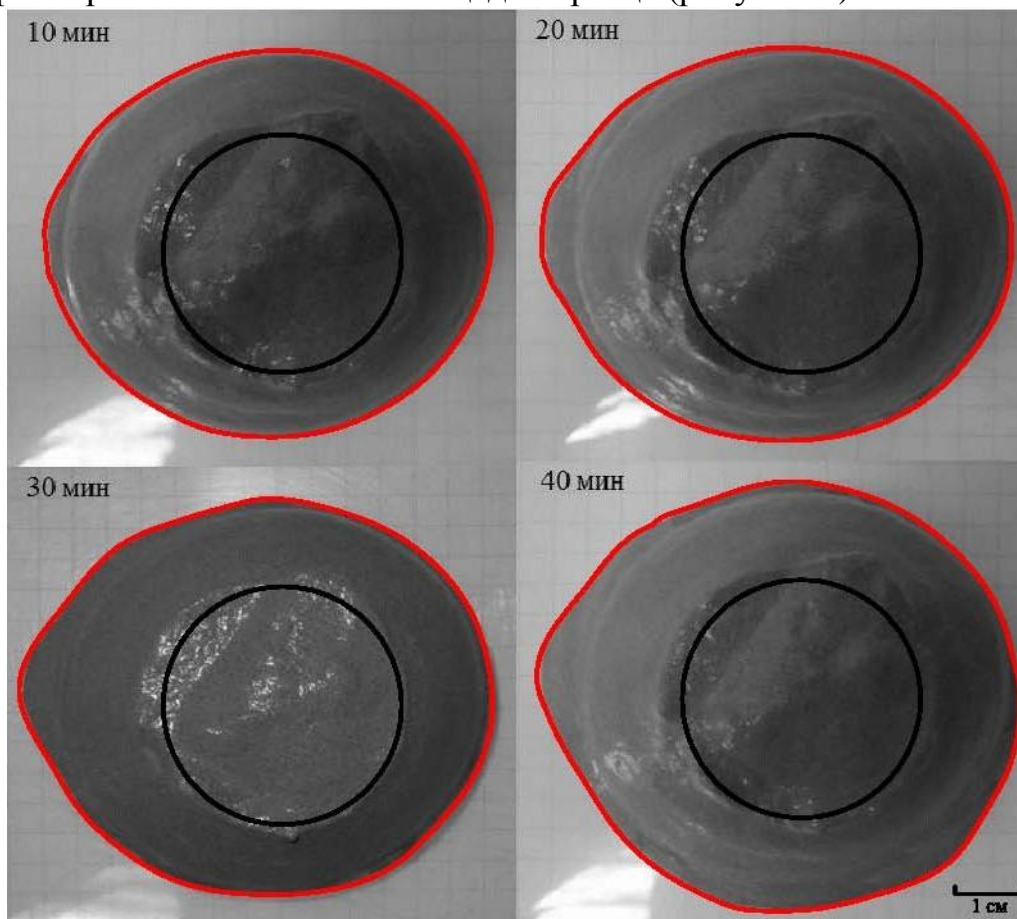


Рисунок 4 – Определение площади образцов ПО при растекании в течение времени: черный контур – исходная площадь образца в основании 9,6 см²; красный контур – площадь образца в основании при растекании в течение времени: 10 мин – 29,6±0,2 см²; 20 мин – 30,1±0,2 см²; 30 мин – 30,3±0,1 см²; 40 мин – 30,5±0,1 см²

По полученным результатам экспериментального исследования растекания образцов ПО разработана математическая модель распределения массовой концентрации ПО на единицу площади в зависимости от времени растекания и плотности ПО:

$$m/S = (9,77 \cdot \rho_{\text{ПО}} - 13,79) \cdot \text{EXP}\left(\frac{0,48 - 0,22 \cdot \rho_{\text{ПО}}}{t}\right) \cdot (0,05h + 0,79), \text{ г/см}^2, \quad (3)$$

где m – масса ПО, г; S – площадь растекания ПО, см²; $\rho_{\text{ПО}}$ – плотность ПО, г/см³; h – исходная высота образца ПО, см.

Полученную расчетную формулу (3) можно использовать для определения площади изымаемых земель под необходимый объем складирования ПО.

Кроме того, по результатам экспериментального исследования растекания образцов ПО, разработана математическая модель зависимости угла откоса ПО при растекании от плотности:

$$\beta = 0,65 \cdot \text{EXP}(1,81 \cdot \rho_{\text{ПО}}), \text{ град.} \quad (4)$$

Результаты расчета математических моделей (3) и (4) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов по моделям (3) и (4)

Параметр	Величина								
Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Плотность ПО, т/м ³	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10
Распределение массовой концентрации ПО на единицу площади, при $t = 40$ мин и $h = 4$ см, г/см ²	2,34	2,83	3,32	3,80	4,29	4,78	5,27	5,76	6,73
Угол откоса ПО при растекании, град	12,8	14,1	15,4	16,8	18,4	20,2	22,1	24,2	29,0

Вышеизложенное является доказательством второго положения выносимого на защиту, а именно: увеличить вместимость отвалов отходами обогащения можно за счет роста угла откоса складирования посредством повышения плотности отходов при сгущении их до пастообразного состояния.

Для эффективного использования пространства, формируемого в отвале скальных вскрышных пород, пастообразными отходами обогащения руд предложена технологическая схема складирования ПО вдоль центральной оси данного пространства с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород, рисунок 5.

При складировании ПО с исходной высотой H_k и углом откоса при растекании β_1 вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород h_{np} , будет происходить консолидация ПО, в результате чего

изменится величина превышения ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород до величины $h_{нру}$ и, соответственно угол откоса ПО до величины β_2 . Воздействие дождевых осадков размоют поверхность консолидированных ПО до угла откоса β_3 , в результате чего величина превышения ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород составит $h_{прк}$.

По результатам исследования процесса консолидации конуса ПО, по методике направленной на нахождение изменения объема после отжатия из ПО всей излишней по отношению к давлению вышележащих слоев жидкости и удаления порового пространства, выявлено изменение угла откоса ПО при консолидации (таблица 5) и высоты конуса ПО (таблица 6).

Таблица 5 – Изменение угла откоса ПО при консолидации

Исходная высота конуса ПО, м	Угол откоса ПО после уплотнения, град				
	$\rho_{по} = 1,7\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 1,8\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 1,9\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 2,0\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 2,1\text{т} / \text{м}^3$
5	12,5	15,3	18,4	22,6	27,2
10	12,5	15,2	18,4	22,5	27,1
15	12,2	15,0	18,1	22,3	26,8
20	12,0	14,8	17,8	22,0	26,5
25	11,7	14,5	17,5	21,7	26,2
30	11,5	14,3	17,2	21,5	25,9
35	11,2	14,0	16,9	21,2	25,6
40	11,0	13,8	16,7	21,0	25,3

Таблица 6 – Изменение высоты конуса ПО при консолидации

Исходная высота конуса ПО, м	Высота конуса после уплотнения, м				
	$\rho_{по} = 1,7\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 1,8\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 1,9\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 2,0\text{т} / \text{м}^3$	$\rho_{по} = 2,1\text{т} / \text{м}^3$
5	4,2	4,3	4,4	4,4	4,5
10	8,5	8,6	8,7	8,9	9,0
15	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5
20	16,9	17,2	17,5	17,7	18,0
25	21,2	21,5	21,8	22,2	22,5
30	25,4	25,8	26,2	26,6	27,0
35	29,6	30,1	30,6	31,0	31,5
40	33,9	34,5	34,9	35,5	36,0

По результатам проведенных экспериментальных исследований влияния плотности и угла откоса ПО на их устойчивость к размыву дождевыми осадками получена математическая модель потери массы ПО:

$$P_p = (0,06\rho_{по} + 0,04) \cdot \text{EXP}[\beta \cdot (0,57 - 0,25\rho_{по})], \% \quad (5)$$

В результате выявлено, что размыв контура поверхности ПО дождевыми осадками неизбежен до углов откоса 10–15 град.

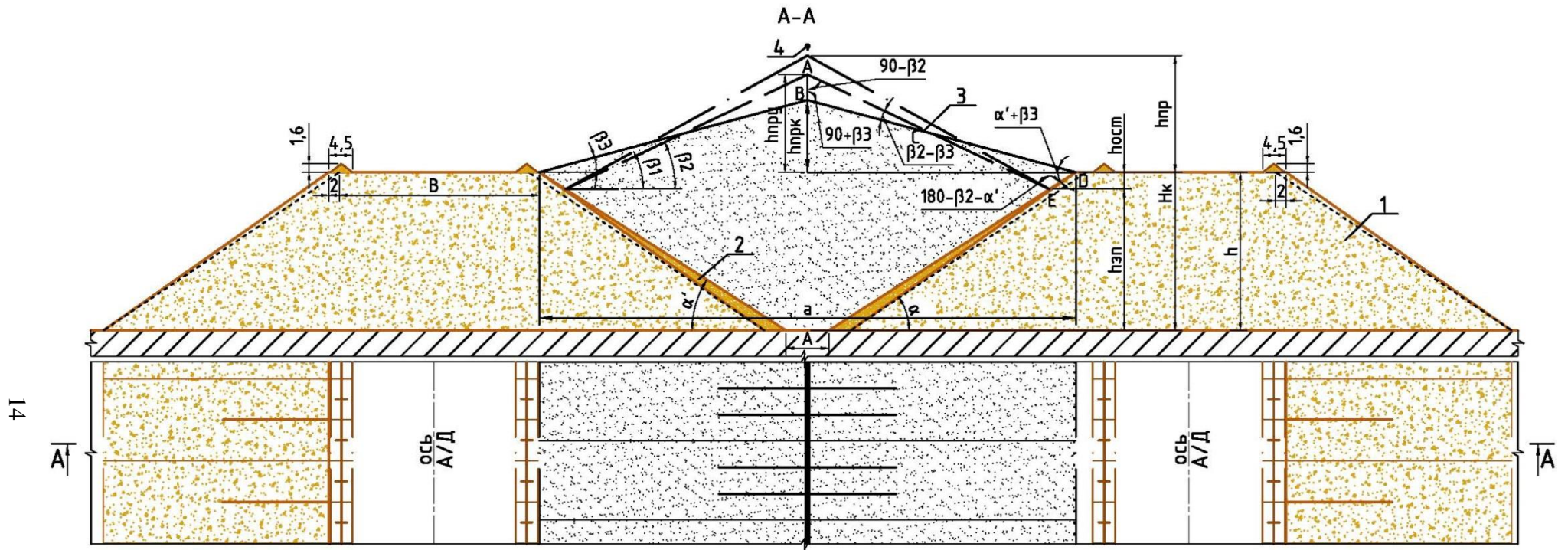


Рисунок 5 – Технологическая схема складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород:

1 – насыпь вскрышных пород; 2 – более мелкая порода вскрыши, отсыпанная на внутренние откосы насыпей вскрышных пород; 3 – ПО обогащения; 4 – пульпопровод

Тогда, для предохранения верхних площадок насыпи вскрышных пород от растекания на них пастообразного материала необходимо заполнять созданное пространство между насыпями вскрышных пород ПО до высоты $h_{3п}$, определяемой из выражения:

$$h_{3п} = h - \sin \alpha' \cdot \sqrt{\frac{(h_{нпы} - \frac{a}{2} \cdot \operatorname{tg} \beta_3)^2 \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \beta_3}{\sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(\alpha' + \beta_2)}}, \text{ м}, \quad (6)$$

где h – высота насыпи вскрышных пород, м; a – расстояние между верхними бровками насыпей вскрышных пород, м; α – угол откоса насыпи вскрышных пород, град; α' – угол откоса мелкой породы вскрыши отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород, град; β_1 – угол откоса ПО при растекании, град; $h_{нпы}$ – высота превышения ПО после консолидации над верхней площадкой насыпи вскрышных пород, м; β_2 – угол откоса ПО после консолидации, град; β_3 – угол откоса ПО после консолидации и размыва дождевыми осадками, град.

Полученное выражение (6) действительно при условии:

$$\begin{cases} A = a - 2h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha') \geq 0 \\ H_k > h \end{cases}.$$

Расчетные формулы коэффициентов использования пространства ПО и использования вскрышных пород для технологической схемы складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Формулы расчета коэффициентов использования пространства ПО и использования вскрышных пород

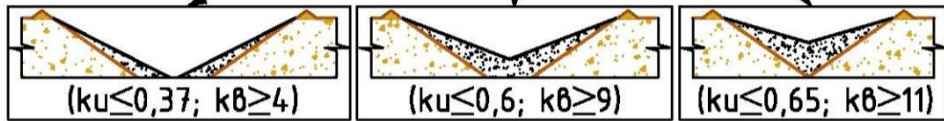
Способ складирования ПО		Коэффициент использования пространства ПО	Коэффициент использования вскрышных пород
С превышением точки выпуска над верхней площадкой насыпи вскрышных пород	S_1 – треугольник	$k_u = \frac{\sin(\alpha' + \beta_3)}{\sin \alpha' \cdot \cos \beta_3}$	$k_6 = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \cos \alpha' \cdot \cos \beta_3}{a^2 \cdot \sin(\alpha' + \beta_3)}$
	S_1 – трапеция	$k_u = \frac{a^2 \cdot \operatorname{tg} \beta_3}{4h(a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')} + 1$	$k_6 = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}{a^2 + h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}$

Систематизация предложенных технологических схем складирования ПО представлена на рисунке 6.

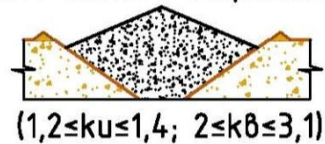
Технологические схемы складирования ПО

На горизонтальное или слабонаклонное основание в пространство, ограниченное насыпями вскрышных пород

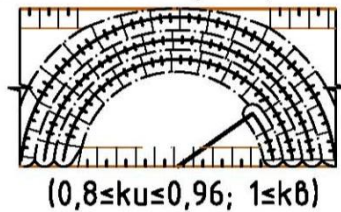
С откосов насыпи вскрышных пород



Складирование вдоль центральной оси с превышением точки выпуска над верхней площадкой насыпи вскрышных пород



Веерное складирование с обратным ходом, при монтаже пульпопровода на всю ширину создаваемого пространства



На наклонное основание в пространство, ограниченное насыпью вскрышных пород и склоном

С откоса насыпи вскрышных пород и со стороны склона на одном горизонтальном уровне



Со стороны склона с превышением над верхней площадкой насыпи вскрышных пород



Рисунок 6 – Систематизация предложенных технологических схем складирования ПО

Вышеизложенное является доказательством третьего положения выносимого на защиту, а именно: для сокращения потерь полезных компонентов следует исключить растекание складировуемых отходов за счет атмосферных осадков по площади отвалов, оставлением в складировуемом пространстве объема, не заполненного отходами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи по сокращению площадей, изымаемых под хвостохранилища, за счет складирования предварительно сгущенных до пастообразного состояния отходов обогащения в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, имеющей важное значение для развития горнодобывающей отрасли России.

1. Экспериментально доказано, что увеличение содержания твердого компонента в пастообразных отходах от 60 до 70 % приведет к возрастанию угла откоса пастообразных отходов при растекании с 15,1 до 25,5 град, соответственно и к сокращению их площади.

2. При увеличении высоты пастообразных отходов увеличивается их уплотнение за счет обезвоживания пастообразного материала и удаления порового пространства под действием давления вышележащих слоев, что приводит к выполаживанию угла откоса пастообразных отходов.

3. Размыв контура поверхности пастообразных отходов дождевыми осадками неизбежен до углов откоса 10–15 град.

4. На действующих отечественных фабриках и фабриках стран ближнего зарубежья с традиционной технологией складирования отходов обогащения возможен переход на технологию сгущения отходов до пастообразного состояния с содержанием твердого компонента до 60–70 % и их складирование в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород.

5. Максимальная эффективность складирования пастообразных отходов с насыпи вскрышных пород под откос по предложенным технологическим схемам достигается при содержании твердого компонента в пастообразном материале не превышающем 62 %.

6. Представленные технологические решения складирования пастообразных отходов вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска над верхней площадкой насыпи вскрышных пород и складирование пастообразных отходов веером с обратным ходом, показывают высокую эффективность при складировании пастообразных отходов с высоким содержанием твердого компонента (более 62 %).

7. При складировании пастообразных отходов над верхней площадкой насыпи вскрышных пород необходимо учитывать консолидацию и устойчивость пастообразных отходов к воздействию дождевых осадков, во избежание растекания пастообразного материала за пределы складировуемого пространства.

8. Сгущение отходов обогащения до пастообразного состояния и складирование их в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, позволит на примере месторождения рудного золота Боголюбовское исключить до 80 % потери земель, планируемых к отчуждению под хвостохранилище.

9. Физико-механические свойства вскрышных пород Боголюбовского месторождения обеспечивают устойчивость откоса отвала и самого отвала при сдвигающем действии сил ПО в предложенных технологических схемах складирования ПО.

10. Сравнение технико-экономических показателей базового варианта по предприятию и с применением технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения показало, что с внедрением предлагаемого решения ожидается увеличение прибыли предприятия на 603 млн руб., а ЧДД – на 970,5 млн руб. Индекс доходности составил 3,7.

11. Результаты исследований рекомендуется использовать при планировании горных работ на разрабатываемых и проектируемых рудных месторождениях, где предусмотрено измельчение в конечной стадии обогащения руд, а также в учебном процессе на кафедре открытых горных работ ИГДГГ СФУ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и приравненные к ним публикации:

1. **Шершнев, А.А.** О возможности применения пастообразного сгущения хвостов обогатительного передела / В.Е. Кисляков, А.В. Никитин, А.А. Шершнев // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – Т. 4. – С. 21-24.

2. **Шершнев, А.А.** Технологические схемы складирования пастообразных хвостов обогатительного передела в отвал вскрышных пород / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнев // Маркшейдерия и недропользование. – 2013. – Т. 2. – С. 43-44.

3. **Шершнев, А.А.** Прогнозирование угла естественного откоса пастообразных хвостов / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнев, А.И. Кулаков, М.В. Авдеев // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – Т. 1. – С. 50-51.

4. **Шершнев, А.А.** Растекание пастообразных хвостов обогатительного передела / А.А. Шершнев, В.Е. Кисляков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2014. – Т. 3. – С. 290-294.

5. **Шершнев, А.А.** Схемы складирования пастообразных отходов в отвал вскрышных пород / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнев // Маркшейдерия и недропользование. – 2016. – Т. 3. – С. 11-13.

6. **Патент 2507397 РФ, МПК E21C 41/26.** Способ отвалообразования на наклонное основание / В.Е. Кисляков, **А.А. Шершнев**; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012135723/03; заявл. 20.08.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 5 с.

7. **Патент 2509891 РФ, МПК E21C 41/26.** Способ отвалообразования при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / В.Е. Кисляков, А.В. Никитин, **А.А. Шершнев**; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012149649/03; заявл. 21.11.2012; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8. – 5 с.

8. **Патент 2520611 РФ, МПК E21C 41/26.** Способ отвалообразования на наклонное основание / В.Е. Кисляков, **А.А. Шершнев**; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2013110206/03; заявл. 06.03.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 4 с.

Статьи в других изданиях:

9. **Шершнев, А.А.** Применение пастового сгущения на горно-обогатительном предприятии / А.А. Шершнев // Актуальные вопросы современной науки: материалы IV международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 37-39.

10. **Шершнев, А.А.** Исследование укладки пастообразных хвостов обогатительного передела / А.А. Шершнев, А.И. Кулаков // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. материалов 11-й Международной науч.-техн. конф. – Красноярск: ИПК СФУ, 2013. – С. 165-169.

11. **Шершнев, А.А.** Технологические схемы складирования хвостов обогащения в подготовленные отвалы вскрышных пород / А.А. Шершнев // Международный научно-исследовательский журнал: сб. материалов XXI заочной науч. конф. Research Journal of International Studies. – Екатеринбург, 2013. – Т 11 (18) Часть 3. – С. 96-97.

12. **Шершнев, А.А.** Влияние концентрации раствора флокулянта ПАА на пыление отвалов пастообразных хвостов обогатительного передела / В.Е. Кисляков, А.А. Шершнев, А.И. Кулаков, М.В. Авдеев // Современные технологии освоения минеральных ресурсов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2014. – Выпуск 12. – С. 93-95.