

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Шершнеv Андрей Александрович

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

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор В.Е. Кисляков

Красноярск, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ.	11
1.1 Возможные виды отходов обогащения.....	11
1.1.1 Классические пульпообразные отходы .....	11
1.1.2 Отходы гидроциклонов .....	11
1.1.3 Пастообразные отходы.....	11
1.1.4 «Сухие» отходы.....	16
1.2 Способы транспортирования отходов обогащения.....	16
1.2.1 Транспортирование классических пульпообразных отходов .....	16
1.2.2 Транспортирование отходов гидроциклонов.....	18
1.2.3 Транспортирование пастообразных отходов .....	18
1.2.4 Транспортирование «сухих» отходов .....	25
1.3 Способы складирования отходов обогащения.....	26
1.3.1 Складирование классических пульпообразных отходов.....	26
1.3.2 Складирование отходов гидроциклонов .....	29
1.3.3 Складирование пастообразных отходов.....	31
1.3.4 Складирование «сухих» отходов.....	34
1.4 Анализ хвостохранилищ по содержанию техногенного минерального сырья .....	37
1.5 Выводы.....	38
2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ .....	40
2.1 Объект исследования.....	40
2.2 Методика проведения исследований .....	41
2.3 Обработка результатов исследования растекания пастообразных отходов ..	43
2.4 Определение угла откоса пастообразных отходов при складировании.....	48
2.5 Исследование процесса уплотнения пастообразных отходов.....	50

2.6	Результаты исследования влияния плотности и угла откоса пастообразных отходов на их устойчивость к размыву дождевыми осадками .....	54
2.7	Анализ возможности действующих горно-обогатительных предприятий сгущать отходы до пастообразного состояния .....	57
2.8	Выводы .....	60
3	<b>ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ</b>	<b>61</b>
3.1	Предлагаемые технологические схемы складирования пастообразных отходов .....	61
3.2	Коэффициент использования пространства пастообразными отходами .....	67
3.3	Коэффициент использования вскрышных пород .....	74
3.4	Технологические решения по увеличению коэффициента использования пространства пастообразными отходами .....	83
3.5	Систематизация предложенных технологических схем складирования пастообразных отходов .....	98
3.6	Оценка площадей, занимаемых пастообразными отходами .....	100
3.7	Технология отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения на примере месторождения Боголюбовское .....	102
3.8	Расчет устойчивости ограждающего сооружения .....	106
3.9	Выводы .....	113
4	<b>ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОГОЛЮБОВСКОЕ</b>	<b>115</b>
4.1	Расчет капитальных затрат изменяемых технологических процессов .....	116
4.2	Организация труда, численность трудящихся хвостового хозяйства .....	118
4.3	Расчет эксплуатационных затрат .....	119
4.3.1	Вспомогательные материалы .....	119
4.3.2	Расчет затрат на электроэнергию .....	120

4.3.3 Основная заработная плата персонала хвостового хозяйства.....	121
4.3.4 Расходы по эксплуатации и содержанию оборудования.....	121
4.4 Эффективность инвестиционного проекта .....	123
4.4.1 Общие положения.....	123
4.4.2 Расчет экономической эффективности инвестиционного проекта .....	124
4.4.3 Показатели эффективности проекта .....	130
4.5 Вывод.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТЕКЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	147

## ВВЕДЕНИЕ

**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).

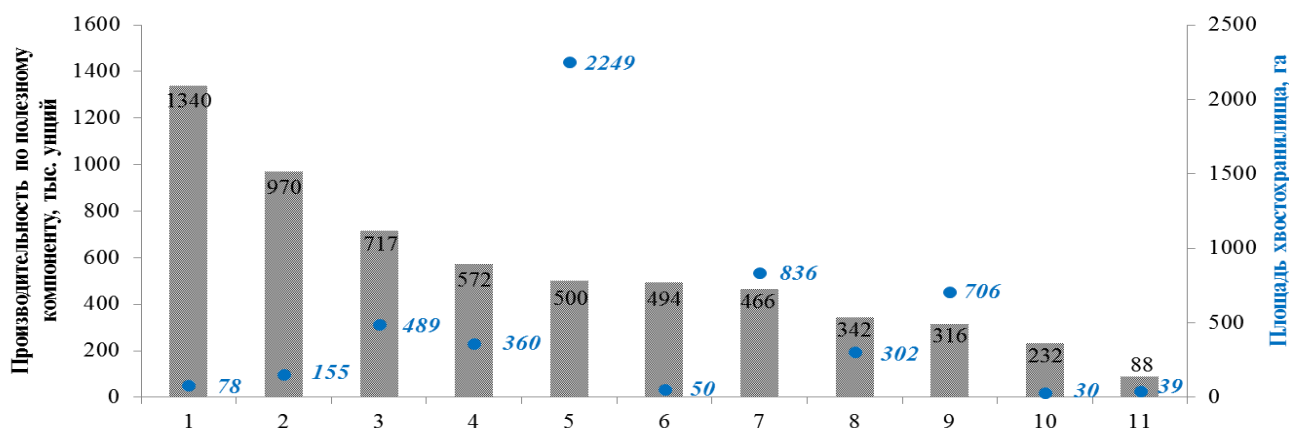


Рисунок 1 – Площади хвостохранилищ при производительности горно-обогатительных предприятий со сроком эксплуатации [1–10]:

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 объёмах 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 [11], 135 из них были авариями, в результате которых было выброшено 41,9 млн м<sup>3</sup> жидких отходов, распространившихся на значительные расстояния, что вызвало обширные разрушения и человеческие потери.

Решение проблемы сокращения объёмов 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 складированных 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 доверительной 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 Красноярска «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.

# **1 ОБЗОР ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

## **1.1 Возможные виды отходов обогащения**

### **1.1.1 Классические пульпообразные отходы**

Пульпообразные отходы – отходы обогащения с соотношением твердого к жидкому (Т:Ж) от 1:4 до 1:1, разделение по крупности при складировании не предусматривается.

### **1.1.2 Отходы гидроциклонов**

Отходы гидроциклонов – отходы, разделенные по крупности в водной среде в процессе классификации. Тяжелую фракцию (пески) обычно складировать возле дамбы хвостохранилища, тонкозернистую фракцию (слив) – в долину хвостохранилища.

### **1.1.3 Пастообразные отходы**

Пастообразные отходы (далее – ПО) обогащения представляют собой не сегрегирующий при укладке материал с высоким содержанием твердого составляющего (до 75 %), с напряжением сдвига свыше 200 Па, выделяющие незначительное количество воды (менее 10 % от её общего объема) или вообще не выделяющие воду (при содержании твердого составляющего 75 %) [12]. 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 [13]. Это определяет специфические свойства пасты, такие как неосаждаемость, неразделимость, устойчивость к расползанию и внешним воздействиям, вязкость.

### **1.1.3.1 Сгущение отходов до пастообразного состояния**

Сгущение отходов обогащения до состояния пасты осуществляется специальными установками – пастовыми сгустителями с использованием флокулянтов, оптимизирующих процесс отделения жидкой фазы (воды). На мировом рынке распространены пастовые сгустители компаний «WesTech Inc.» (США) [14], «Outotech» (Финляндия) [15] и «FLSmidth» (Дания) [16].

За последние годы конструкция сгустителей подверглась существенным изменениям, которые позволили резко повысить их производительность при сокращении габаритных размеров (рисунок 1.1).

Представитель компании «Outotech» Brad Garauey отметил: «Метод сам по себе не нов, известно, что и традиционные сгустители способны производить пасту. К сожалению, процесс, как правило, заканчивается, едва успев начаться: граблины увязают в уплотнившейся осадке и останавливаются. Таким образом, при разработке высокопроизводительного сгустителя большой глубины осаждения главная задача состояла в способности производить пасту контролируемо и бесперебойно» [15].

Система управления пастовым сгустителем построена на двух дискретных цепях:

- флокуляция контролируется изменением скорости подачи флокулянта для установления оптимального его расхода в зависимости от производительности по твердому компоненту. Для этого используются показания уровня постели;
- уровень постели регулируется путем изменения скорости насосов сгущенного продукта для поддержания постоянной массы постели.

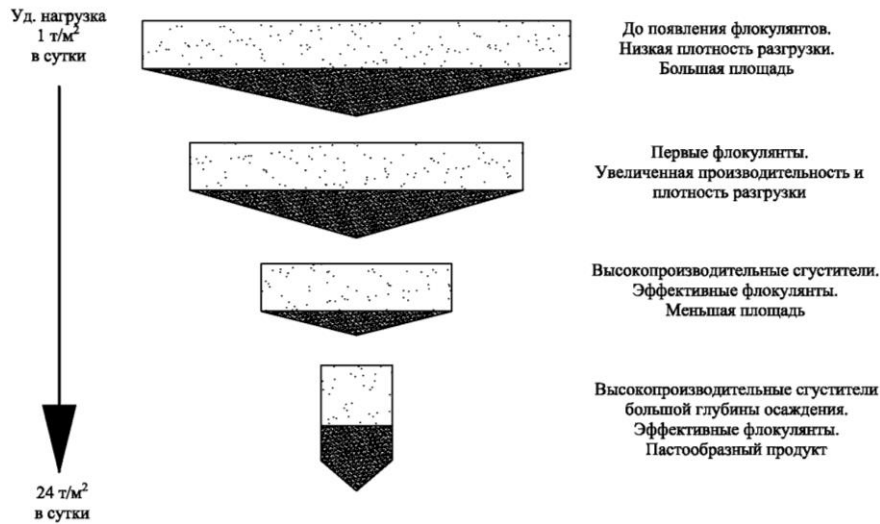


Рисунок 1.1 – Эволюция сгустителей [17]

Путем управления расходом флокулянта и скоростью разгрузки продукта процесс сгущения стабилизируется и достигается постоянство плотности.

Для интенсификации процесса сгущения применяют различные реагенты: электролиты (эффективные коагулянты) [18], гидрофобизаторы и синтетические высокомолекулярные флокулянты [19–22].

В качестве коагулянтов-электролитов наиболее широко применяют известь, соли железа, щелочи, кислоты и алюмокалиевые квасцы.

К реагентам-гидрофобизаторам относят ксантогенаты, амины, олеаты, алкилсульфаты и другие реагенты-собиратели.

Высокомолекулярные, водорастворимые полимерные флокулянты широко применяют в процессах сгущения и фильтрования, их действие в 2-4, а иногда и в 10 раз эффективнее действия коагулянтов. В процессе сгущения возможно применение полимерного флокулянта в сочетании с электролитом, из-за чего повышается чистота слива сгустителя.

Эффективность действия флокулянтов (таблица 1.1) обычно оценивают по их расходу и увеличению скорости осаждения твердой фазы.

Таблица 1.1 – Флокулянты отечественного производства

Флокулянт	Молекулярная масса, г/моль	Содержание основного вещества, %	Стоимость (100 % полимера), руб./т
Полиакриламид:			
<i>гель</i>	$(1-6) \cdot 10^6$	6–8	23000–25000
<i>гранулы</i>	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	45–60	42000
<i>порошок</i>	$3 \cdot 10^5$	$\geq 98$	7700
Метас	$3 \cdot 10^5$	35–60	24000–26000
Гипан	$3 \cdot 10^5$	10	135000

В промышленности применяют большое число синтетических флокулянтов, но основным из них все же является полиакриламид [23–24], из-за эффективного действия в широком диапазоне рН среды [25]. Полиакриламид не ядовит, хорошо растворяется в воде (в течение 20–30 мин).

Расход негидролизованного и гидролизованного полиакриламида составляет соответственно 10–60 и 5–25 г на тонну сгущаемого продукта.

За последнее десятилетие в мире только в медно-молибденовой отрасли введены в эксплуатацию более десяти крупных горно-обогатительных комбинатов, существенно расширены действующие предприятия и проектируется ряд новых. Предпочтение отдают решению с организацией внутризаводского водооборота со сгущением хвостов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Хвостовые сгустители на действующих и проектируемых зарубежных фабриках [26]

Фабрика, страна	Производительность		Количество, шт	Ø сгустителя, м	Площадь сгустителя, м	Изготовитель	Расход флокулянта, г/т	Удельная нагрузка, т/м <sup>2</sup> ч
	млн т/год	тыс. т/сут						
Действующие фабрики								
Ray, США	11	30,1	1	122	11684	н.д.	н.д.	0,11
Tortolas, Чили	12,5	34,3	2	91,5; 45,7	8212	н.д.	н.д.	0,17
Robinson, США	13,6	37,3	2	70	7693	н.д.	н.д.	0,2
Copperton, США	41	112	3	122	35052	н.д.	н.д.	0,39
La Candelaria, Чили	10	27,4	1	122	11684	н.д.	н.д.	0,1
Collahuasi, Чили	25	69	1	125	12266	Dorr	н.д.	0,23
Ernest Genry, Австралия	9	24,6	1	55	2375	Dorr	н.д.	0,43
Los Palambres, Чили	42	114	2	128	25722	Dorr	н.д.	0,17
Laguna Seca, Чили	40	110	3	125	36798	Dorr	н.д.	0,12
Grasberg №1-4, Индонезия	84	230	2	75; 122	16100	н.д.	37	0,6
Cadia, Австралия	17	48	1	120	11300	Dorr	30	0,2
Cerro Verde, Перу	39,4	108	2	75	8831	Dorr	40	0,51
Telfer, Австралия	17	48	1	62	3017	Outotec	н.д.	0,66

Фабрика, страна	Производительность		Количество, шт	Ø сгустителя, м	Площадь сгустителя, м	Изготовитель	Расход флокулянта, г/т	Удельная нагрузка, т/м <sup>2</sup> ч
	млн т/год	тыс. т/сут						
Проектируемые фабрики								
TelFer (Cu-Au), Австралия	17	48	1	62	3017	Outotec	н.д.	0,66
Galore Creek (Cu), Канада	22	65	1	64	3215	Outotec	7 (А-130 Сайтек)	0,88
Boddigton (Au), Австралия	35	103	1	74	4300	Outotec	н.д.	0,98
Voisey Bay (Ni), Канада	2,6	7,2	1	22,9	411	Outotec	н.д.	0,71
Spinifex (Mo), Австралия	20	60	1	64	3215	Outotec	15	0,78
El Galeno (Cu-Mo), Перу	32,4	90	2	55	4750	н.д.	32	0,84
El Moro (Cu), Чили	32,4	90	7	50; 40	10904	н.д.	25 и 30	0,36

Идея пастового сгущения все чаще находит свое воплощение на действующих фабриках, а также в проектах новых фабрик (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Применение пастового сгущения на действующих и проектируемых обогатительных фабриках [27]

Фабрика	Обогащаемый полезный компонент	Место нахождения
Действующие фабрики		
1. Kidd Creek	Cu-Zn-Ag	Канада
2. Grund Mine	Pb-Zn	Германия
3. Lucky Friday	Pb-Zn	США
4. Barrick Gold, Bulyanhulu	Au	Танзания
5. Peak Mine	Cu-Pb-Zn-Au	Австралия
6. Mount Keith	Ni	Зап. Австралия
7. Myra Falls	Cu-Zn	Канада
8. Strathcona	Cu-Zn	Канада
9. Sunrise	Au	Австралия
10. Pajingo Gold Mine	Au	Квинсленд, Австралия
11. Ravensthorpe	Ni	Австралия
Проектируемые фабрики		
12. Scouries	Cu-Au	Греция
13. Kylylahti	Cu-Ni	Финляндия
14. Miduk	-	Иран
15. Sar Cheshmech	Cu	Иран
16. Andina	Cu	Чили
17. Colon	Cu	Чили

### **1.1.4 «Сухие» отходы**

Ещё более радикальным способом обезвоживания отходов обогащения является система получения «сухих» отходов. Согласно этой технологии отходы обогащения подвергаются глубокому обезвоживанию с применением на заключительной стадии фильтрации ленточных или даже пресс-фильтров до влажности 10–15 % [28].

К недостаткам системы получения «сухих» отходов относят [29]:

- высокие эксплуатационные расходы;
- «сухие» отходы являются потенциальным источником пыления.

## **1.2 Способы транспортирования отходов обогащения**

### **1.2.1 Транспортирование классических пульпообразных отходов**

Для удаления пульпообразных отходов в горнодобывающей промышленности в большинстве случаев применяется гидравлический транспорт, а хвостовое хозяйство обогатительных фабрик имеет следующие основные сооружения [30]:

- пульпонасосная станция (в некоторых случаях их несколько: для подачи исходной пульпы до сгустителя и пульпонасосная станция сгущенных хвостов);
- магистральный пульпопровод (рабочий и резервный);
- хвостохранилище (наливные либо намывные);
- насосная станция оборотной воды;
- водоводы оборотной воды.

Оборудование пульпонасосных станций некоторых обогатительных фабрик представлено в таблице 1.4.



Таблица 1.4 – Оборудование пульпонасосных станций обогатительных фабрик [31]

Объект	Кол-во пульпонасосных станций	Используемое оборудование	Максимальная дальность подачи хвостов, км
Месторождение «50 лет Октября» (Казахстан)	2	грунтовые насосы 2×Warman 350SY-L, 2×Warman 8/6 FFY	4
ООО «АЛДАНЗОЛОТО» ГРК	1	2×Warman 14/12	8,3
ЗАО «ПОЛЮС», «Благодатное»	-	-	3
ОАО «Корпорация «КАЗАХМЫС» (Казахстан), Железказганская ОФ	2	5×ГрТ 8000-71, 6×ГрТ 8000-71	9
ОАО «Ковдорский ГОК»	1	2×Варман 20/18	8
ОАО «Карельский окатыш»	1	12×ГрТ 8000-71, Warman 650ULP, Warman 28/24	15
Нурказганский ГОК (Казахстан)	1	2×Варман 12/10	2
ОАО «Оленегорский ГОК»	1	6×ГрТ 8000-71, 6×Warman 20/18	10
ОАО «Кольская ГМК»	1	Метсо ХР 500	7
ОАО «Корпорация «КАЗАХМЫС»» (Казахстан), Сатпаевская ОФ	1	ГраТ 1700	5
ОАО «Тырныаузский ВМК»	1	20 Гр-8Т, Д4000-125	12
ОАО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан)	1	28 Гр-8Т, Д4000-125	15
ОАО «Севералмаз»	1	HM200C5FFP2 фирмы «Metso», 1Д500-63а	2,3
ПО «Эрдэнэт» (Монголия)	1	ГрТ 8000-71, ЦНС 3000-180	15
ОАО «Апатит» АНОФ-2. (г. Кировск Мурманской области)	3	11×ГрТ8000/71 (9 в резерве)	6,4
ОАО «Апатит» АНОФ-3. (г. Кировск, Мурманская область)	1	3×ГрТ8000/71 (2 в резерве)	3
ТОО «Корпорация «КАЗАХМЫС» по «Балхашцветмет» (Казахстан)	2	3×ГрТ1600-50 (2 раб.); 2×20Гр8Т; 2×ГрТ4000-71	9,5
ОАО «АРХАНГЕЛЬСКГЕОЛДОБЫЧА» ГОК на базе месторождения алмазов им. В.П. Гриба (Архангельская обл.)	2	6×14/12 АН «Warman»	8,1
ОАО «ГМК «Дальполиметалл»» Центральная ОФ (Приморский край)	2	4×Гр600/65 (1 раб); 5×Гр600/65 (1 раб, 1 раб. спарка)	15
АО «ЗГОК» АО «Казцинк» ОФ (Казахстан)	1	5×ГрАТ1800/67	8,5
Заполярный филиал ОАО «ГМК «Норильский Никель». Талнахская ОФ	1	17×Ingersoll-Rand; 17×Geho TZPM-1600	20
	2	5×Ingersoll-Rand; 5×Geho TZPM-1600	10
ЗАО «Ормет» (Новоорский район Оренбургской области)	2	5×6/4 ЕАНЕ «WARMAN»	6,3
ОАО «Севералмаз» ОФ	1	2×HM200C5FFP2 «Metso»	2,1

### 1.2.2 Транспортирование отходов гидроциклонов

В большинстве случаев транспортирование отходов гидроциклонов осуществляется гидравлическим транспортом, но бывают и исключения. Так, на железорудном ГОКе Serra Azul Mine (Бразилия) отходы гидроциклона после высушивания транспортируют автосамосвалами до полигона складирования (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Разгрузка слива гидроциклона на полигоне складирования, Serra Azul Mine [32]

### 1.2.3 Транспортирование пастообразных отходов

Транспортирование отходов, сгущенных до пастообразного состояния, осуществляется гидравлическим транспортом.

Например, на Гайской обогатительной фабрике применяется пастовое сгущение отходов обогащения медно-цинковой руды. Транспортировка их осуществляется при помощи центробежных грунтовых насосов ГрТ 8000/71, расстояние транспортирования составляет 2 км [33].

Компанией JRI Ingenieria S.A. (Чили) предложен вариант складирования отходов обогащения меднорудной фабрики Codelco Norte (DCN, Чили) в 2020–2050 гг. по пастовой технологии. Данная технология предусматривает

транспортирование пасты поршневыми насосами. Пастообразные отходы будут подаваться на высоту до 50 м с уклоном поверхности отложений до 6 % [34]. Перечень оборудования для сгущения и гидротранспортирования отходов представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Оборудование для сгущения и гидротранспортирования отходов в виде пасты на меднорудной фабрике Codelco Norte, шт. [13, 34]

Оборудование	Производительности фабрики тыс. т руды/сут	
	182	230
Конусный сгуститель Ø 20 м	20	25
Поршневой насос мощностью 1300 кВт	20	25
Пульпопровод номинальным Ø 700 мм	16*	22*
Насос оборотной воды мощностью 1100 кВт	8	10

Примечание – для пульпопровода указана общая длина, км

В процессе проектирования обогатительной фабрики железорудного месторождения Серро Negro (Чили), при производительности в 14 тыс. т сухих отходов в сутки (580 т/ч) с концентрацией твердого в пульпе на выходе 4 % (расход пульпы – 13,5 тыс. м<sup>3</sup>/ч), было рассмотрено четыре варианта транспортирования [13, 34].

*Вариант 1.* Предполагает наличие сгустителя НСТ-типа диаметром 50 м, который сгущает отходы до концентрации 70 % твердого. При такой концентрации и напряжении сдвига в 55 Па отходы текут в ламинарном режиме. В этом случае высока вероятность процесса сегрегации отходов, в связи с чем необходимо не менее четырех (3+1) поршневых насосов мощностью 294,2 кВт каждый. В хвостохранилище отходы доставляются по футерованному резиной стальному пульпопроводу диаметром 300 мм и длиной 5,5 км.

По результатам седиментационных анализов при данной степени сгущения освобождается наименьшее количество воды, которая практически не может быть восстановлена и возвращена в технологический процесс, так как она в значительной степени испаряется или впитывается в массив отложений в процессе складирования.

*Вариант 2.* Предусматривает установку на фабрике сгустителя НРТ-типа диаметром 40 м для сгущения отходов до концентрации 40 % твердого. Далее они самотеком по пульпопроводу из полиэтилена повышенной плотности HDPE (диаметр 450 мм, длина 5,5 км) поступают в сгуститель НСТ-типа диаметром 50 м рядом с хвостохранилищем, где досгущаются до концентрации твердого 70 %. Вода из второго сгустителя возвращается на фабрику (206 л/с) по системе перекачивания, состоящей из четырех (3+1) насосов по 147,1 кВт каждый и трубопровода переменной толщины (в зависимости от давления) из полиэтилена HDPE (диаметр 500 мм).

*Вариант 3.* Технически отличается от варианта 2 тем, что сгуститель НРТ-типа (сгущение на фабрике до концентрации 50 % твердого) имеет диаметр 45 м, диаметр пульпопровода до сгустителя у хвостохранилища – 400 мм. Осветленная вода из второго сгустителя НСТ-типа диаметром 50 м, подается на фабрику (110 л/с) по системе перекачивания, состоящей из двух насосов (1+1) по 220,65 кВт каждый и трубопровода переменной толщины (в зависимости от давления) из полиэтилена HDPE диаметром 400 мм.

*Вариант 4.* Сгуститель НРТ-типа на фабрике (сгущение до концентрации 60 % твердого) имеет диаметр 50 м. Сгущенные отходы перекачиваются к хвостохранилищу центробежными насосами (1+1, 331 кВт каждый) по футерованному резиной стальному пульпопроводу диаметром 305 мм первые 2,9 км, далее по пульпопроводу из полиэтилена HDPE диаметром 355 мм, длиной 2,6 км. Осветленная вода из второго сгустителя НСТ-типа диаметром 50 м подается (46 л/с) на фабрику насосами (1+1, 110,3 кВт каждый) по трубопроводу переменной (в зависимости от давления) толщины из полиэтилена HDPE диаметром 280 мм.

Экономические показатели данных вариантов приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнительные экономические показатели при внедрении представленных вариантов транспортирования отходов процесса обогащения на железорудной фабрике Серро Negro, млн долл. США [13, 34]

Вариант	Инвестиционный капитал	Эксплуатационные расходы	Суммарный показатель
1	37,47	34,61	72,10
2	29,27	33,31	62,59
3	27,64	32,43	60,07
4	28,99	33,27	62,26

В работе С.Ю. Авксентьева [35] были исследованы свойства и установлены рациональные режимы трубопроводного напорного транспортирования пастообразных отходов обогащения медно-цинковой руды.

Анализ гранулометрического состава пасты показал, что она в основном состоит из мельчайших классов (-0,044 мм до 78 %), а среднее значение плотности составляет 3,0 т/м<sup>3</sup>.

Выполненные автором исследования на капиллярном и ротационном вискозиметрах показали, что при достижении определенной концентрации твердого пастообразные отходы обогащения приобретают реологические свойства (рисунок 1.3) и перемещаются в режиме вязкопластичного течения, описываемого уравнением Балкли–Гершеля:

$$\tau = \tau_0 + \kappa \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.1)$$

где  $\tau_0$  - начальное напряжение сдвига, Па;  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\kappa$  – показатель концентрации;  $\dot{\gamma}$  – градиент скорости, с<sup>-1</sup>; n – индекс течения.

Нелинейность кривой течения говорит о том, что вязкость таких сред не имеет определенного значения, а изменяется с увеличением или уменьшением градиента скорости.

1. При напряжении  $\tau_0 < \tau < \tau_a$  течение в структурном режиме с практически неразрушенной структурой.

2. В интервале напряжений от  $\tau_a < \tau < \tau_k$  течение в переходном режиме с непрерывно разрушающейся структурой.

3. При напряжениях  $\tau > \tau_k$  течение в турбулентном режиме с разрушающейся структурой.

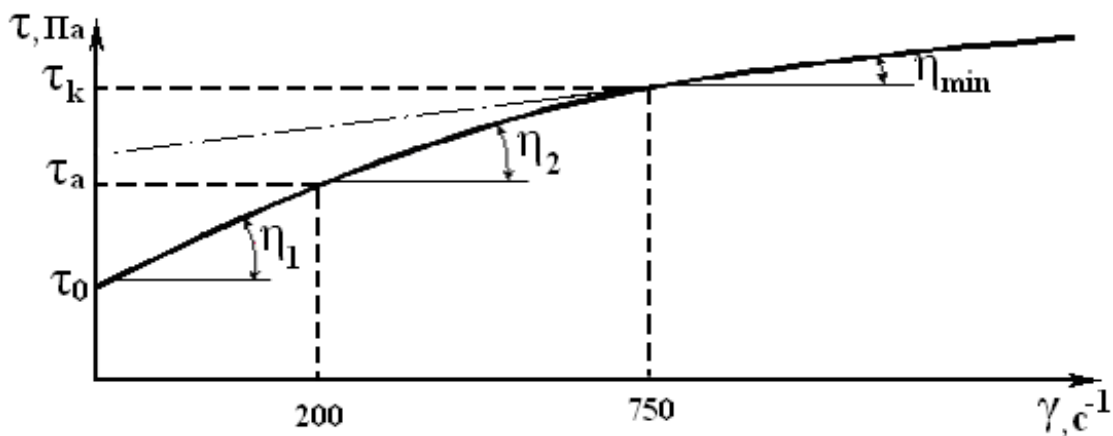


Рисунок 1.3 – Обобщенная реологическая кривая гидросмеси отходов обогащения медно-цинковой руды

В работе по обоснованию методов расчета параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей [36] выявлено, что флокулянты, используемые в технологии сгущения пульпы, одновременно являются гидродинамически активными веществами (ГДАВ). Присутствие ГДАВ уменьшает амплитуду и частоту турбулентных пульсаций в пристеночной области потока и увеличивает толщину вязкого подслоя, что приводит к уменьшению гидравлического сопротивления трения жидкости о стенку трубы [37–41]. Введение ГДАВ во взвесенесущие потоки малой концентрации также вызывает снижение гидравлического сопротивления, однако, в меньшей степени, чем при отсутствии в потоке частиц твердой фазы [40, 41]. При этом интенсивность снижения гидравлического сопротивления потоков пульпы с добавками ГДАВ во многом зависит от свойств твердой фазы. В потоках пульпы с концентрацией пасты ГДАВ снижает трение между частицами, уменьшая начальное напряжение сдвига и эффективную вязкость [36].

Санкт-Петербургским государственным горным институтом имени Г.В. Плеханова запатентована напорная трубопроводная система для транспортирования пастообразных материалов [42], которая представлена на рисунке 1.4.

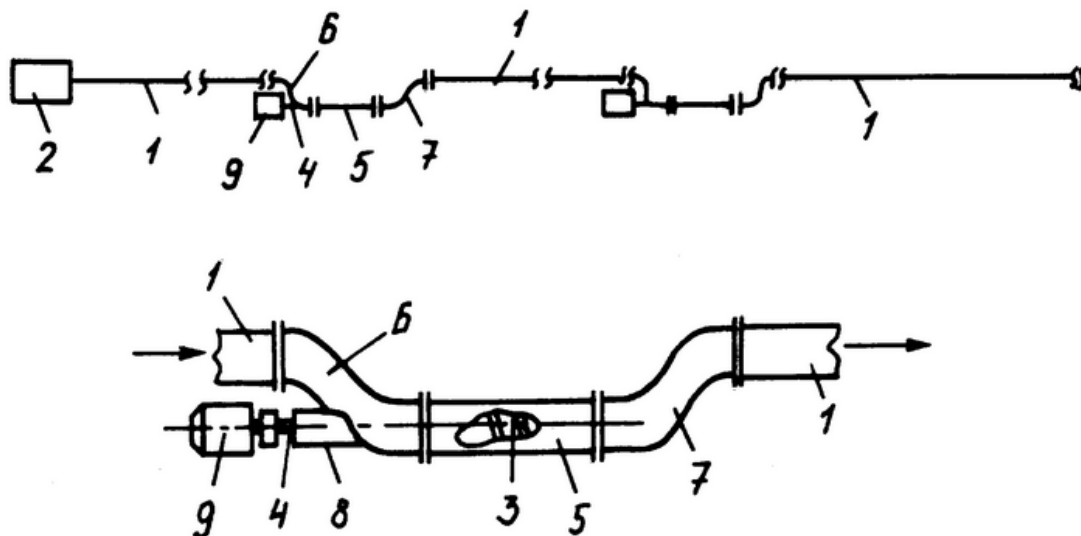


Рисунок 1.4 – Напорная трубопроводная система для транспортирования пастообразных материалов: 1 – трубопровод; 2 – насос; 3 – винтовые насосы; 4 – вал; 5 – труба с переходными патрубками; 6, 7 – патрубки; 8 – опора; 9 – электродвигатель

Напорная трубопроводная система для транспортирования пастообразных материалов содержит трубопровод, состоящий из соединенных между собой труб, насоса в головной части трубопровода и перекачных устройств, размещенных в средней части трубопровода и распределенных по его длине. Перекачные устройства в средней части трубопровода выполнены в виде винтовых насосов.

Вал каждого насоса размещен в смещенной в сторону от оси трубопровода трубе, которая соединена с трубопроводом переходными патрубками. Вал выполнен консольным и размещен в опоре, закрепленной на стенке одного из патрубков, примыкающих к трубе. Вал кинематически связан с электродвигателем.

Подлежащий транспортированию пастообразный материал насосом подается в трубопровод. Необходимый напор по длине трубопровода

обеспечивается перекачными винтовыми насосами. При этом транспортируемый пастообразный материал в зоне установки перекачных винтовых насосов проходит по трубе и примыкающим к ней переходным патрубкам.

Изобретение обеспечивает повышение надежности эксплуатации напорной трубопроводной системы, её упрощение и снижение стоимости при транспортировании пастообразных материалов.

Для транспортирования пастообразного материала по трубопроводу также можно использовать грязевые, шламовые, поршневые, центробежные и эксцентриковые насосы [43–45].

Компания Putzmeister AG разработала множество типов насосов, предназначенных для перекачки высоковязких твердых материалов (паст) либо чрезвычайно сухих материалов [44]. Например, клапан-контролируемый насос HSP для твердых веществ с высокой плотностью.

Основные особенности насоса серии HSP Duo заключаются в отдельных цилиндрах доставки и отдельных головках насоса с гидравлически контролируруемыми тарельчатыми клапанами. Каждая головка насоса имеет два гидравлически контролируемых тарельчатых клапана (один впускной клапан и один нагнетательный клапан), каждый из которых приводится в действие одним из гидравлических цилиндров. HSP Duo тарельчатые клапаны насоса рассчитаны на давление до 130 бар и на величину доставки до 200 м<sup>3</sup>/ч [44].

Необходимость сочетания высоких скоростей потока материала с высоким давлением привело к разработке трехцилиндровых насосов серии Putzmeister HSP. Эти насосы предназначены для перемещения пастообразных отходов со скоростью доставки до 400 м<sup>3</sup>/ч при давлении 75 бар [44].

В отличие от предшественника, который имеет два цилиндра доставки, у HSP Triplex три отдельных цилиндра доставки. Каждый цилиндр имеет отдельную головку насоса с одним нагнетательным и одним впускным клапанами. В разработке новой серии насоса с гидравлическим приводом особый акцент был сделан на эксплуатационную надежность и работоспособность машины. Система управления была разработана так, чтобы позволить каждому



цилиндру обеспечивать доставку по отдельности. Это означает, что в случае неисправности одного или даже двух цилиндров насос сможет продолжать работу, используя только один цилиндр [44].

Параллельно с развитием новой серии насосов HSP Triplex, Putzmeister разработали управление PCF (постоянное давление потока). Логика управления здесь основана на том, чтобы позволить оператору переключать два цилиндра с минимальным падением давления. Интеграция управления PCF позволила достичь почти постоянной скорости потока без серьезных перепадов давления, связанных с переключением между отдельными цилиндрами [44].

Клапан-контролируемые насосы HSP Duo и Triplex представлены на рисунке 1.5.

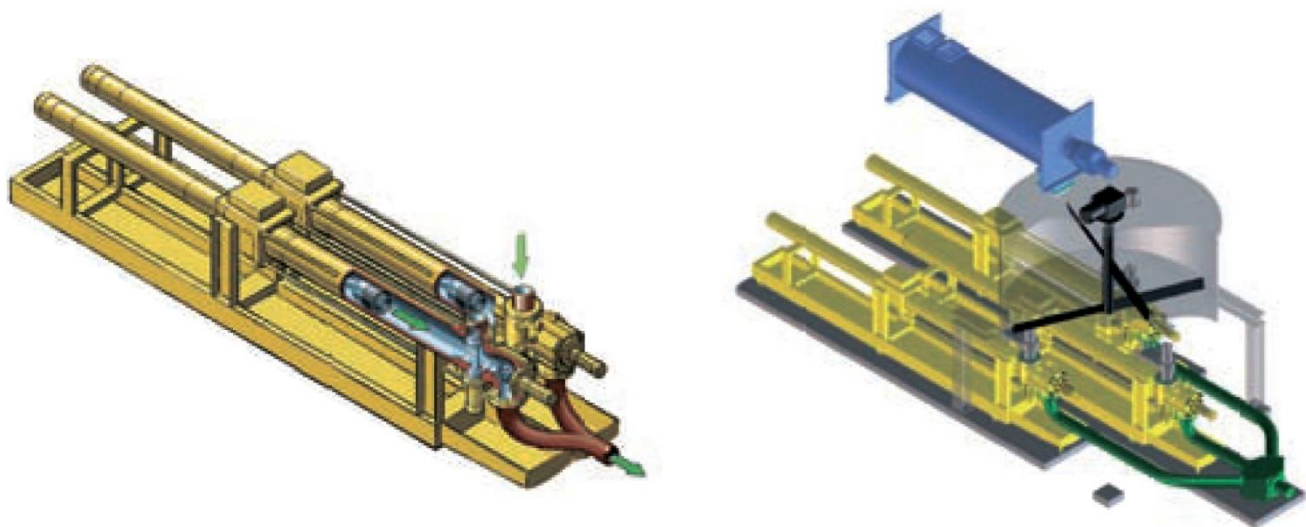


Рисунок 1.5 – Клапан-контролируемые насосы компании Putzmeister:  
HSP Duo (слева); HSP Triplex (справа) [44]

#### 1.2.4 Транспортирование «сухих» отходов

Для транспортирования «сухих» отходов от обогатительной фабрики до площадки складирования используют конвейерный либо автомобильный транспорт (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Транспортирование и складирование «сухих» отходов некоторых горно-обогатительных комбинатов [28, 45]

№	Фабрика	Перерабатываемый полезный компонент	Транспортирование	Место складирования
1	Raglan (Канада)	Cu-Ni	Самосвалами	Отдельный полигон
2	Pogo (Канада)	Au	Самосвалами	Совместно с пустой породой
3	La Coira (Мексика)	Au-Ag	Конвейером	Отдельный полигон
4	El Sauzal (Мексика)	Au	-	Совместно с пустой породой
5	Elkview (Канада)	уголь	-	Совместно с пустой породой
6	Scorpion (Намибия)	Zn	-	Отдельный полигон
7	Spinifex Ridge (Австралия)	Mo	Конвейером	Отдельный полигон
8	Rio Blanco (Перу)	Cu-Mo	Конвейером	Отдельный полигон
9	Nifty (Австралия)	Cu	Конвейером	Отдельный полигон
10	Rosemont (США, шт. Аризона)	Cu	Конвейером	Совместно с пустой породой
11	ЗАО "ПОЛЮС" на базе месторождения Благодатное	Au	За пределы технологического корпуса ЗИФ - ленточным транспортером, далее автосамосвалами	Отдельный полигон

### 1.3 Способы складирования отходов обогащения

#### 1.3.1 Складирование классических пульпообразных отходов

Складирование пульпообразных отходов обогащения (рисунок 1.6) в горнорудной промышленности производят в хвостохранилища, которые занимают огромные площади земельных ресурсов за счет формирования пологих уклонов намываемой поверхности (таблица 1.8).



Рисунок 1.6 – Складирование пульпообразных отходов обогащения в хвостохранилище [46]

Таблица 1.8 – Земли, отчуждаемые под хвостохранилища некоторых горно-обогатительных комбинатов [31]

№	Объект	Площадь хвостохранилищ, га	Объём накопленных отходов, млн м <sup>3</sup>	Складирование отходов, млн т/год
1	ОАО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), МОФ №1	800	400	27
	ОАО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), сектор МОФ	1550		
	ОАО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), сектор СОФ	431		
2	ОАО «Александринская горнорудная компания» (Челябинская обл.)	55	5,06	2
3	ОАО «Апатит». АНОФ-2 (г. Кировск Мурманская область)	780	720	160
	ОАО «Апатит». АНОФ-3 (г. Кировск, Мурманская область)	1800		110
4	ТОО «Корпорация «Казахмыс» по «Балхашцветмет» (Казахстан)	1760	200	24
5	Металлургический завод по производству чугуна «ПАНГ ПЕТ» (Союз Мьянмы (Бирма))	18	1	0,6
6	ОАО «Бокситогорский глинозем» (Ленинградская обл.)	80	16,2	0,3
7	ОАО «Васильковский ГОК» (Казахстан), Хвостохранилище флотации	620	144	236
	ОАО «Васильковский ГОК» (Казахстан), Хвостохранилище сорбции	216	6,5	
8	ОАО «Архангельскгеолдобыча». ГОК на базе месторождения алмазов им. В.П. Гриба (Архангельская обл.)	305	25	4,5
9	ОАО «ГМК «Дальполиметалл»». Центральная обогатительная фабрика. (Приморский край)	51,8	13,3	8,7

№	Объект	Площадь хвостохранилищ, га	Объём накопленных отходов, млн м <sup>3</sup>	Складирование отходов, млн т/год
10	АО «ЗГОК» АО «Казцинк». Обогащительная фабрика (Казахстан)	250	80	2,7
11	АО «Маднеули». Обогащительная фабрика (Грузия)	48	27,7	1,7
12	ЗАО «Северо-западная фосфорная компания» (Мурманская область)	280	48	6
13	ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (Башкортостан)	105	35	5,2

Динамику отчуждения земель под отвалы и хвостохранилище по годам проследим на примере Жирекенского ГОКа (рисунок 1.7).

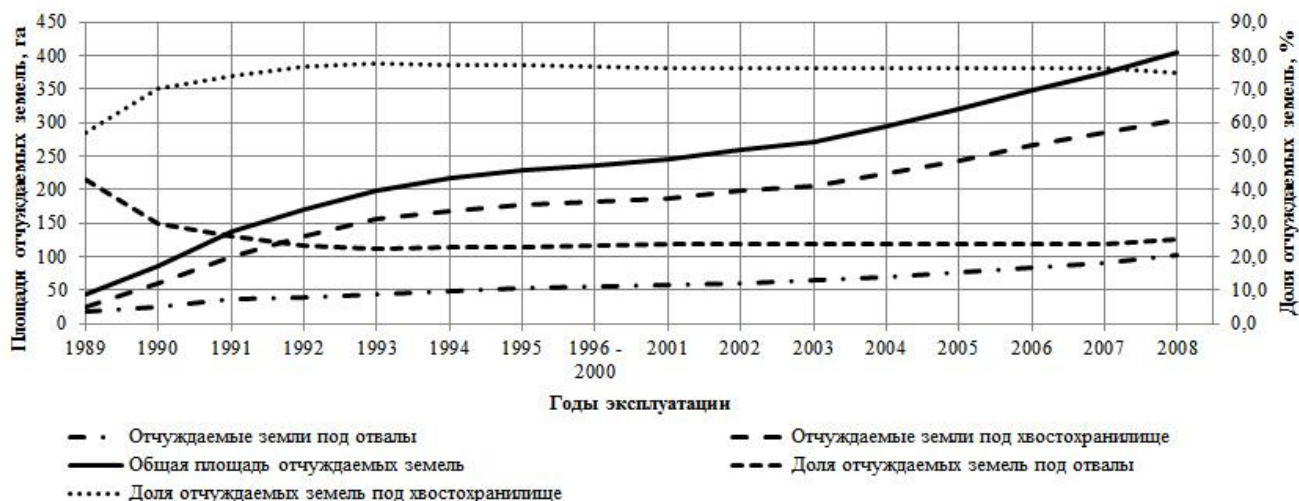


Рисунок 1.7 – Динамика отчуждения земель под отвалы и хвостохранилище Жирекенского ГОКа [47]

На рисунке 1.7 видно, что площадь отчуждаемых земель под хвостохранилище при складировании пульпообразных отходов по традиционной технологии в три раза превышает площадь отчуждаемых земель под отвалы.

Традиционному способу складирования пульпообразных отходов помимо больших занимаемых площадей присущи следующие недостатки:

- высокие эксплуатационные затраты;
- проблемы пыления;
- риски прорыва дамбы.

### 1.3.2 Складирование отходов гидроциклонов

Как описывалось ранее, тяжелую фракцию (пески) гидроциклона складировать возле дамбы хвостохранилища, тонкозернистую фракцию (слив) складировать в долину хвостохранилища.

Примером тому может служить медно-молибденовое месторождение Cerro Verde в Перу (рисунок 1.8). Характеристика площадки строительства хвостохранилища представлена в таблице 1.9. Хвостохранилище состоит из пионерной зональной каменно-набросной дамбы высотой 85 м, при этом в высоту 260 м уложены пески гидроциклонов, уплотненные 6-тонным буксируемым гладким барабаном, вибрационными уплотнителями и самоходными катками с гладкими барабанами от 13 до 14 тонн, для достижения 98 % плотности сухих песков (ASTM D698). Основание пионерной дамбы находится на высоте 2400 м над уровнем моря [48].



Рисунок 1.8 – Общий вид хвостохранилища Cerro Verde, Перу [48]

Таблица 1.9 – Характеристика площадки строительства хвостохранилища Cerro Verde (Перу)

Рельеф местности	Крутой, горный
Перепад высот над уровнем моря, м	2300–3000
Сейсмичность района строительства	Высокая
Температурный диапазон, °С	10–24

В странах с жарким климатом возможно складирование отходов гидроциклона в отвал вскрышных пород после их естественного осушения, примером тому может служить железорудный ГОК Serra Azul Mine в Бразилии (рисунок 1.9) [32].

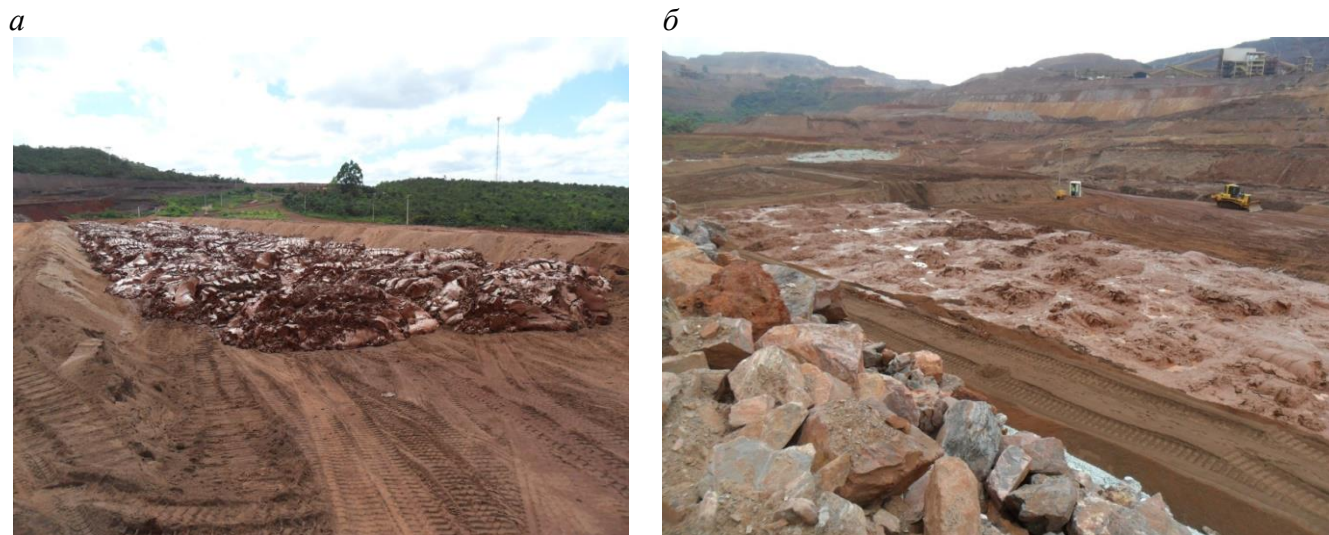


Рисунок 1.9 – Складирование отходов гидроциклона в отвале вскрышных пород, железорудный ГОК Serra Azul Mine, Бразилия [32]:

*a* – складирование песка; *б* – складирование слива гидроциклона

Складированию отходов гидроциклона присущи следующие недостатки:

- необходимо строительство пионерной дамбы;
- пыление хвостов;
- требуется реализация системы сбора и очистки воды;
- сложность складирования в дождливый период.

### 1.3.3 Складирование пастообразных отходов

Идею размещения отходов горно-обогатительных комбинатов в пастообразном состоянии выдвинул E.I. Robinsky ещё в 1973 году. Впервые ее применили на фабрике Kidd Creek (Онтарио, Канада), производительностью в 4,5 млн т/год. Запасы месторождения позволяют эксплуатировать фабрику до 2023 года. Тоннаж отходов при этом должен составить 130 млн т [49, 50].

При развитии фабрики возник вопрос: расширять хвостохранилище с наращиванием дамб или остановиться на конусном складировании отходов, сгущенных до пастообразного состояния, в существующее хвостохранилище.

Причины, повлиявшие на выбор конусного складирования пастообразных отходов обогащения:

- слабость грунтов и повышенный риск при эксплуатации высоких дамб;
- отсутствие материала для наращивания дамбы в районе её строительства и чрезмерная дороговизна транспортирования грунтов в случае возведения дамбы;
- чрезвычайно сжатый период для строительства дамбы в условиях сурового климата;
- ограниченность района расположения хвостохранилища, окруженного с трех сторон реками.

Разгрузка отходов с концентрацией 65 % твердого производилась с высоты 25 м в конус диаметром 1,2 км (рисунок 1.10) [50].

Ещё один практический опыт конусного складирования пастообразных отходов показывает компания Barrick в Bulyanhulu на золотых приисках в Танзании, осуществляющая свою деятельность с 2000 года.

Здесь пастообразный материал с концентрацией твердого 75 % транспортируют двумя насосными станциями, которые оснащены двумя клапан-контролируемыми насосами Putzmeister HSP 25100 общей мощностью 315 кВт, перемешивают их с цементом и перекачивают на расстояние 2,5 км со скоростью 80 м<sup>3</sup>/ч материала. Процесс откачки требует давления 80 бар [44].



Рисунок 1.10 – Конусное складирование пастообразных отходов на фабрике Kidd Creek, Канада [50]

Пастообразные отходы наносят на полигон, который охватывает площадь около  $0,7 \text{ км}^2$ . С помощью нескольких распределительных башен высотой 12 м пастообразный материал равномерно распределяется по участку с образованием конуса (рисунок 1.11) [44].



Рисунок 1.11 – Конусное складирование пастообразных отходов на отдельном полигоне, Barrick, Танзания [44]

После недельного складирования цементированные отходы удаляют с полигона и складировывают в штабели [44].

ЗИФ месторождения Кубака (Магаданская область) [33, 51] осуществляет складирование пастообразных отходов на пляж хвостохранилища (рисунок 1.12).



При данной технологии из возможных вариантов доставки хвостов в хвостохранилище оптимальным является гидротранспорт по пульпопроводу. Перед складированием пульпа сгущается до необходимой консистенции (до 70 % твердого) в пастовом сгустителе. Сгущенный продукт направляется в ложе хвостохранилища, слив – на ЗИФ в качестве оборотной воды.

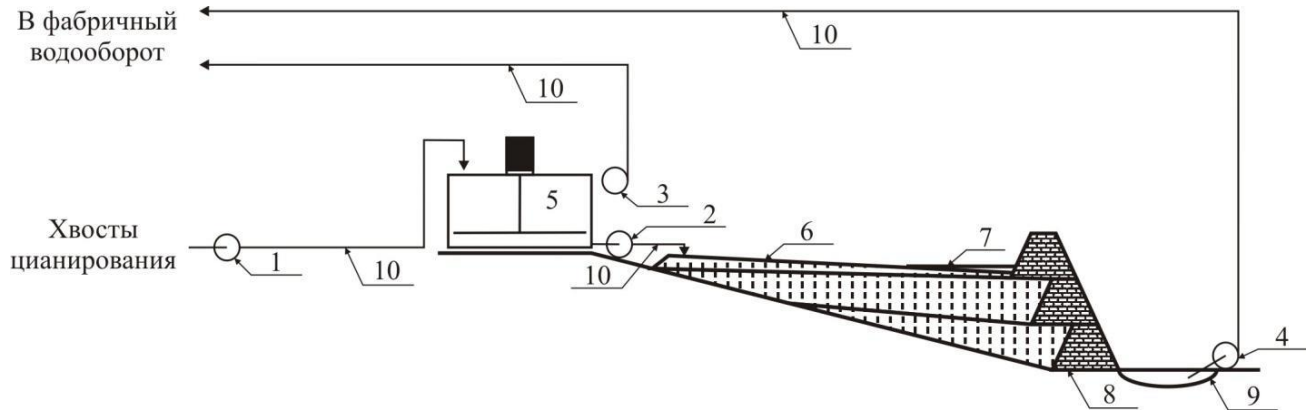


Рисунок 1.12 – Схема складирования пастообразных отходов цианирования

ЗИФ месторождения Кубака [33, 51]:

1, 2 – пульповые насосы; 3, 4 – насосы оборотного водоснабжения фабрики; 5 – сгуститель;  
6 – хвостовой пляж; 7 – осветленная вода; 8 – фильтрующая дамба; 9 – пруд-накопитель  
осветленных вод; 10 – трубопроводы

Среди преимуществ складирования пастообразных отходов можно отметить следующие [13, 17, 52–64]:

- не требуется большой пионерной дамбы, что значительно снижает уровень капитальных затрат;
- практически исключены проблемы неустойчивости высоких дамб;
- складирование пастообразных отходов требует значительно меньших объемов хранилища;
- отсутствует фильтрация воды из хранилища в почву;
- не требуется осветление и отвод оборотной воды из хранилища отходов, что приводит к сокращению объемов электроэнергии, потребляемой насосными агрегатами гидротранспортных систем оборотного водоснабжения;

- затраты на рекультивацию значительно ниже, чем для традиционных хвостохранилищ с прудком воды. Рекультивацию можно вести параллельно с эксплуатацией, а рекультивируемое хвостохранилище резко снизит затраты при ликвидации горного предприятия;

- отходы представлены сплошной гомогенной массой, что снижает окисление и минимизирует проблему кислых стоков. Это особенно актуально для серосодержащих отходов;

- модификация свойств отходов путем добавления связующих веществ (бентонита) повышает статическую и динамическую стабильность, уменьшает вероятность эрозии и утечек;

- пастообразные отходы при высыхании исключают пыление глинистых и пылеватых фракций отходов из хранилища;

- хвостохранилища из пастообразных отходов значительно более безопасны, чем традиционные, особенно в сейсмоопасных районах.

При разработке месторождения подземным способом пастообразные отходы применяются, в основном, в качестве закладочного материала [12, 65–67].

### **1.3.4 Складирование «сухих» отходов**

Складирование «сухих» отходов обогащения, как показывает практика (таблица 1.5), производят на специально выделенных площадях автомобильным транспортом либо мобильными конвейерами. При использовании автотранспорта в процессе складирования производят следующие виды работ: разгрузку, планировку и уплотнение (рисунок 1.13).

При использовании мобильных конвейеров складирование «сухих» отходов производят непосредственно в насыпи (рисунок 1.14).

При складировании отходов обогащения в «сухом» виде выявлены существенные недостатки:

- энергозатратность;
- высокие эксплуатационные расходы;

- ограниченная производительность;
- пыление;
- сложность складирования в дождливый период.



Рисунок 1.13 – Складирование «сухих» отходов обогащения при помощи автотранспорта на золоторудном месторождении Pogo Mine, Аляска [68]:

1 – разгрузка «сухих» отходов; 2 – планировка «сухих» отходов; 3 – уплотнение «сухих» отходов; 4 – общий вид площадки складирования «сухих» отходов



Рисунок 1.14 – Складирование «сухих» отходов мобильный конвейером, La Coira, Атаками, Чили [69]

Общий вид площадки складирования «сухих» отходов на золоторудном месторождении *La Coipa* (Атаками, Чили) представлен на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Площадка складирования «сухих» отходов на золоторудном месторождении *La Coipa*, Атаками, Чили [70]

Встречается и совместное складирование промышленных отходов с породами вскрыши в отвал, оставляя доступ к техногенному минеральному сырью. Так, в работах И.А. Пыталева [71, 72] экономически обоснована целесообразность формирования отвала горных пород в виде емкости для размещения промышленных отходов и произведен расчет ценности выработанного карьерного пространства и отвалов вскрышных пород ряда месторождений Челябинской и Оренбургской областей при размещении в них промышленных отходов. В данном случае промышленные отходы представлены в виде сталеплавильных шлаков.

## 1.4 Анализ хвостохранилищ по содержанию техногенного минерального сырья

Отходы обогащения по вещественному составу близки к бедным рудам и, следовательно, могут рассматриваться как потенциальный сырьевой источник. Дальнейшее образование и накопление отходов обостряют задачу природопользования и требуют решения проблем повышения комплексности использования природных ресурсов и утилизации отходов [73].

Рассмотрим данные о запасах и составе хвостохранилищ на примере Уральских горно-обогатительных фабрик, приведенные в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Запасы и состав хвостохранилищ Уральских горно-обогатительных фабрик [73, 74]

Хвостохранилище	Ориентировочные запасы, млн т	Содержание основных элементов:					
		Медь, % (тыс. т)	Цинк, % (тыс. т)	Сера, % (тыс. т)	Железо, % (тыс. т)	Золото, г/т (т)	Серебро, г/т (т)
Гайское	40	0,3 (120)	0,2 (92)	26,6 (10640)	13,9 (5548)	0,7 (32)	4 (160)
Бурибаевское	5,5	0,5 (24,8)	0,2 (11,5)	25,6 (1412,6)	23,1 (1276,2)	1,2 (6,6)	10,3 (56,8)
Учалинское	40,8	0,2 (89,7)	0,6 (257)	23,1 (6306,3)	29,5 (8050,8)	0,6 (16,4)	8,5 (232,1)
Сибайское	18,5	0,2 (34,4)	0,5 (89,4)	23,9 (3646,4)	31,2 (5899,6)	0,9 (13,8)	19 (344)
Среднеуральское	32	0,3 (96)	0,5 (160)	27,3 (8736)	29,5 (9440)	0,7 (22,4)	13 (416)
Кировградское	30	0,2 (60)	0,2 (60)	4,2 (1260)	13,1 (3930)	0,4 (12)	7,2 (216)
Красноуральское	26	0,3 (78)	0,3 (78)	12 (3120)	-	0,4 (10,4)	4,9 (127,4)
Карабашское	9,1	0,3 (27,3)	0,3 (27,3)	27,7 (2520,7)	-	-	-
Турьинское	13,3	0,1 (13,3)	-	1,2 (159,6)	18,6 (2473,8)	-	-
Пышминское	4,6	0,1 (4,6)	-	3 (138)	-	-	-
Высокогорское	30	0,2 (60)	0,1 (30)	2,5 (750)	11,5 (3450)	0,02 (0,6)	1,1 (33)

Запасы и состав полезного компонента в хвостохранилищах горно-обогатительных фабрик Северной Осетии представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Запасы и состав полезного компонента в хвостохранилищах горно-обогатительных фабрик Северной Осетии [75]

Хвостохранилище	Площадь по отводу земли, га	Ориентировочные запасы, млн т	Характеристика хвостов		
			Металл	Содержание, %	Запасы, т
Унальское	61	2,6	свинец	0,21	5460
			цинк	0,32	8320
			медь	0,1	2600
			железо	6,2	161200
			титан	0,18	4680
			марганец	0,16	4160
			серебро	4,2 г/т	10,92
Фиагдонское	56	2,4	свинец	0,19	4560
			цинк	0,35	8400
			медь	0,12	2880
			железо	6,8	163200
			титан	0,16	3840
			марганец	0,14	3360
			серебро	4,0 г/т	9,6
"Электроцинк"	30	3,1	свинец	0,6	18840
			цинк	0,8	34560
			медь	1,1	34540
			железо	20,6	646840
			титан	1,2	37680
			марганец	0,19	5966
			серебро	3,5 г/т	10,99

## 1.5 Выводы

Анализ существующей техники и технологии по производству, транспортированию и складированию отходов обогащения позволяет сделать следующие выводы.

1. Практика проектирования и эксплуатации новых обогатительных фабрик за рубежом характеризуется повсеместным применением водооборота с предварительным сгущением хвостов перед их складированием.

2. Надежность работы современных сгустителей большой глубины осаждения позволяет производить пастообразный продукт при высокой производительности до 35 млн т руды в год с удельной нагрузкой, приближающейся к 1 т/м<sup>2</sup>·ч, занимающий небольшую площадь.

3. Складирование пастообразных отходов имеет ряд экологических и геотехнических преимуществ, позволяющих прогнозировать расширение области применения этой технологии, что подтверждает актуальность данной работы.

4. В странах с жестким природоохранным законодательством, в засушливых районах или в регионах с суровым климатом, затрудняющим получение оборотной воды, экономически выгодно складировать отходы, сгущенные до пастообразного состояния.

Для дальнейшего обоснования параметров технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения, предварительно сгущенных до пастообразного состояния, необходимо проведение исследований на растекание пастообразных отходов, их консолидацию и устойчивость к воздействию дождевых осадков.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ

В данной главе представлены результаты следующих проведенных исследований:

- растекание пастообразных отходов обогащения;
- определение угла откоса пастообразных отходов;
- консолидация пастообразных отходов;
- устойчивость пастообразных отходов к размыву дождевыми осадками.

Проанализирована возможность перехода действующих горно-обогатительных предприятий на сгущение отходов до пастообразного состояния.

### 2.1 Объект исследования

В качестве исследуемого материала применялись отходы золотосодержащих руд Боголюбовского месторождения, расположенного в Мотыгинском районе Красноярского края. Плотность материала составляла 2,9 т/м<sup>3</sup>.

Гранулометрический состав исследуемого материала представлен в таблице 2.1, химический состав – в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Гранулометрический состав хвостов Боголюбовского месторождения

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 2.2 – Химический состав хвостов Боголюбовского месторождения

Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
SiO <sub>2</sub>	54,101	Pb	0,006
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,654	Zn	0,015
CaO	0,201	Ba	0,036
Na <sub>2</sub> O	0,323	Ni	0,009
K <sub>2</sub> O	3,255	Co	0,004
MgO	1,311	Y	0,003
MnO	0,110	W	-
TiO <sub>2</sub>	1,131	Sr	0,005
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,206	Sn	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,027	Sc	0,034
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015	Sb	0,012
Fe <sub>общ</sub>	8,519	Mo	-
S <sub>общ</sub>	4,369	Li	0,009
As	0,428	La	0,004
Cd	-	Be	-
Cu	0,010		

## 2.2 Методика проведения исследований

*Исследования по растеканию пастообразных отходов* включали следующие виды работ.

1. Сгущение исследуемого материала в смесителе до пастообразного состояния следующих плотностей – таблица 2.3.

Таблица 2.3 – Плотность исследуемых ПО

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

2. Наблюдение за растеканием образцов ПО цилиндрической формы с первоначальной площадью в основании ( $S$ ) 9,6 см<sup>2</sup>, исходной высотой ( $h$ ) 2, 4, 6, 8 см, фиксирование высоты образца в течение времени ( $t$ ) от 5 до 40 мин с шагом 5 мин, а также площади при помощи фотокамеры.

3. Определение площади образцов ПО в основании при обработке фотографий программным пакетом AutoCAD (рисунок 2.1).

4. По результатам растекания образцов ПО производилось вычисление угла откоса ПО.

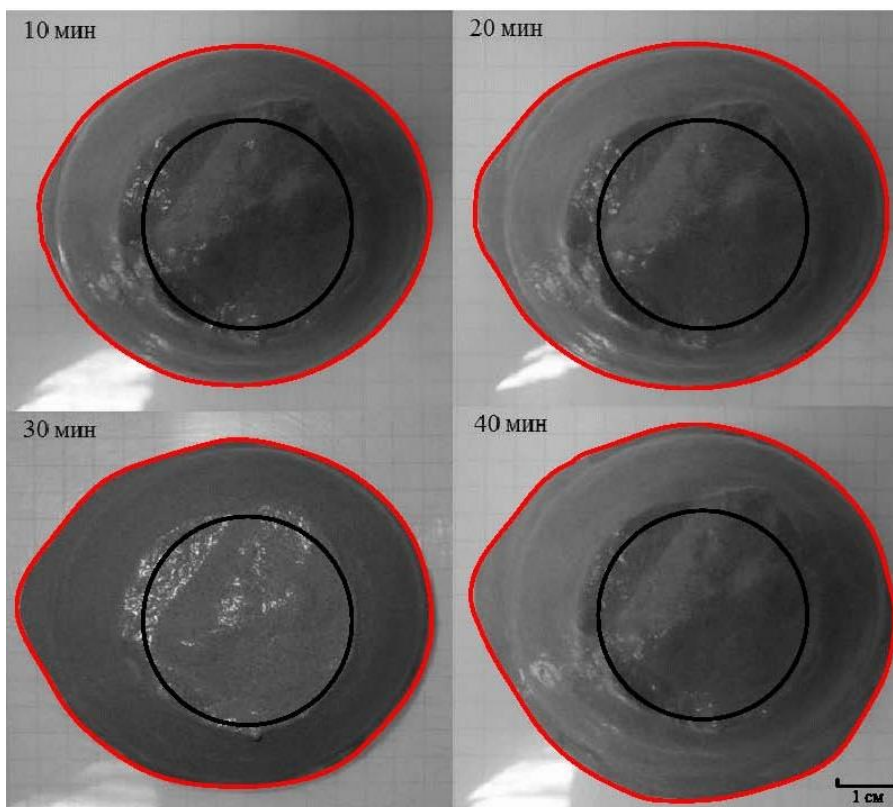


Рисунок 2.1 – Определение площади образцов ПО при растекании в течение времени: черный контур – исходная площадь образца в основании  $9,6 \text{ см}^2$ ; красный контур – площадь образца в основании при растекании в течение времени: 10 мин –  $29,6 \pm 0,2 \text{ см}^2$ ; 20 мин –  $30,1 \pm 0,2 \text{ см}^2$ ; 30 мин –  $30,3 \pm 0,1 \text{ см}^2$ ; 40 мин –  $30,5 \pm 0,1 \text{ см}^2$

После чего рассматривалась динамика изменения угла откоса ПО при растекании, уплотнении [76] и воздействии дождевых осадков. Для этого исследовано влияние плотности и угла откоса ПО на устойчивость поверхности ПО, в сухом состоянии, к размыву водой. Ход эксперимента:

- нанесение исследуемого пастообразного материала на пластинку площадью  $175 \text{ см}^2$ ;
- фиксирование полученных образцов под следующими углами наклона к горизонту: 5, 10, 15, 20, 25 и 30 град.;

- измерение массы исследуемых образцов в сухом состоянии (без учета массы пластинки) до и после размыва поверхности ПО водой в количестве среднемесячной нормы осадков в летний период по Красноярскому краю.

### 2.3 Обработка результатов исследования растекания пастообразных отходов

По полученным результатам исследования растекания образцов ПО, представленных в приложении А, были построены следующие зависимости (рисунки 2.2–2.4).

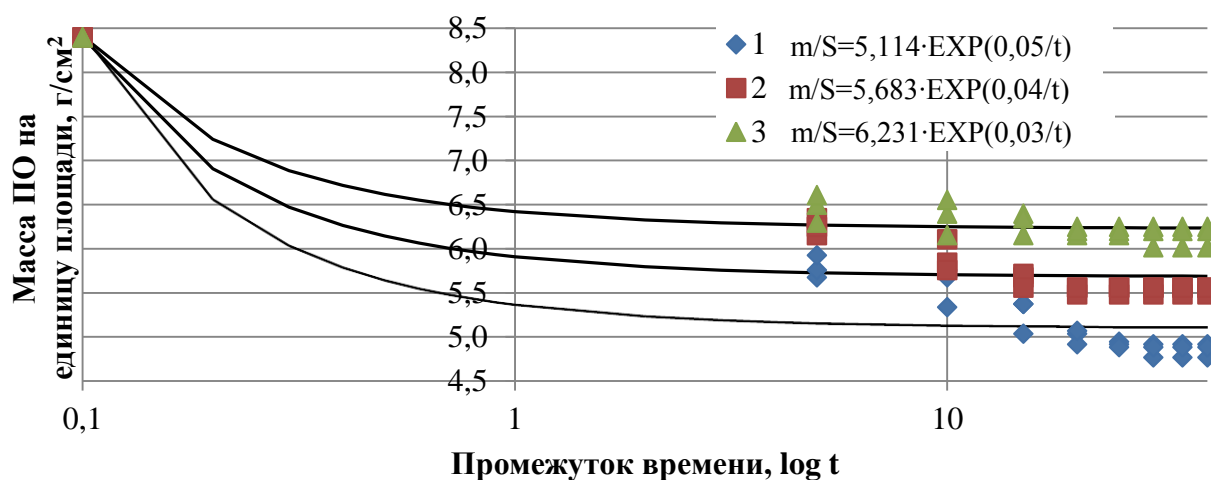


Рисунок 2.2 – Распределение массы ПО на единицу площади с течением времени при плотности ПО: 1 – 1,95; 2 – 2,00; 3 – 2,10 т/м<sup>3</sup>

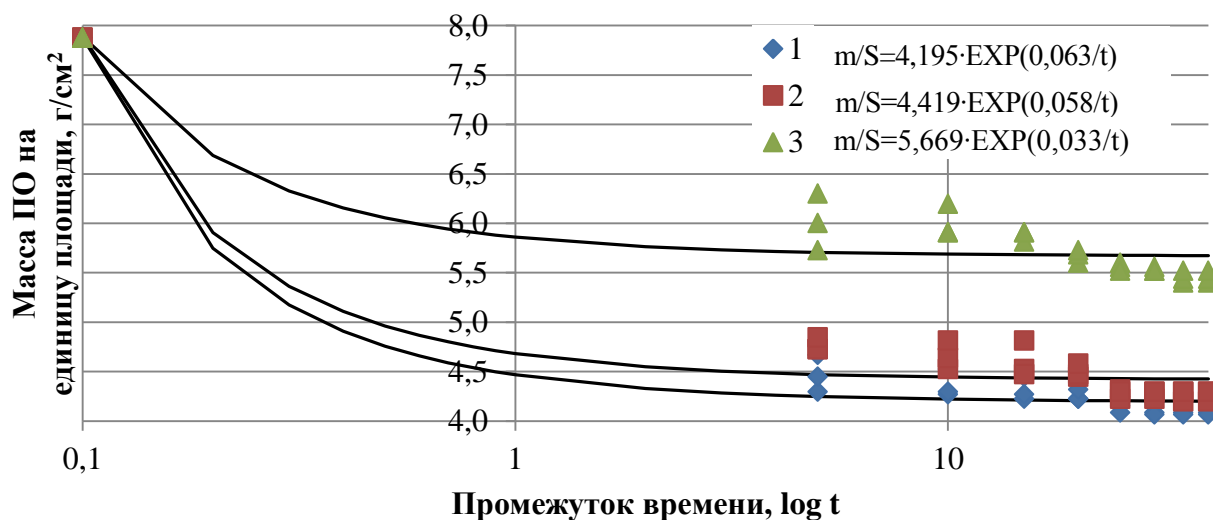


Рисунок 2.3 – Распределение массы ПО на единицу площади с течением времени при плотности ПО: 1 – 1,80; 2 – 1,85; 3 – 1,90 т/м<sup>3</sup>

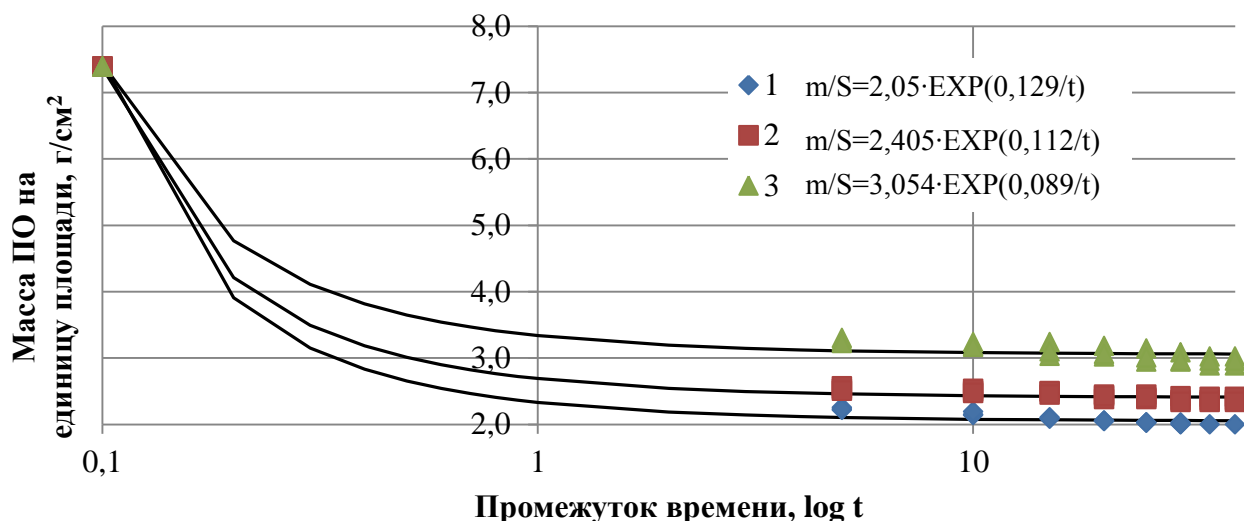


Рисунок 2.4 – Распределение массы ПО на единицу площади с течением времени при плотности ПО: 1 – 1,65; 2 – 1,70; 3 – 1,75 т/м<sup>3</sup>

Как видно из графиков (рисунки 2.2–2.4), снижение плотности образцов ПО приводит к уменьшению массовой концентрации анализируемых образцов на единицу площади.

Далее были определены статистические характеристики полученных зависимостей (рисунки 2.2–2.4), которые представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Статистические характеристики по графикам

Показатель	Значение	
	X	Y
Коэффициент корреляции	0,93–0,98	
Математическое ожидание	20,01	1,83–6,49
Дисперсия	172,62	0,50–3,46
Среднеквадратическое отклонение	13,14	0,75–10,88
Коэффициент вариации	65,66	12,59–101,54
Асимметрия	0,00	1,92–2,33
Эксцесс	-1,36	2,38–3,58
	$Y_{\text{теор}}$	
Среднее значение	1,82–6,48	
Остаточная дисперсия	0,00–0,12	
Критерий Фишера	10,11–705,38	

Статистическая обработка результатов исследования показала, что с достоверностью 95 % коэффициенты X и Y в зависимостях имеют величины

близкие к  $Y_{\text{теор}}$ , следовательно, справедливо их использование в расчетной модели.

На основе проведенных исследований по растеканию образцов ПО был получен общий вид уравнения распределения массовой концентрации ПО на единицу площади в зависимости от времени растекания и от плотности ПО:

$$m/S = a \cdot \text{EXP}\left(\frac{b}{t}\right), \text{ г/см}^2, \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса ПО, г;  $S$  – площадь растекания ПО, см<sup>2</sup>;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от плотности ПО;  $t$  – время растекания ПО, мин.

Аппроксимация эмпирических коэффициентов полученных зависимостей показала, что для расчетов можно использовать следующие значения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$a = 9,77\rho_{\text{ПО}} - 13,79, \quad (2.2)$$

$$b = 0,48 - 0,22\rho_{\text{ПО}}, \quad (2.3)$$

где  $\rho_{\text{ПО}}$  – плотность ПО, т/м<sup>3</sup>.

Тогда общий вид уравнения распределения массовой концентрации ПО на единицу площади в зависимости от времени растекания и плотности ПО будет иметь вид:

$$m/S = (9,77 \cdot \rho_{\text{ПО}} - 13,79) \cdot \text{EXP}\left(\frac{0,48 - 0,22 \cdot \rho_{\text{ПО}}}{t}\right), \text{ г/см}^2. \quad (2.4)$$

Полученное уравнение (2.4) распределения массовой концентрации ПО на единицу площади действительно при высоте слоя ПО, равном 4 см.

При увеличении исходной высоты образца ПО происходит увеличение массовой концентрации ПО на единицу площади относительно данных, с высотой образца равной 4 см, по следующей зависимости (рисунок 2.5).

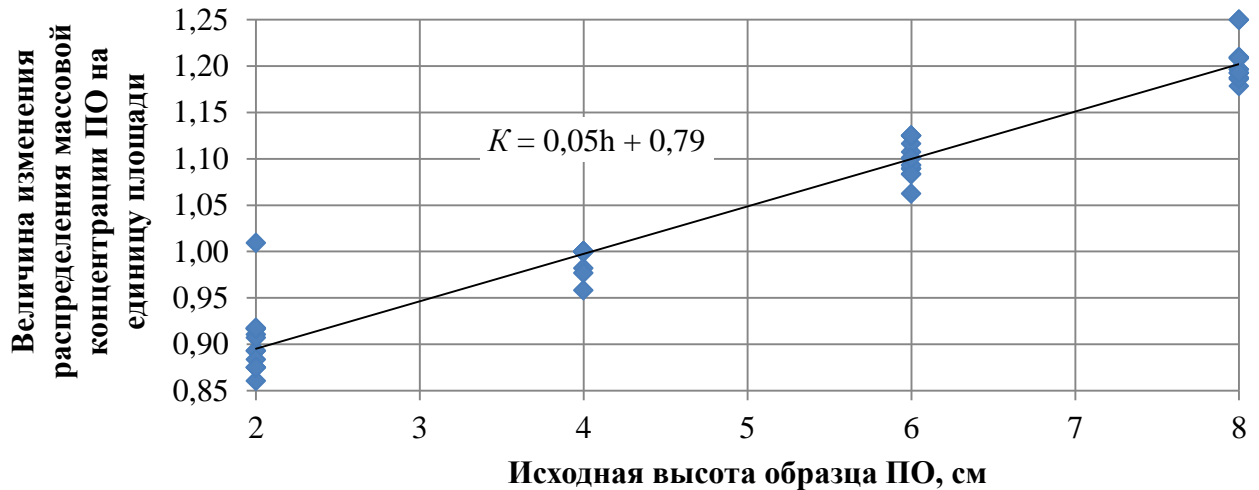


Рисунок 2.5 – Изменение массовой концентрации ПО на единицу площади при варьировании исходной высоты образца ПО

Тогда в модель распределения массовой концентрации ПО на единицу площади (2.4) введем эмпирический коэффициент  $K$  (рисунок 2.5), зависящий от исходной высоты образца ПО, полученный с коэффициентом корреляции 0,95:

$$m/S = (9,77 \cdot \rho_{ПО} - 13,79) \cdot \text{EXP}\left(\frac{0,48 - 0,22 \cdot \rho_{ПО}}{t}\right) \cdot (0,05h + 0,79), \text{ г/см}^2, \quad (2.5)$$

где  $h$  – исходная высота образца ПО, см.

Полученную расчетную формулу (2.5) можно использовать для определения площади изымаемых земель под необходимый объем складирования ПО.

На рисунке 2.6 представлен график модели (2.5).

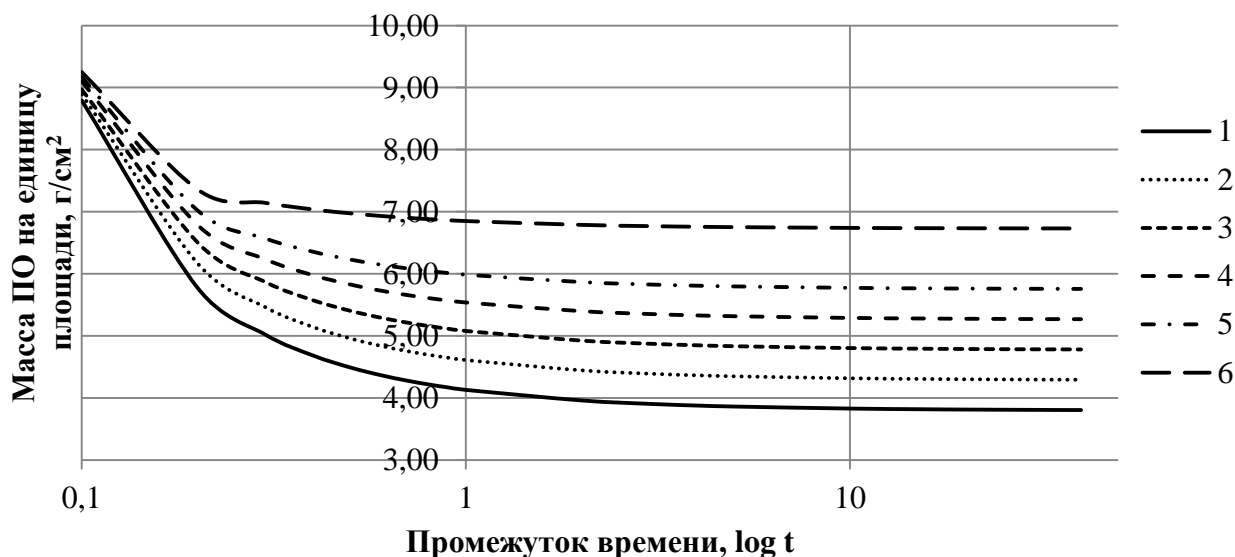


Рисунок 2.6 – Распределение массы ПО на единицу площади при исходной высоте образца 4 см и плотности: 1 – 1,80; 2 – 1,85; 3 – 1,90; 4 – 1,95; 5 – 2,00; 6 – 2,10 т/м³

График на рисунке 2.6 показывает, что при увеличении степени сгущения ПО (содержания твердого компонента) происходит увеличение массовой концентрации ПО на единицу площади [77].

Для перехода от модели к натурной системе воспользуемся критерием подобия Ньютона:

$$Ne = \frac{\frac{F_n}{F_m}}{\frac{\rho_n \cdot l_n^2 \cdot \left(\frac{l_n}{t_n}\right)^2}{\rho_m \cdot l_m^2 \cdot \left(\frac{l_m}{t_m}\right)^2}} = \frac{F}{\rho l^2 \left(\frac{l}{t}\right)^2} = idem, \quad (2.6)$$

где  $F$  – отношение сил давления ПО, Н;  $\rho$  – отношение плотностей ПО, т/м³;  $l$  – отношение линейных размеров, м;  $t$  – сходственные моменты времени, с.

Согласно уравнению (2.6) две системы будут подобными в том случае, если их любые две соответствующие обобщенные координаты для любых сходственных моментов времени пропорциональны, т.е. две системы подобны, если  $t_n$  и  $t_m$  – сходственные моменты времени [78].

Определим сходственный момент времени геометрически подобных систем со следующими исходными данными (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Исходные данные для расчета сходственного момента времени геометрически подобных систем

Показатель	В модели	В натуральных условиях
Масса, т	$75,6 \cdot 10^{-6}$	75,6
Плотность, т/м <sup>3</sup>	2,0	2,0
Линейный размер, м	$4 \cdot 10^{-2}$	4
Сила тяжести, Н	$75,6 \cdot 10^{-2}$	$75,6 \cdot 10^4$
Момент времени, с	600	-

Так, сходственный момент времени для натуральных условий:

$$t_n = \sqrt{\frac{F_m \cdot t_m^2 \cdot \rho_n \cdot l_n^4}{\rho_m \cdot l_m^4 \cdot F_n}} = \sqrt{\frac{75,6 \cdot 10^{-2} \cdot 600^2 \cdot 2,0 \cdot 4^4}{2,0 \cdot (4 \cdot 10^{-2})^4 \cdot 75,6 \cdot 10^4}} = 6000 \text{ с}. \quad (2.7)$$

Таким образом, в данный сходственный момент времени критерии подобия Ньютона в модели и натуральных условиях будут равны, что позволяет сделать вывод о возможности перехода от данных, полученных в результате моделирования, к натурным условиям.

## 2.4 Определение угла откоса пастообразных отходов при складировании

Важным параметром, характеризующим свойства ПО, при складировании является угол откоса при растекании.

Угол откоса ПО при растекании определяется как угол конуса и равен [79]:

$$\beta = \arctg \frac{1,77h}{\sqrt{S}}, \text{ град}, \quad (2.8)$$



где  $S$  – площадь основания конуса ПО,  $m^2$ ;  $h$  – высота конуса ПО, м.

На основании данных, полученных при моделировании процесса растекания образцов ПО, по формуле (2.8) определены углы их отколов, результаты представлены в виде зависимостей на рисунке 2.7.

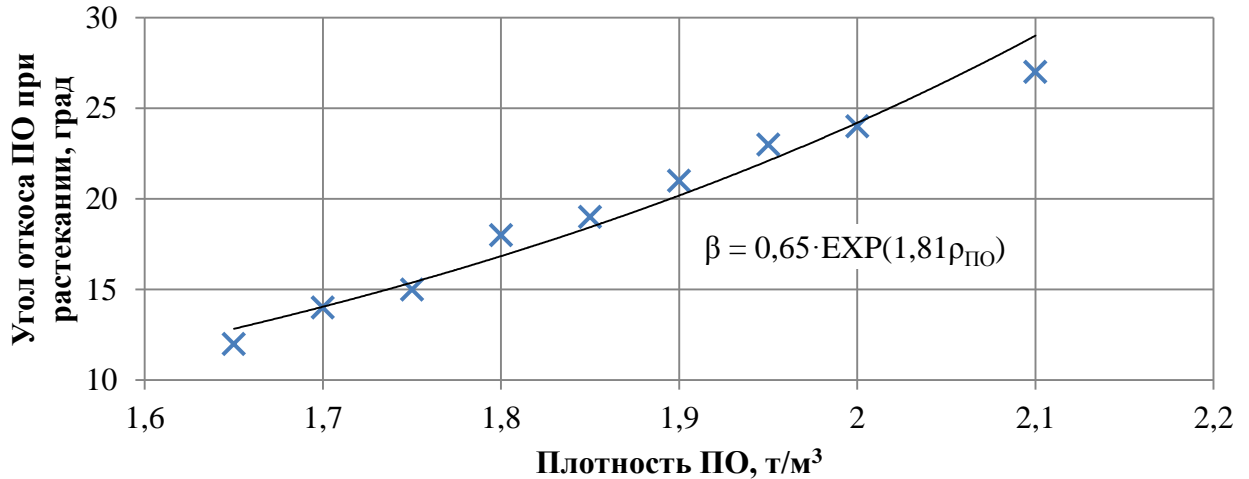


Рисунок 2.7 – Зависимость угла откоса ПО при растекании от их плотности

Как видно из графика на рисунке 2.7, увеличение плотности образцов ПО приводит к возрастанию угла откоса ПО при растекании по экспоненциальной зависимости.

Статистические характеристики полученной зависимости (рисунок 2.7) представлены в таблице 2.6. Согласно полученным результатам целесообразно предположить, что с достоверностью 95 % коэффициенты  $X$  и  $Y$  имеют величины, близкие к  $Y_{теор}$ , следовательно, справедливо их использование в расчетной модели.

Уравнение зависимости угла откоса ПО при растекании от плотности, как видно из графика (рисунок 2.7), имеет следующий вид:

$$\beta = 0,65 \cdot EXP(1,81 \cdot \rho_{ПО}), \text{ град}, \quad (2.8)$$

Результаты расчета углов откоса ПО при растекании по модели (2.8) представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.6 – Статистические характеристики по графику рисунка 2.7

Показатель	Значение	
Коэффициент корреляции	0,95	
	X	Y
Математическое ожидание	1,86	19,22
Дисперсия	0,02	24,94
Среднеквадратическое отклонение	0,15	4,99
Коэффициент вариации	7,91	25,98
Асимметрия	0,17	0,04
Эксцесс	-1,42	-1,54
	$Y_{\text{теор}}$	
Среднее значение	19,23	
Остаточная дисперсия	1,15	
Критерий Фишера	21,76	

Таблица 2.7 – Расчётные углы откоса ПО при растекании по модели (2.8)

Параметр	Величина								
	Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0
Плотность пастообразных отходов, т/м <sup>3</sup>	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10
Угол откоса ПО при растекании, град	12,8	14,1	15,4	16,8	18,4	20,2	22,1	24,2	29,0

В целом полученные результаты позволяют заключить, что угол откоса ПО при растекании зависит от содержания твердого компонента в ПО, например, после увеличения содержания твердого компонента в ПО от 60 до 70 % угол откоса ПО при растекании изменится с 15,1 до 25,5 град.

## 2.5 Исследование процесса уплотнения пастообразных отходов

Исследованиями в области уплотнения отходов (хвостов) обогащения и гидромеханизации занимались Г.Т. Сарвин [33, 80], Б.А. Волнин [81], И.В. Красный [82], Н.А. Филиппов [83], О.П. Смирнов [84] и другие [85–87]. Исследователи изучали уплотнение грунтов с неразрушенной структурой определенного минералогического и гранулометрического состава. Однако предлагаемые данными авторами методики расчета объема водонасыщенных илисто-глинистых хвостов не могут быть использованы в технологических

решениях по складированию ПО в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, так как в представленных работах не рассматривается влияние флокулянта, используемого для интенсификации процесса пастообразования, на изменение объема материала. Кроме того, существующие на сегодняшний день методики расчета не учитывают влияния мощности складирования ПО, времени уплотнения и фильтрационных свойств основания. Помимо этого, большинство формул очень громоздки и неудобны для расчета, а также требуют значительного объема исходной информации.

Из теоретических основ известно, что в процессе осаждения частиц в ПО, как и в отстойнике при осаждении тонкодисперсных фракций, происходит постепенное увеличение их концентрации в нижних слоях, которые с течением времени под собственным весом или внешней нагрузкой уплотняются. Вся нагрузка в ПО в начальный период передается на поры и воду. При малых величинах коэффициента фильтрации процесс отжатия воды происходит медленно, а следовательно, медленно увеличивается нагрузка на грунтовый скелет, что в свою очередь приводит к медленному развитию связей между частицами. С течением времени нагрузка передается на грунтовый скелет, поровое давление падает, происходит уплотнение осадка [88].

Уплотнение обычно происходит до наступления состояния гидростатического равновесия [89], т.е. до отжатия из осадка всей излишней по отношению к данной нагрузке воды. При гидростатическом состоянии в песчаном осадке вся нагрузка воспринимается непосредственно его скелетом, а в глинистом – гидратными коллоидными оболочками – пленками, покрывающими илисто-глинистые частицы. Эти гидратные оболочки противодействуют увеличению плотности осадка под действием сжимающих сил и уравнивают последние. Толщина глинистых оболочек зависит не только от величины внешней нагрузки, а также от минералогического состава частиц, слагающих осадок, и от состава и концентрации электролитов в поровой воде [89].

В настоящей работе проведен расчет величины уплотнения ПО, т.е. изменения их объема, с использованием методики [76] направленной на нахождение изменения

объема после отжатия из ПО всей излишней по отношению к данной нагрузке воды и удаления порового пространства.

Согласно полученным результатам изменение давления по горизонтальным слоям конуса ПО от вышележащих слоев показано на рисунке 2.8.

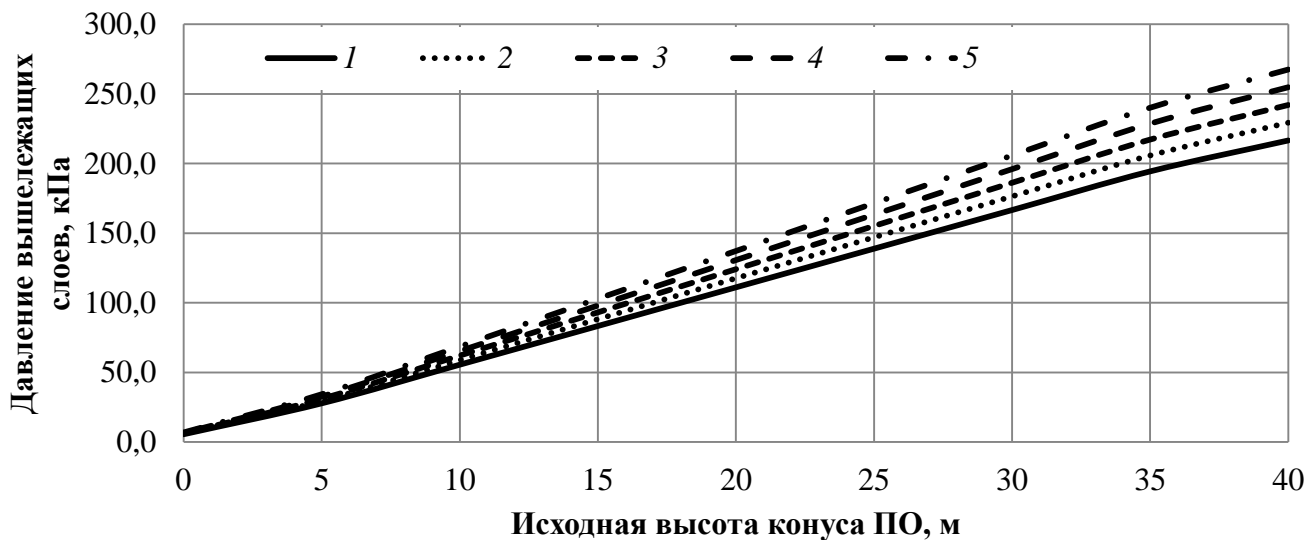


Рисунок 2.8 – Изменение давления по горизонтальным слоям конуса ПО от вышележащих слоев при плотности ПО: 1 – 1,7; 2 – 1,8; 3 – 1,9; 4 – 2,0; 5 – 2,1 т/м<sup>3</sup>

При максимальном обезвоживании горизонтальных слоев ПО и удалении порового пространства под давлением вышележащих слоев произойдет уплотнение конуса ПО и сокращение его объема (рисунок 2.9).

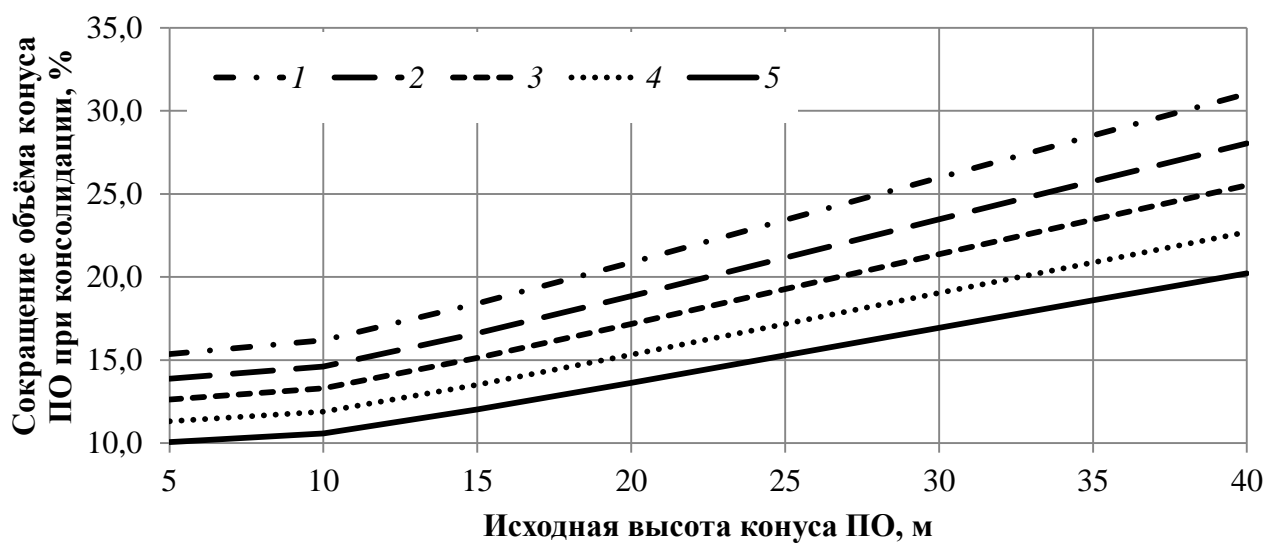


Рисунок 2.9 – Сокращение объема ПО за счет удаления порового пространства и максимального обезвоживании горизонтальных слоев конуса ПО под давлением вышележащих слоев при плотности ПО: 1 – 1,7; 2 – 1,8; 3 – 1,9; 4 – 2,0; 5 – 2,1 т/м<sup>3</sup>

Уплотнение ПО приводит к снижению высоты конуса ПО (таблица 2.8) и соответственно к выполаживанию угла откоса ПО (таблица 2.9).

Таблица 2.8 – 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

Таблица 2.9 – 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

Из результатов, представленных в таблицах 2.8-2.9, следует, что конус сформированный из ПО меньшей плотности, соответственно с меньшим углом откоса, подвержен наибольшей усадке в процессе консолидации.

Стоит отметить, что на выполаживание угла откоса ПО также могут воздействовать дождевые осадки. Поэтому далее представлено исследование влияния плотности и угла откоса ПО на их устойчивость к размыву водой.

## 2.6 Результаты исследования влияния плотности и угла откоса пастообразных отходов на их устойчивость к размыву дождевыми осадками

Результаты исследования влияния плотности и угла откоса ПО на их устойчивость к размыву дождевыми осадками представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Влияние плотности и угла откоса ПО на их устойчивость к размыву дождевыми осадками

Угол откоса (наклона пластинки), град	Плотность ПО, т/м <sup>3</sup>					
	1,9		2,0		2,1	
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>
10	115,4	115,2	98,6	98,3	105,2	105,1
10	95,6	95,2	130,1	129,6	112,5	112,3
10	124,1	123,2	114,2	113,7	107,4	107,2
15	117,2	116,1	127,4	126,5	136,1	135,6
15	120,5	119,7	114,2	113,6	124,4	123,8
15	113,7	112,4	124,8	124,2	113,3	112,5
20	104,6	102,5	97,7	96,8	91,5	90,3
20	91,8	89,9	125,3	123,7	109,1	107,8
20	118,4	116,2	101,9	100,6	96,4	95,1
25	135,0	131,0	112,6	110,3	116,9	114,6
25	116,2	112,5	106,3	104,0	123,8	121,3
25	102,3	99,0	95,8	93,6	103,3	101,2
30	110,7	101,8	98,0	91,1	115,0	109,8
30	132,8	121,5	101,2	93,7	97,6	93,7
30	104,5	95,2	117,0	108,7	116,2	110,5

Примечание: m<sub>1</sub> – масса ПО в сухом состоянии до поверхностного смыва водой, г;  
m<sub>2</sub> – масса ПО в сухом состоянии после поверхностного смыва водой, г.

Аппроксимация полученных результатов исследования представлена на рисунке 2.10, статистические характеристики полученных зависимостей (рисунок 2.10) приведены в таблице 2.11.

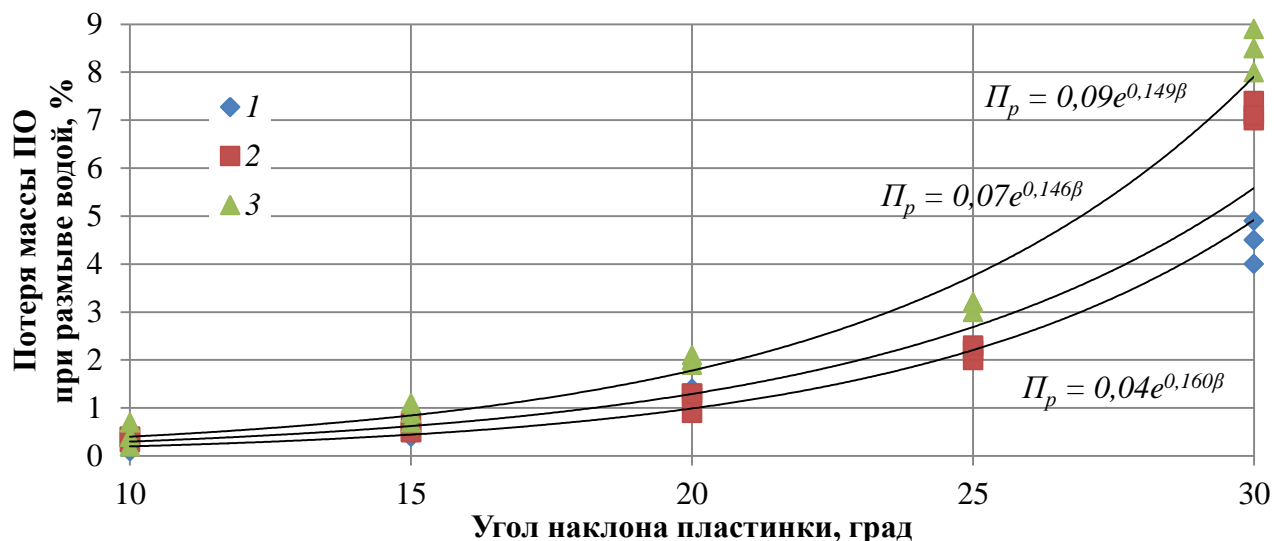


Рисунок 2.10 – Потеря массы ПО при размыве водой в зависимости от угла наклона пластины и плотности ПО: 1 – 2,1; 2 – 2; 3 – 1,9 т/м<sup>3</sup>

Таблица 2.11 – Статистические характеристики зависимостей (рисунок 2.10)

Показатель	Значение	
	X	Y
Коэффициент корреляции	0,96–0,97	
Математическое ожидание	20,00	1,69–2,99
Дисперсия	53,57	2,52–9,03
Среднеквадратическое отклонение	7,32	1,59–3,00
Коэффициент вариации	36,60	93,81–114,19
Асимметрия	0,00	0,86–1,16
Экссесс	-1,52	-1,54–(-0,44)
	$Y_{\text{теор}}$	
Среднее значение	2,1–19,23	
Остаточная дисперсия	0,22–1,15	
Критерий Фишера	10,25–40,54	

Статистическая обработка результатов исследования показала, что с достоверностью 96 % коэффициенты X и Y в зависимостях (рисунок 2.10) имеют величины близкие к  $Y_{\text{теор}}$ , следовательно, справедливо их использование в расчетной модели.

Общий вид уравнения потери массы ПО при размыве дождевыми осадками будет иметь вид:

$$P_p = a \cdot \text{EXP}(b \cdot \beta), \% \quad (2.9)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от плотности ПО,  $\text{т/м}^3$ ;  $\beta$  – угол откоса ПО, град.

Аппроксимировав эмпирические коэффициенты  $a$  и  $b$ , которые зависят от плотности ПО, получили следующие выражения:

$$a = 0,06\rho_{\text{ПО}} + 0,04, \quad (2.10)$$

$$b = 0,57 - 0,25\rho_{\text{ПО}}. \quad (2.11)$$

Уравнение множественной корреляции потери массы ПО при размыве дождевыми осадками в зависимости от плотности и угла откоса ПО будет иметь вид:

$$P_p = (0,06\rho_{\text{ПО}} + 0,04) \cdot \text{EXP}(\beta \cdot (0,57 - 0,25\rho_{\text{ПО}})), \quad (2.12)$$

где  $\rho_{\text{ПО}}$  – плотность ПО,  $\text{т/м}^3$ ;  $\beta$  – угол откоса ПО, град.

На рисунке 2.11 представлен график по формуле (2.12).

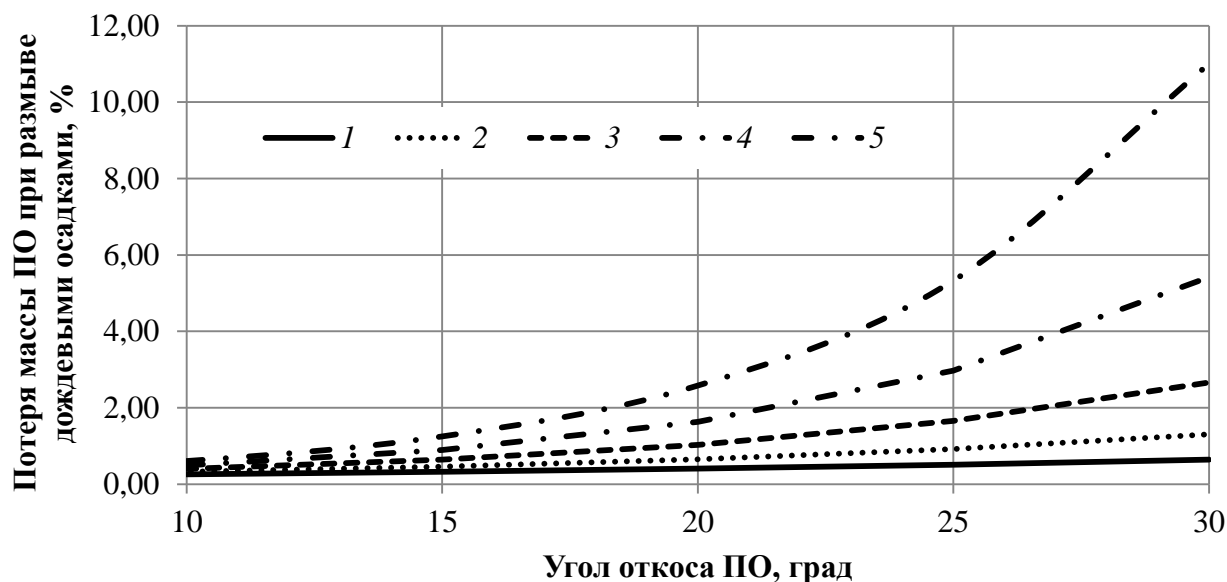


Рисунок 2.11 – Потеря массы ПО при размыве дождевыми осадками по модели (2.12), в зависимости от угла наклона пластинки и плотности ПО: 1 – 2,1; 2 – 2; 3 – 1,9; 4 – 1,8; 5 – 1,7  $\text{т/м}^3$



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

## 2.7 Анализ возможности действующих горно-обогатительных предприятий сгущать отходы до пастообразного состояния

Для оценки возможности сгущения отходов обогащения, до состояния пасты на действующих отечественных обогатительных фабриках (далее – ОФ), и фабриках стран ближнего зарубежья, был проведен анализ их технологических схем подготовки руд к обогащению, для определения выхода нижнего класса, заложенного в конечной стадии измельчения (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Выход нижнего класса в конечной стадии измельчения некоторых обогатительных фабрик [90]

№	Наименование ГОКа	Класс, мм	Выход, %
Фабрики для обогащения медно-песчаниковых и жильных руд			
1	Фабрика № 1 Дзезказганского горно-металлургического комбината (Казахстан)	-0,074	60-65
2	Фабрика № 2 Дзезказганского горно-металлургического комбината (Казахстан)	-0,074	45-55
3	Кафанская фабрика (Армения)	-0,074	60-65
Фабрики для обогащения медно-порфировых руд			
4	Алмалыкская медная фабрика (Узбекистан)	-0,074	68,5
5	Фабрики Балхашского горно-металлургического комбината (Казахстан): медная фабрика	-0,074	48,3
6	Обогатительная фабрика советско-монгольского предприятия «Эрдэнэт» (Монголия)	-0,074	65-80
Фабрики для обогащения медно-цинковых руд			
7	Башкирская (Сибаяевская) фабрика	-0,074	88-90
8	Гайская фабрика (Оренбургская обл.)	-0,074	95-98
9	Учалинская фабрика (Башкирия)	-0,044	92-94
Фабрики для обогащения медно-никелевых руд			
10	Фабрика № 1 комбината «Печенганикель» (Мурманская область)	-0,074	82-85
11	Фабрика № 1 Норильского горно-металлургического комбината (Красноярский край)	-0,044	70-75
Фабрики для обогащения медно-свинцово-цинковых руд			
12	Алмалыкская фабрика для свинцово-цинковых руд (Узбекистан)	-0,044	83-85
13	Зыряновская фабрика (Казахстан)	-0,074	72-78
14	Фабрика № 2 Лениногорского полиметаллического комбината (Казахстан)	-0,074	70-75
15	Фабрика № 3 Лениногорского полиметаллического комбината (Казахстан)	-0,074	88-92
Фабрика для обогащения свинцово-цинковых баритсодержащих руд			
16	Кентауская фабрика № 1 комбината «Ачполиметалл» (Казахстан)	-0,01	32,21
Фабрика для обогащения вольфрамо-молибденовых руд			
17	Тырныаузская фабрика (Кабардино-Балкария)	-0,074	60-62
Фабрики для обогащения медно-молибденовых руд			
18	Сорская фабрика (республика Хакасия)	-0,074	46-48

Продолжение таблицы 2.12

Фабрика для обогащения вольфрамовых руд			
19	Приморская обогатительная фабрика (Приморский край)	-0,074	24-26
Фабрика для обогащения коренных оловянных руд			
20	Солнечная фабрика (Хабаровский край)	-0,074	35,1
Фабрики для обогащения железистых кварцитов			
21	Фабрика № 2 Северного горно-обогатительного комбината (СевГОК)	-0,074	65
22	Фабрика № 3 Ингулецкого горно-обогатительного комбината (ИнГОК)	-0,074	65-70
23	Фабрика Оленегорского горно-обогатительного комбината (Оленегорский ГОК)	-0,074	40
24	Фабрика Костомукшского горно-обогатительного комбината (Костомукшский ГОК)	-0,044	90
Фабрики для обогащения скарных магнетитовых и титаномагнетитовых руд			
25	Фабрика ММС Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината (ССГОК)	-0,074	92-94
26	Фабрика Качканарского горно-обогатительного комбината (Качканарский ГОК)	-0,074	75
Фабрика для обогащения бурожелезняковых руд			
27	Фабрика Лисаковского ГОКа	-0,074	75
Фабрики для обогащения апатитовых и фосфоритовых руд			
28	Апатит-нефелиновая обогатительная фабрика № 1 (АНОФ-1)	-0,074	33-36
29	Апатит-нефелиновая обогатительная фабрика № 2 (АНОФ-2)	-0,074	52-55
Фабрики для обогащения флюоритовых (плавиково-шпатовых) и магнезитовых руд			
30	Центральная фабрика для обогащения кварц-флюоритовых руд (Средняя Азия)	-0,074	60-65
31	Фабрика для обогащения слюдисто-флюоритовых руд (Приморский край)	-0,02	80
Фабрика для обогащения сильвиновых руд			
32	Фабрика Первого Березниковского производственного рудоуправления п/о «Уралкалий»	-0,074	44
Фабрика для обогащения серных руд			
33	Фабрика Раздольского п/о «Сера»	-0,074	65-70
Фабрика для обогащения графитовых руд			
34	Завальевская обогатительная фабрика п/о «Кировградграфит»	-0,074	50
Фабрика для обогащения кварца и кварц-полевошпатового сырья			
35	Лянгарская обогатительная фабрика	-0,074	55

Последовательный анализ данных таблицы 2.12 позволил спрогнозировать суммарный выход класса 0,02 мм по фабрикам. Используя методику нормального закона распределения крупности частиц в классах, при помощи метода парной нелинейной корреляции [91] были получены результаты прогнозной оценки суммарного выхода класса 0,02 мм (таблица 2.13).

Таблица 2.13 – Результаты прогнозной оценки суммарного выхода класса 0,02 мм [92]

Фактический суммарный выход известного класса крупности -0,074 мм, %	Эмпирические коэффициенты			Суммарный выход прогнозируемого класса, %
	$A_3$	$B_3$	$C_3$	
24	5,7826	0,7200	-0,0076	17,15
33	7,1867	1,0454	-0,0119	23,34
35,1	7,5184	1,1237	-0,0129	24,85
40	8,3010	1,3095	-0,0151	28,45
44	8,9500	1,4641	-0,0169	31,48
45	9,1138	1,5032	-0,0173	32,25
46	9,2783	1,5424	-0,0178	33,02
48,3	9,6590	1,6331	-0,0188	34,82
50	9,9427	1,7006	-0,0195	36,16
52	10,2791	1,7805	-0,0203	37,76
55	10,7891	1,9014	-0,0216	40,18
60	11,6541	2,1053	-0,0236	44,31
65	12,5385	2,3122	-0,0256	48,54
68,5	13,1696	2,4586	-0,0270	51,55
70	13,4431	2,5218	-0,0275	52,86
72	13,8108	2,6063	-0,0283	54,62
75	14,3686	2,7339	-0,0294	57,29
82	15,7005	3,0351	-0,0319	63,64
83	15,8943	3,0785	-0,0323	64,56
88	16,8767	3,2967	-0,0340	69,23
90	17,2760	3,3846	-0,0346	71,12
92	17,6790	3,4729	-0,0353	73,02
95	18,2904	3,6058	-0,0362	75,91

Таким образом, предварительная оценка действующих отечественных обогатительных фабрик и фабрик стран ближнего зарубежья показала, что 97 % ОФ могут полноценно использовать технологии сгущения отходов до пастообразного состояния с содержанием твердого 60–70 %, следовательно, на этих предприятиях возможно применение технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения.

## 2.8 Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие заключения:

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.

### 3 ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Данная глава посвящена складированию предварительно сгущенных до пастообразного состояния, отходов обогащения в пространство ограниченное отвалами вскрышных пород.

#### 3.1 Предлагаемые технологические схемы складирования пастообразных отходов

Для складирования отходов обогащения, предварительно сгущенных до пастообразного состояния, предложены следующие технологические схемы [93].

1. Технологическая схема складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1).

При открытой разработке месторождений полезных ископаемых ведут опережающую выемку крепких вскрышных пород из карьера и укладывают их в насыпи 1 расположенные параллельно друг другу, на внутренние откосы насыпи укладывают наиболее мелкие породы вскрыши 2. Между насыпями вскрышных пород складировуют ПО обогащения 3, подаваемые по пульпопроводу 4, причем при укладке первой насыпи складирование ПО осуществляется со второй и наоборот, а расстояние между насыпями определяется по формуле, без учета объема мелкой породы вскрыши:

$$A = \frac{2K_p^0 \left( \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha} + B \right)}{K_g \cdot K_p^e} - \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha}, \text{ м} \quad (3.1)$$

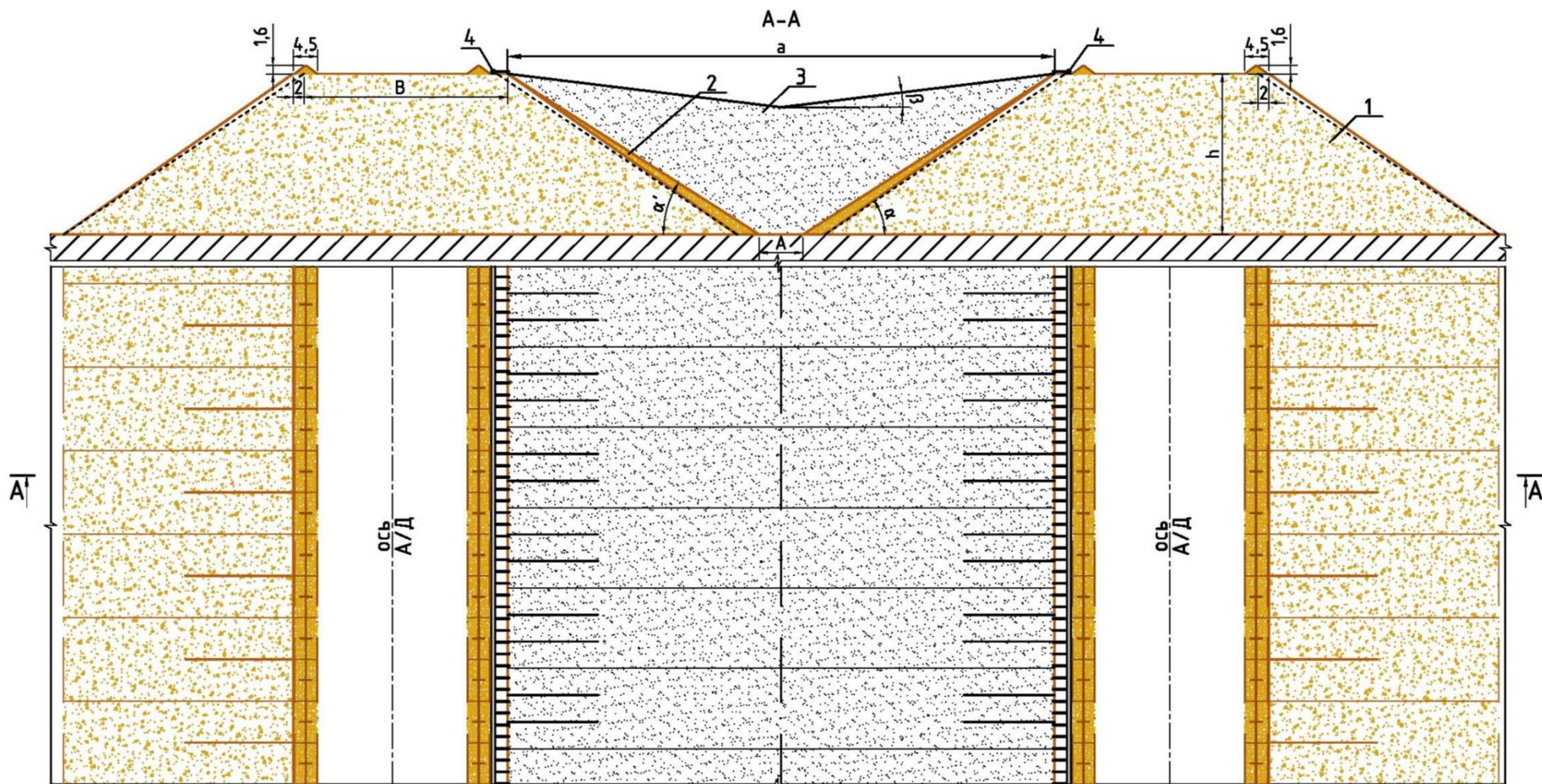


Рисунок 3.1 – Технологическая схема складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание [94]:  
 1 – насыпь вскрышных пород; 2 – мелкие породы вскрыши, отсыпанные на внутренние откосы насыпи вскрышных пород;  
 3 – ПО обогащения; 4 – пульпопровод

расстояние между насыпями вскрышных пород с учетом объема мелкой породы, уложенной на внутренние откосы насыпи, рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{2K_p^o \left[ \frac{h \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha')}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha'} + B \right]}{K_e \cdot K_p^e} - \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'}, \text{ м}, \quad (3.2)$$

где  $K_p^e$  – коэффициент разрыхления вскрышных пород;  $K_e$  – коэффициент вскрыши;  $K_p^o$  – коэффициент разрыхления руд;  $h$  – высота насыпи вскрышных пород, м;  $\alpha$  – угол откоса насыпи вскрышных пород, град;  $\alpha'$  – угол откоса мелкой породы вскрыши, град;  $B$  – ширина насыпи вскрышных пород по гребню, м.

Таким образом, укладка насыпей из вскрышных пород параллельно друг к другу обеспечит возможность складирования ПО после обогатительного передела руд в созданное между ними пространство, а для исключения распространения пастообразного материала во вскрышные породы на внутренние откосы насыпи отсыпают наиболее мелкие породы вскрыши.

В связи с тем, что заполнение созданного пространства между насыпями вскрышных пород ПО будет производиться не на полную вмещающую ёмкость, скорректируем выражение (3.2) в зависимости от физико-механических свойств ПО:

$$A = \frac{2K_p^o \left[ \frac{h \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha')}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha'} + B \right]}{K_e \cdot K_p^e} - \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'} + \frac{a^2}{4\operatorname{tg}\left(\frac{90-\beta}{2}\right)}, \text{ м}, \quad (3.3)$$

где  $a$  – расстояние между верхними бровками насыпи вскрышных пород, м;  $\beta$  – угол откоса ПО при растекании, град.

2. Технологическая схема складирования ПО на наклонное основание представлена на рисунке 3.2.

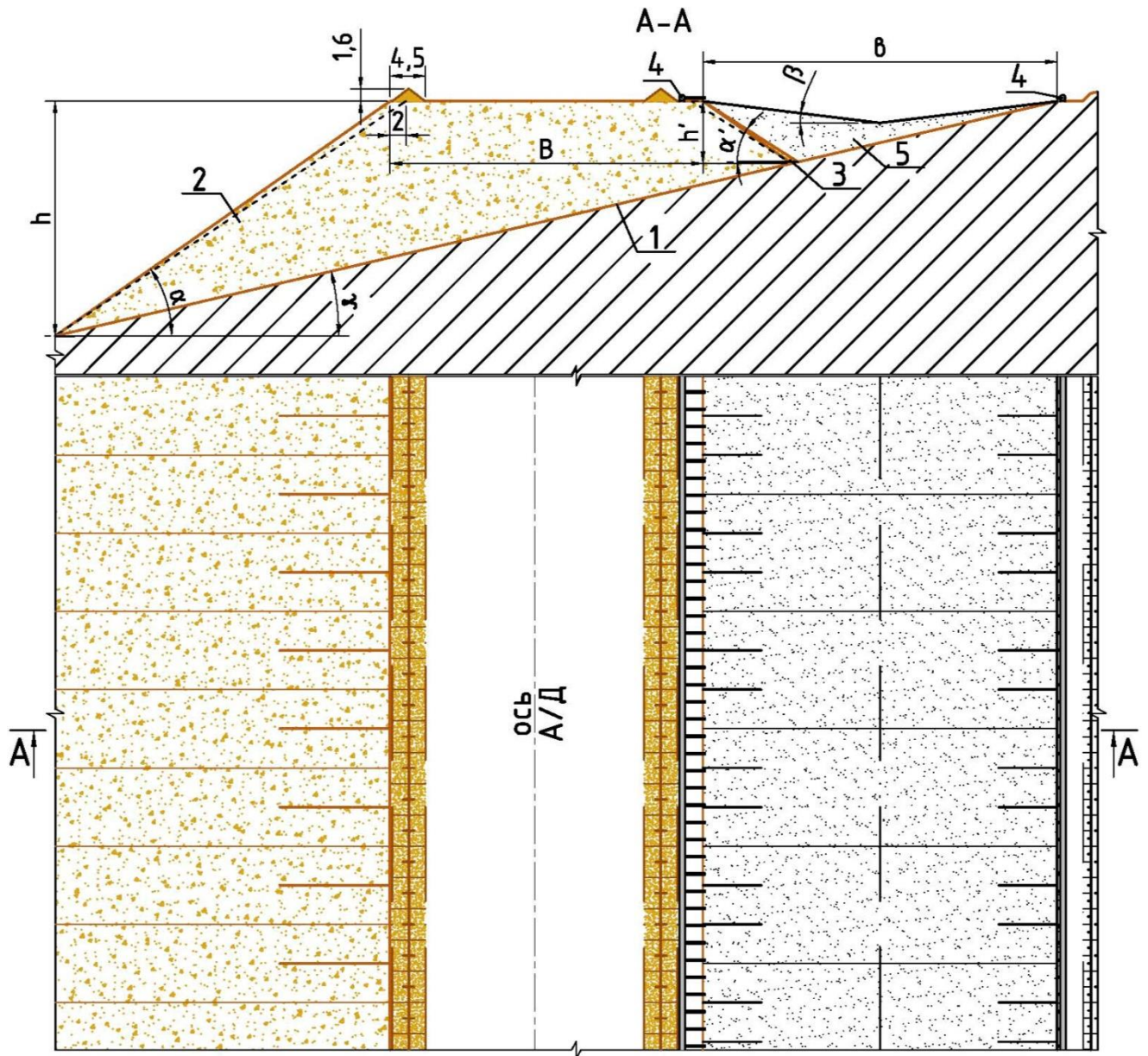


Рисунок 3.2 – Технологическая схема складирования ПО на наклонное основание [95]:

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

При использовании данной технологической схемы на наклонное основание *1* производят отсыпку насыпи вскрышных пород *2* с высотой насыпи



вскрышных пород со стороны склона  $h'$ , определяемой из условия, пренебрегая физико-механическими свойствами ПО:

$$h' = \sqrt{\frac{2V_g \cdot K}{K_g \cdot L_o \cdot [tg(90 - \alpha') + tg(90 - \gamma)]}}, \text{ м}, \quad (3.4)$$

где  $V_g$  – объем породы вскрыши,  $\text{м}^3$ ;  $K$  – коэффициент содержания воды в ПО после обогатительного передела руд;  $L_o$  – длина отвала, м;  $K_g$  – коэффициент вскрыши;  $\alpha'$  – угол откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпи вскрышных пород, град;  $\gamma$  – уклон местности, град.

Учитывая физико-механические свойства ПО, высота насыпи вскрышных пород со стороны склона  $h'$  будет определяться из следующего выражения:

$$h' = \sqrt{\frac{4V_g \cdot K \cdot \left(tg \frac{90 - \beta}{2}\right)}{K_g \cdot L_o \cdot \left(2 \cdot tg\left(\frac{90 - \beta}{2}\right) \cdot (tg(90 - \alpha') + tg(90 - \gamma)) - (tg(90 - \alpha') + tg(90 - \gamma))^2\right)}}, \text{ м}, \quad (3.5)$$

где  $\beta$  – угол откоса ПО, град.

На откос насыпи вскрышных пород со стороны склона укладывают наиболее мелкую породу вскрыши 3 для исключения распространения пастообразного материала в тело насыпи.

В созданное пространство между наклонным основанием и откосом насыпи вскрышных пород при помощи пульпопровода 4 складировать ПО обогащения 5.

3. Схема складирования ПО обогащения в забалансовый склад на наклонном основании (рисунок 3.3).

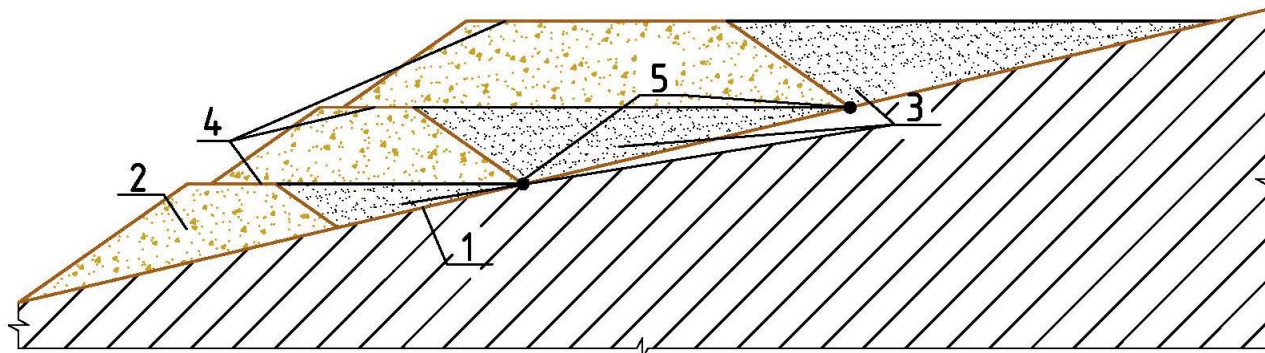


Рисунок 3.3 – Схема складирования ПО обогащения в забалансовый склад на наклонном основании [96]:

1 – наклонное основание; 2 – забалансовые руды; 3 – ПО обогащения; 4 – горизонтальные уровни яруса забалансовых руд и ПО; 5 – точка пересечения линии нижней кромки вышележащего яруса забалансовых руд и линии нижележащего яруса ПО с наклонным основанием

В данном случае на наклонное основание 1 производят отсыпку ярусов склада забалансовых руд 2 и ПО обогащения 3, укладывают их отдельно навстречу друг к другу, причем ПО укладывают со стороны склона, а отсыпку яруса забалансовых руд и ПО производят до одного горизонтального уровня 4. Укладывают каждый последующий ярус склада таким образом, что нижняя кромка вышележащего яруса забалансовых руд со стороны склона совпадает с точкой пересечения нижележащего яруса ПО с наклонным основанием 5.

Во всех представленных выше технологических схемах складирования ПО объем пространства под ПО, ограниченного отвалами вскрышных пород, будет зависеть от следующих параметров: на горизонтальном и слабонаклонном основании (рисунок 3.1):  $\alpha'$ ,  $a$ ,  $h$ ; на наклонном основании (рисунок 3.2):  $\alpha'$ ,  $\gamma$ ,  $h'$ .

Пространство под ПО необходимого объема обеспечивается регулированием следующих параметров при отсыпке насыпей вскрышных пород:  $a$ ,  $h$  (на горизонтальном и слабонаклонном основании);  $h'$  (на наклонном основании). Для эффективного заполнения пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, ПО обогащения необходимо учитывать их угол откоса при

растекании, который будет зависеть от содержания твердого компонента в ПО, данные приведены в таблице 2.7.

Эффективность заполнения пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, ПО оценим двумя коэффициентами.

1. Коэффициент использования пространства ПО ( $k_u$ ) – отношение объема ПО, уложенных в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, к объему последнего.

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

### 3.2 Коэффициент использования пространства пастообразными отходами

Рассмотрим технологическую схему складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1) при двусторонней укладке ПО под откос.

Площадь пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, в зависимости от расстояния между нижними бровками насыпей вскрышных пород  $A$  может находиться по формулам:

при  $A > 0$  по формуле площади трапеции:

$$S_1 = \frac{a + A}{2} \cdot h, \text{ м}^2, \quad (3.6)$$

при  $A \leq 0$  по формуле площади треугольника:

$$S_1 = \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \alpha')}, \text{ м}^2. \quad (3.7)$$

При этом расстояние между нижними бровками насыпей вскрышных пород зависит от расстояния между верхними бровками насыпей вскрышных пород ( $a$ ), высоты насыпи вскрышных пород ( $h$ ), угла откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород ( $\alpha'$ ), и рассчитывается по формуле

$$A = a - 2h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'), \text{ м.} \quad (3.8)$$

Тогда формулу 3.6 можно преобразить к следующему виду:

$$S_1 = (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h, \text{ м}^2. \quad (3.9)$$

Площадь не заполненного пространства ПО можно рассчитать по формулам:

при  $A \leq 0$ :

$$S_2 = \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta)}, \text{ м}^2; \quad (3.10)$$

при  $A > 0$ :

$$S_2 = (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta)) \cdot h, \text{ м}^2. \quad (3.11)$$

Площадь заполняемого ПО пространства находится по следующему выражению:

$$S_{\text{наст}} = S_1 - S_2, \text{ м}^2. \quad (3.12)$$

Коэффициент использования пространства ПО определим по формуле

$$k_u = \frac{S_{насм}}{S_1} = \frac{S_1 - S_2}{S_1}. \quad (3.13)$$

Тогда при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму трапеции, коэффициент использования пространства ПО составит:

$$k_u = \frac{(a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h - (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta)) \cdot h}{(a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h}, \quad (3.14)$$

или

$$k_u = \frac{h \cdot \sin(\alpha' - \beta)}{\sin \alpha' \cdot \sin \beta \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}. \quad (3.15)$$

При условии, что  $S_1$  имеет форму трапеции, а  $S_2$  имеет форму треугольника, коэффициент использования пространства ПО составит:

$$k_u = \frac{(a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h - \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta)}}{(a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h}, \quad (3.16)$$

или

$$k_u = 1 - \frac{a^2}{4 \operatorname{ctg} \beta \cdot h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}. \quad (3.17)$$

Для условия, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму треугольника, коэффициент использования пространства ПО составит:

$$k_u = \frac{\frac{a^2}{4\operatorname{tg}(90-\alpha')} - \frac{a^2}{4\operatorname{tg}(90-\beta)}}{\frac{a^2}{4\operatorname{tg}(90-\alpha')}} \quad (3.18)$$

или

$$k_u = \frac{\sin(\alpha' - \beta)}{\sin \alpha' \cdot \cos \beta} \quad (3.19)$$

Проанализировав полученные выражения коэффициента использования пространства ПО, формулы (3.15), (3.17), (3.19), можно сделать следующий вывод: в момент, когда площадь пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, имеет форму треугольника, коэффициент использования пространства ПО зависит не от параметров пространства ( $a$ ,  $h$ ), а от физико-механических свойств ПО, влияющих на угол откоса при растекании ( $\beta$ ) и угла откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород ( $\alpha'$ ) (3.19), данная зависимость отображена на рисунке 3.4.

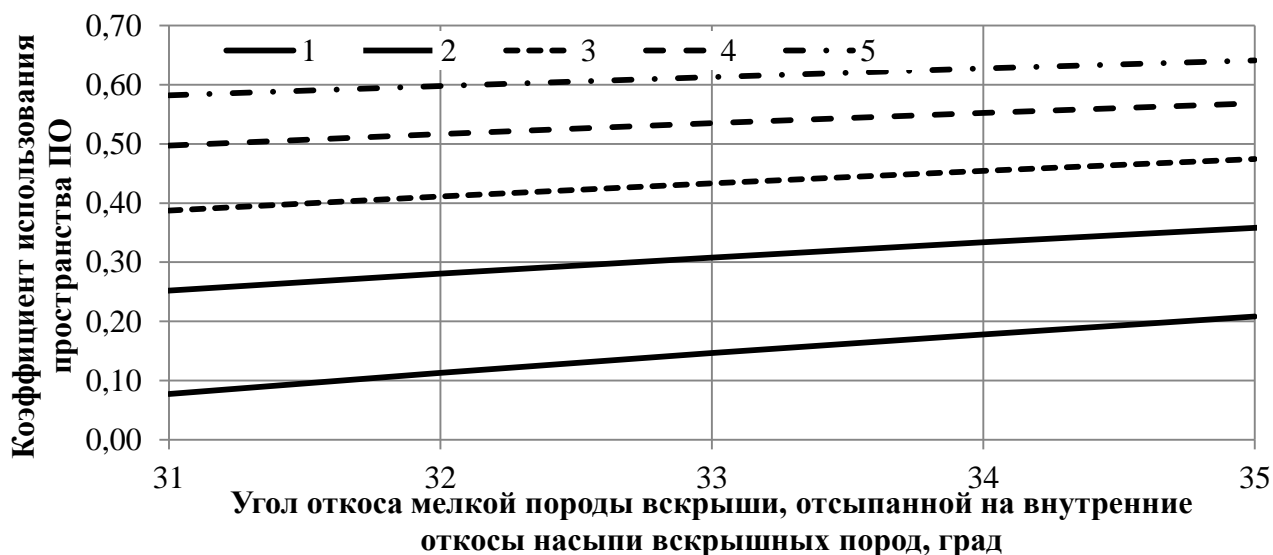


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента использования пространства ПО от угла откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород, при угле откоса ПО при растекании: 1 – 29°; 2 – 24,2°; 3 – 20,2°; 4 – 16,8°; 5 – 14,1°

Необходимое расстояние между верхними бровками насыпей вскрышных пород для соблюдения условия  $A \leq 0$ , в зависимости от угла откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпи вскрышных пород, и высоты насыпи вскрышных пород, представлено на рисунке 3.5.

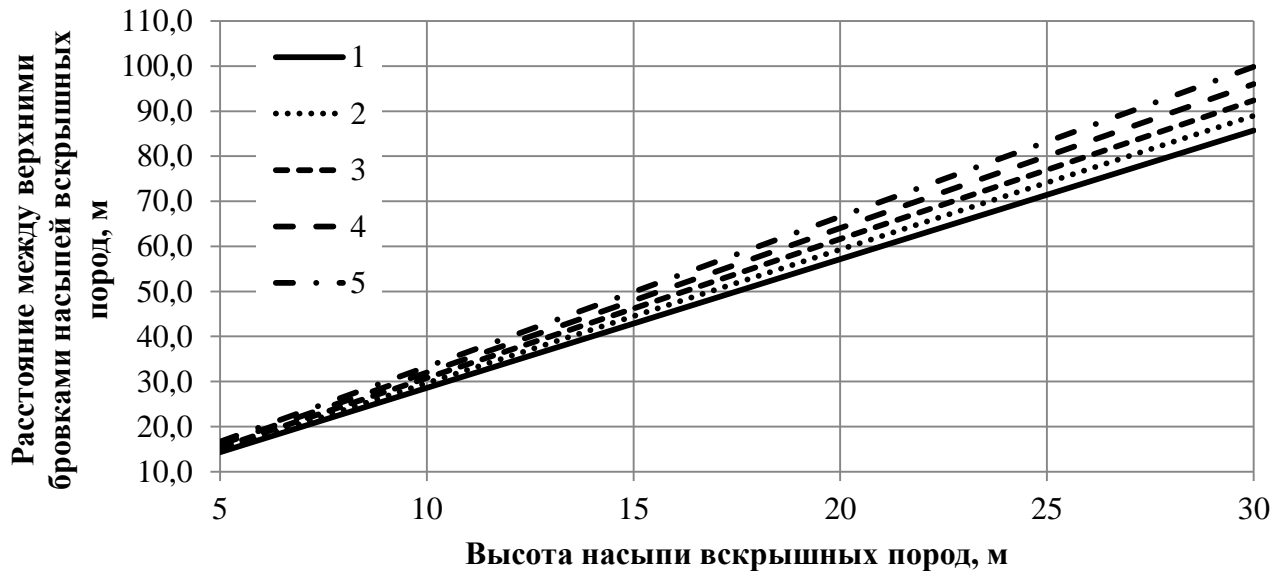


Рисунок 3.5 – Расстояние между верхними бровками насыпей вскрышных пород для соблюдения условия  $A \leq 0$ , в зависимости от угла откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпи вскрышных пород (1 – 35°; 2 – 34°; 3 – 33°; 4 – 32°; 5 – 31°) и высоты насыпи вскрышных пород

Для технологической схемы складирования ПО на наклонное основание (рисунок 3.2) при двусторонней укладке ПО под откос с одного высотного уровня необходимо учитывать угол наклона основания ( $\gamma$ ) и высоту насыпи вскрышных пород со стороны склона ( $h'$ ).

Тогда площадь пространства, ограниченного насыпью вскрышных пород и наклонным основанием, необходимо находить по формуле

$$S_1 = \frac{v \cdot h'}{2}, \text{ м}^2, \quad (3.20)$$

где расстояние между верхней бровкой насыпи вскрышных пород и наклонным основанием, находящимися на одном высотном уровне ( $e$ ), можно определить из выражения:

$$e = h' \cdot (tg(90 - \alpha') + tg(90 - \gamma)), \text{ м.} \quad (3.21)$$

Площадь не заполненного пространства ПО можно рассчитать по формуле:

$$S_2 = \frac{e^2}{4tg(90 - \beta)}, \text{ м}^2. \quad (3.22)$$

Коэффициент использования пространства ПО в данном случае будет находиться следующим образом:

$$k_u = \frac{\frac{e \cdot h'}{2} - \frac{e^2}{4tg(90 - \beta)}}{\frac{e \cdot h'}{2}}, \quad (3.23)$$

или

$$k_u = 1 - \frac{e}{2 \cdot h'} \cdot tg\beta. \quad (3.24)$$

При определении значений коэффициента использования пространства ПО с разными физико-механическими свойствами, влияющими на угол откоса при растекании ( $\beta$ ), рассчитаем углы наклона основания ( $\gamma$ ), при которых данная технологическая схема (рисунок 3.2) будет целесообразна к применению.

Рассчитаем ширину, занимаемую насыпью вскрышных пород и ПО в плане:



$$Ш = e + B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'), \text{ м.} \quad (3.25)$$

Угол наклона основания можно найти из выражения:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{h}{Ш}, \text{ град.} \quad (3.26)$$

Высоту насыпи вскрышных пород со стороны склона определим по формуле:

$$h' = e \cdot \operatorname{tg} \gamma, \text{ м.} \quad (3.27)$$

Полученные значения, рассчитанные по формулам (3.25)–(3.27), занесем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры пространства, образованного между насыпью вскрышных пород и наклонным основанием

$\alpha$ , град	$h$ , м	$B$ , м	$e$ , м	$Ш$ , м	$\operatorname{tgr}$	$\gamma$ , град	$h'$ , м
33	30	40	15	98	0,306	17,0	5
			20	103	0,292	16,3	6
			25	108	0,278	15,5	7
			30	113	0,266	14,9	8
			35	118	0,254	14,3	9
			40	123	0,244	13,7	10

Влияние уклона местности ( $\gamma$ ) и угла откоса ПО при растекании ( $\beta$ ) на коэффициент использования пространства ПО показано на рисунке 3.6.

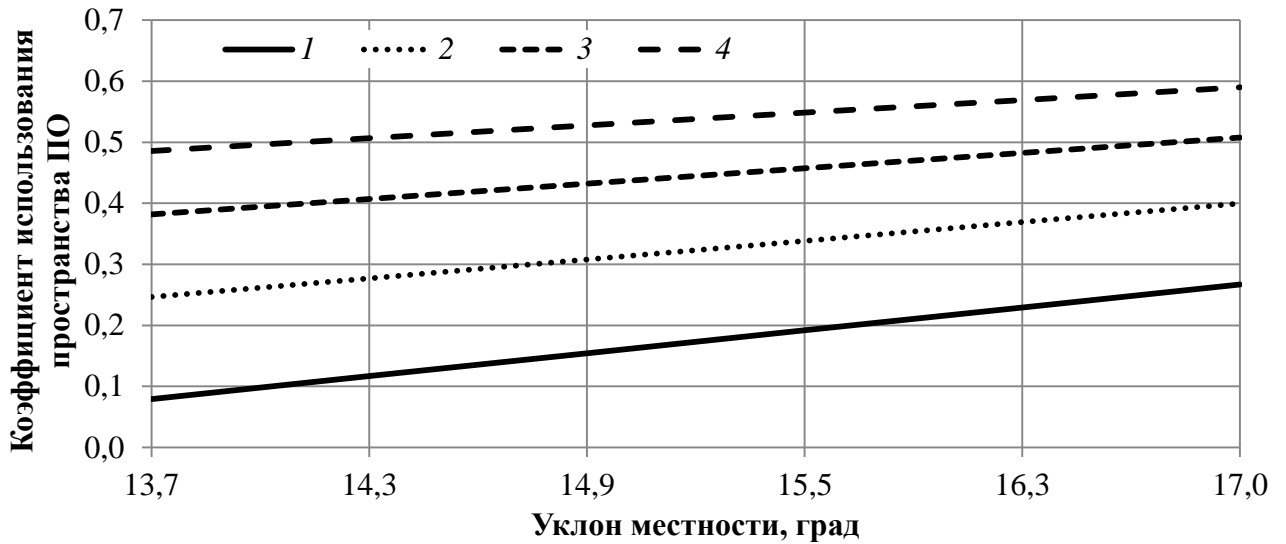


Рисунок 3.6 – Влияние на коэффициент использования пространства ПО уклона местности и физико-механических свойств ПО, с углами откоса при растекании: 1 – 24,2°; 2 – 20,2°; 3 – 16,8°; 4 – 14,1°

### 3.3 Коэффициент использования вскрышных пород

Коэффициент использования вскрышных пород можно определить по формуле

$$k_g = \frac{S_3}{(S_1 - S_2) \cdot G}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.28)$$

где  $S_3$  – площадь насыпей вскрышных пород, ограничивающих пространство для складирования ПО,  $\text{м}^2$ ;  $G$  – содержание твердого компонента в ПО, доли.

Для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1) при двусторонней укладке ПО под откос площадь насыпей вскрышных пород, ограничивающих пространство, находится по формуле

$$S_3 = 2h \cdot (B + h \cdot \text{tg}(90 - \alpha')), \text{ м}^2. \quad (3.29)$$

Минимальная ширина насыпи вскрышных пород по гребню определяется с учетом безопасной работы автосамосвала:

$$B = 2R_p + 2b_n, \text{ м}, \quad (3.30)$$

где  $R_p$  – радиус разворота самого большого автосамосвала, задействованного на отсыпке насыпи вскрышных пород, м;  $b_n$  – ширина предохранительной бермы, м.

В диссертационной работе минимальная ширина насыпи вскрышных пород по гребню с учетом безопасной работы автосамосвала принята 40 м.

Тогда, при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму трапеции, коэффициент использования вскрышных пород составит:

$$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'))}{(h \cdot (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) - h \cdot (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta))) \cdot G}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.31)$$

или

$$k_e = \frac{2 \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \sin \alpha' \cdot \sin \beta}{G \cdot h \cdot \sin(\alpha' - \beta)}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.32)$$

При условии, что  $S_1$  имеет форму трапеции, а  $S_2$  имеет форму треугольника, коэффициент использования вскрышных пород составит:

$$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'))}{G \cdot \left( (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot h - \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta)} \right)}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.33)$$

или

$$k_{\epsilon} = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}{G \cdot (h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') - \frac{a^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{4})}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.34)$$

Для условия, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму треугольника, коэффициент использования вскрышных пород составит:

$$k_{\epsilon} = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'))}{G \cdot \left( \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \alpha')} - \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta)} \right)}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.35)$$

или

$$k_{\epsilon} = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \cos \alpha' \cdot \cos \beta}{G \cdot a^2 \cdot \sin(\alpha' - \beta)}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.36)$$

Для технологической схемы складирования ПО на наклонное основание (рисунок 3.2) при двусторонней укладке ПО под откос с одного высотного уровня площадь насыпи вскрышных пород находится по формуле

$$S_3 = h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) - \frac{1}{2} \cdot (B + 2h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'))^2 \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \sin \alpha'}{\sin(180 - (\gamma + \alpha'))}, \text{ м}^2. \quad (3.37)$$

В данном случае коэффициент использования вскрышных пород будет находиться следующим образом:

$$k_{\epsilon} = \frac{h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) - 0,5(B + 2h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha'))^2 \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \sin \alpha'}{\sin(180 - \gamma - \alpha')}}{G \cdot \left( \frac{\epsilon \cdot h'}{2} - \frac{\epsilon^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta)} \right)}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.38)$$

или

$$k_g = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') - (B + 2h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')^2 \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \sin \alpha'}{\sin(\gamma + \alpha')}}{G \cdot v \cdot (h' - \frac{e}{2} \cdot \operatorname{tg} \beta)}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.39)$$

Значения коэффициентов использования пространства ПО и коэффициентов использования вскрышных пород в технологических схемах складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание и на наклонное основание представлены в таблице 3.2 и на рисунках 3.7 – 3.14.

Таблица 3.2 – Коэффициенты использования пространства ПО и использования вскрышных пород при складировании ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание и на наклонное основание

Угол откоса ПО при растекании, град	Складирование ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание						Складирование ПО между насыпью вскрышных пород и наклонным основанием	
	При $S_1$ и $S_2$ , имеющих форму трапеции		При $S_1$ , имеющей форму трапеции, а $S_2$ форму треугольника		При $S_1$ и $S_2$ , имеющих форму треугольника			
	$k_u$	$k_g, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$k_u$	$k_g, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$k_u$	$k_g, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$k_u$	$k_g, \text{ м}^3/\text{м}^3$
14	0,37	4,01	0,61	9,00	0,62	11,01	0,50	17,76
16	0,36	4,76	0,56	9,30	0,56	11,36	0,43	19,52
18	0,33	5,88	0,50	10,16	0,50	12,39	0,35	23,22
20	0,30	7,32	0,44	11,30	0,44	13,77	0,27	29,20
22	0,27	9,17	0,37	12,78	0,38	15,53	0,19	40,15
24	0,24	11,79	0,31	14,96	0,31	18,13	0,11	68,31
26	0,19	16,08	0,24	18,71	0,25	22,57	-	-
28	0,15	23,41	0,18	25,22	0,18	30,14	-	-
30	0,10	40,41	0,11	40,93	0,11	47,90	-	-

Для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1) при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму трапеции, значения коэффициентов использования пространства ПО и

коэффициентов использования вскрышных пород в зависимости от угла откоса ПО при растекании представлены на рисунке 3.7.

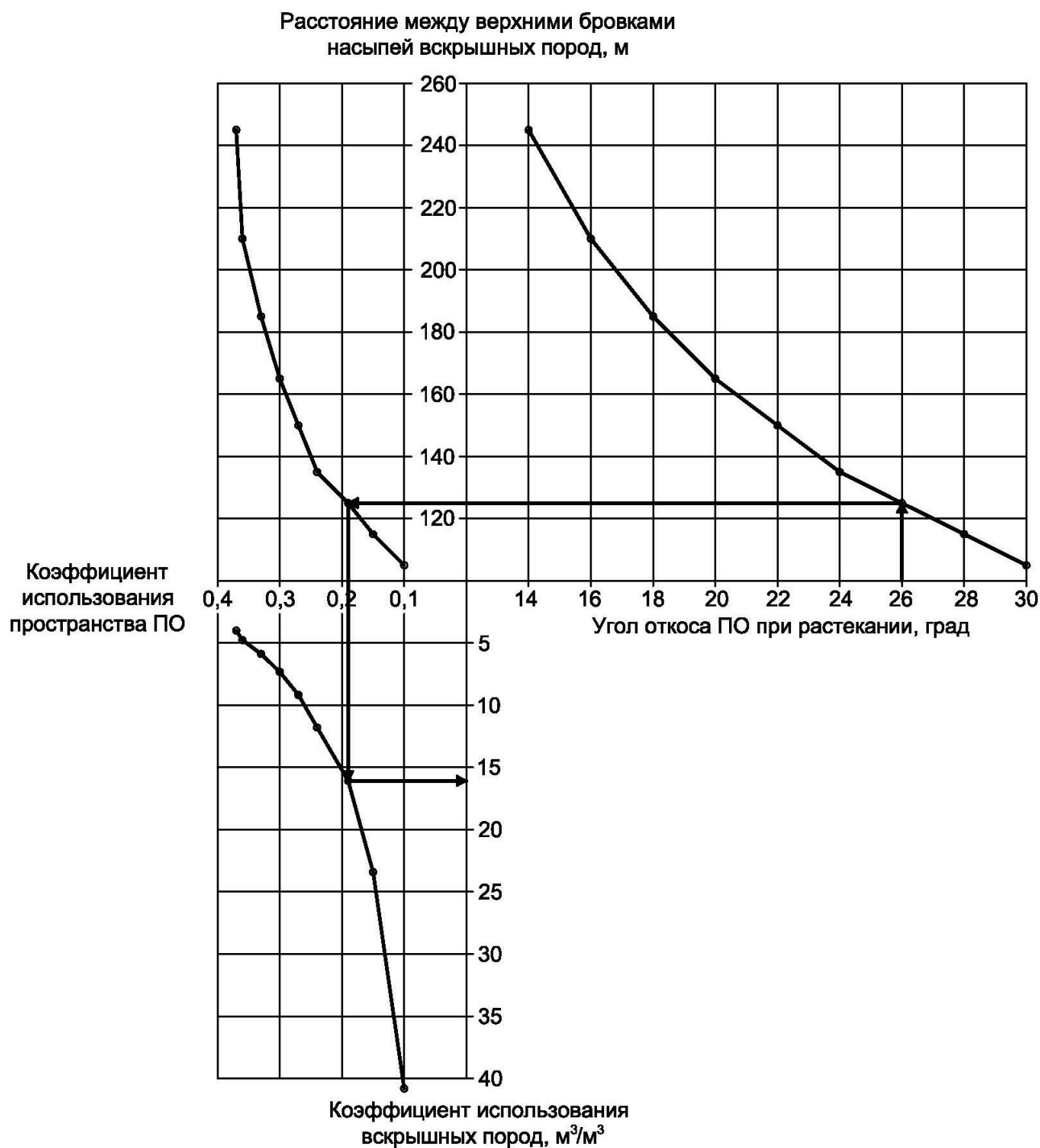


Рисунок 3.7 – Номограмма определения коэффициента использования пространства ПО и коэффициента использования вскрышных пород в зависимости от угла откоса ПО при растекании, для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1), при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму трапеции

При изменении высоты насыпи вскрышных пород изменяется коэффициент использования вскрышных пород (рисунок 3.8), а коэффициент использования пространства ПО остается без изменений.

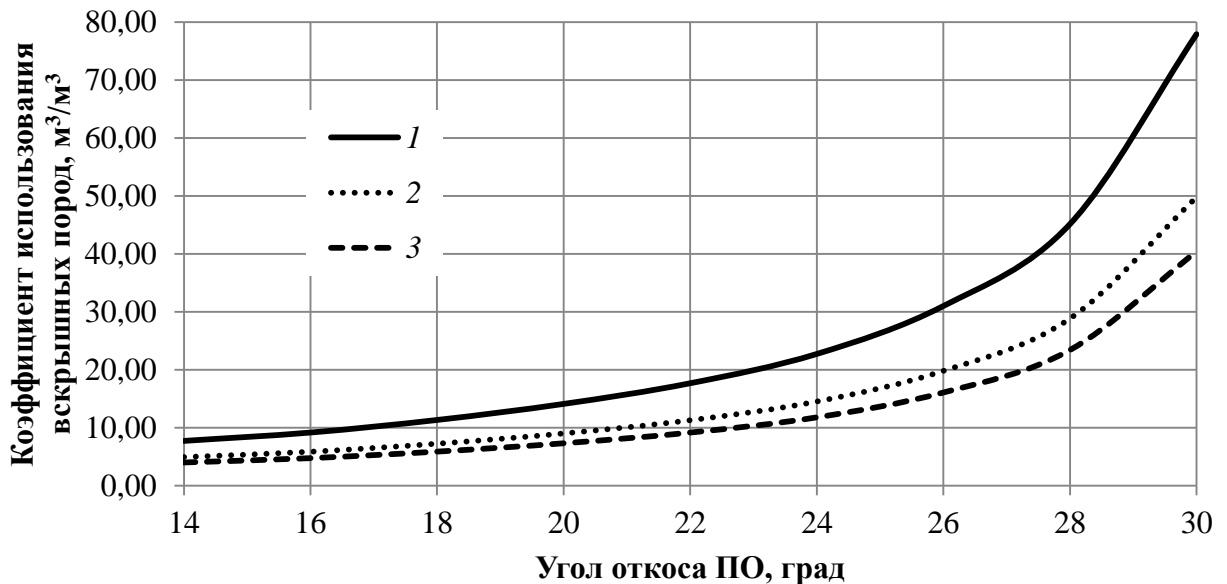


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании и высоты насыпи вскрышных пород: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30 м

Для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1) при условии, что  $S_1$  имеет форму трапеции, а  $S_2$  форму треугольника, значения коэффициентов использования пространства ПО и коэффициентов использования вскрышных пород в зависимости от угла откоса ПО при растекании представлены на рисунке 3.9.

При изменении высоты насыпи вскрышных пород также изменяется коэффициент использования вскрышных пород (рисунок 3.10), а коэффициент использования пространства ПО остается без изменений.

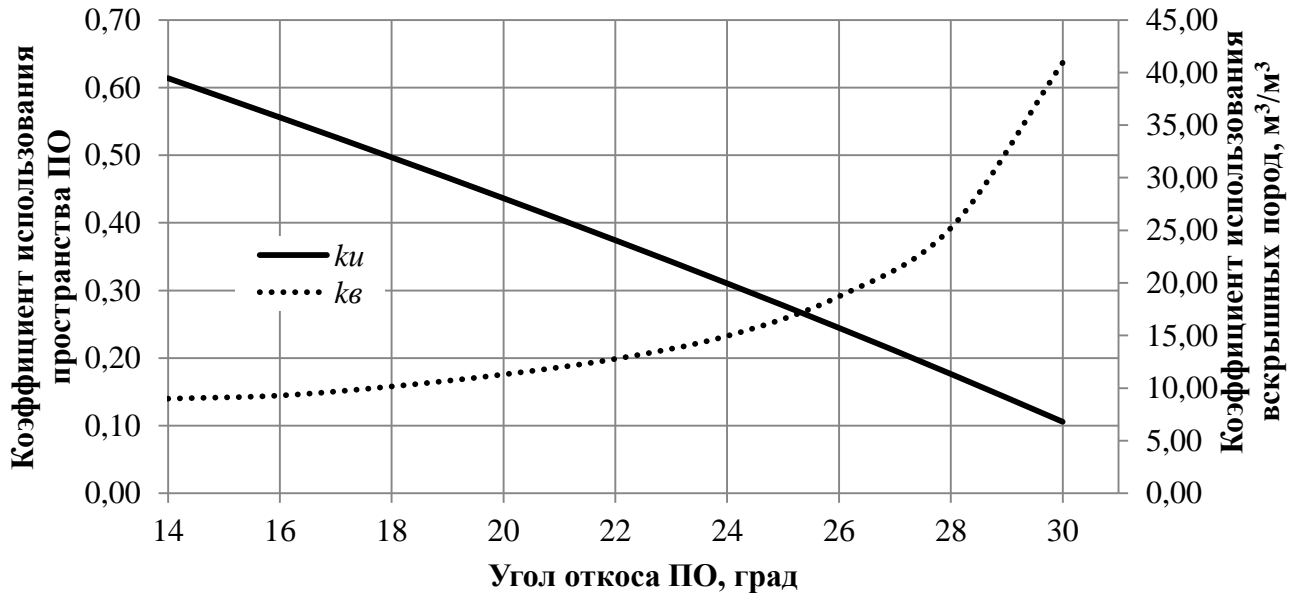


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента использования пространства ПО и коэффициента использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании, для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1), при условии, что  $S_1$  имеет форму трапеции, а  $S_2$  – форму треугольника

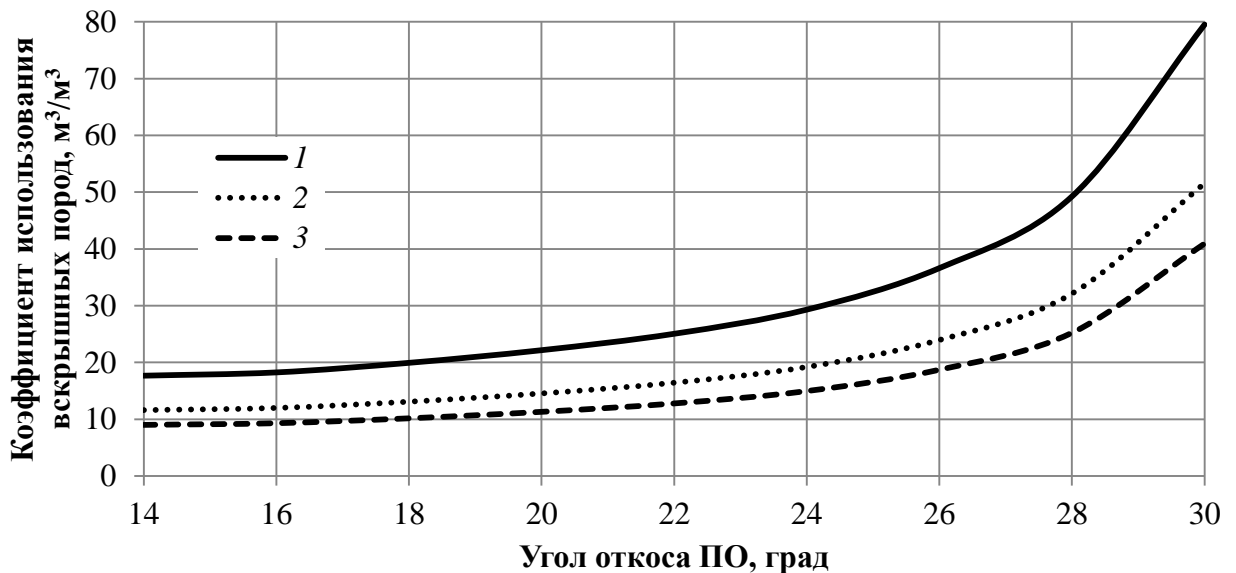


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании и высоты насыпи вскрышных пород: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30 м

Для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1) при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму



треугольника, значения коэффициентов использования пространства ПО и коэффициентов использования вскрышных пород в зависимости от угла откоса ПО при растекании представлены на рисунке 3.11.

При изменении высоты насыпи изменяется коэффициент использования вскрышных пород (рисунок 3.12), коэффициент использования пространства ПО остается без изменений.

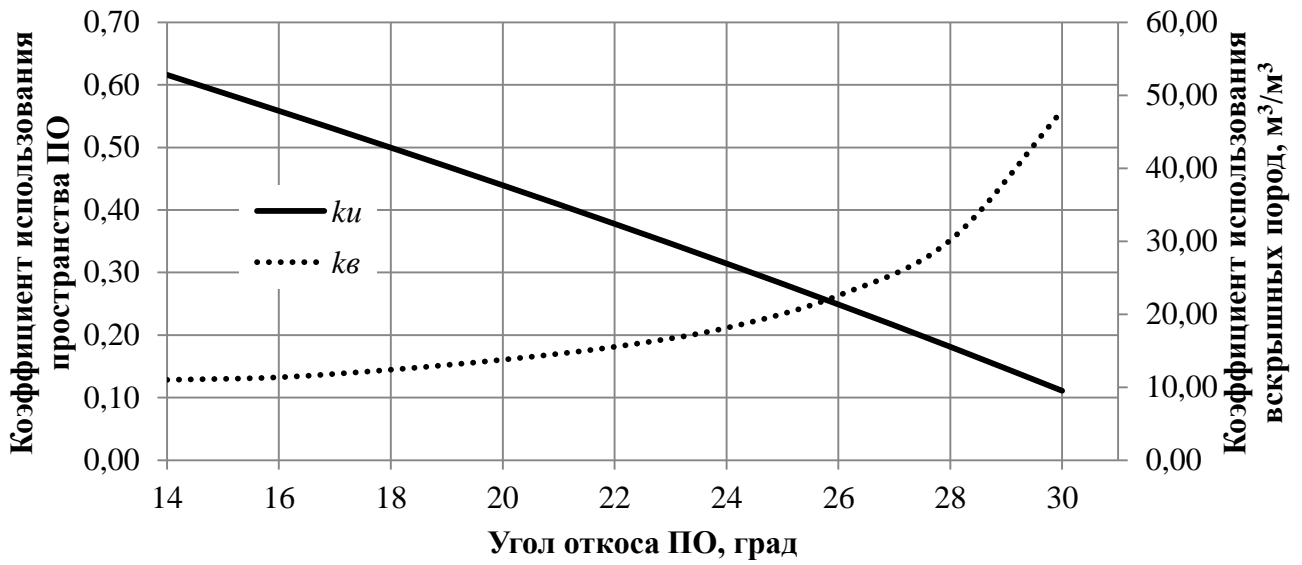


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента использования пространства ПО и коэффициента использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании, для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание, при условии, что  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму треугольника

Высокие значения коэффициентов использования вскрышных пород при высоте насыпи вскрышных пород 10 м (рисунок 3.8, 3.10, 3.12) вызвано технологией формирования самой насыпи вскрышных пород – автосамосвалами с разгрузкой под откос, при которой ширина насыпи вскрышных пород по гребню (принята 40 м) должна удовлетворять условиям безопасной работы автосамосвалов. При экскаваторной технологии формирования насыпи вскрышных пород и планировки гребня шириной до 10 м бульдозером, значения коэффициентов использования вскрышных пород представлены на рисунке 3.13.

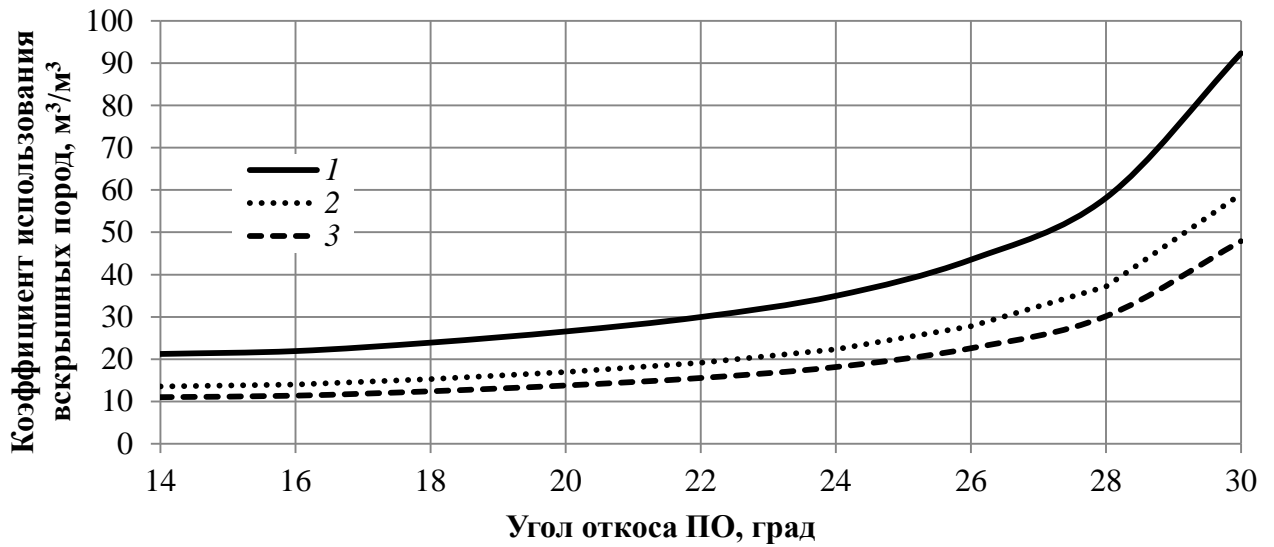


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании и высоте насыпи вскрышных пород: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30 м

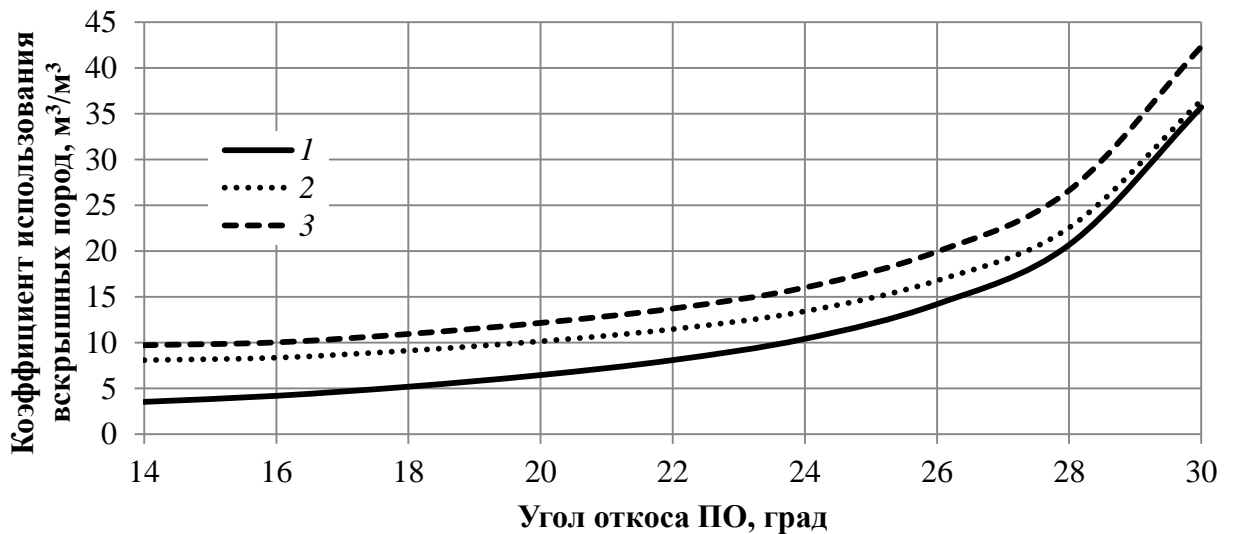


Рисунок 3.13 – Коэффициенты использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании, при высоте насыпи вскрышных пород, равной ширине насыпи по гребню 10 м, для технологической схемы складирования ПО на горизонтальное или слабонаклонное основание (рисунок 3.1), при условии: 1 –  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму трапеции; 2 –  $S_1$  имеет форму трапеции, а  $S_2$  – форму треугольника; 3 –  $S_1$  и  $S_2$  имеют форму треугольника

Для технологической схемы складирования ПО на наклонное основание (рисунок 3.2) значения коэффициентов использования пространства ПО и коэффициентов использования вскрышных пород в зависимости от угла откоса ПО при растекании представлены на рисунке 3.14.

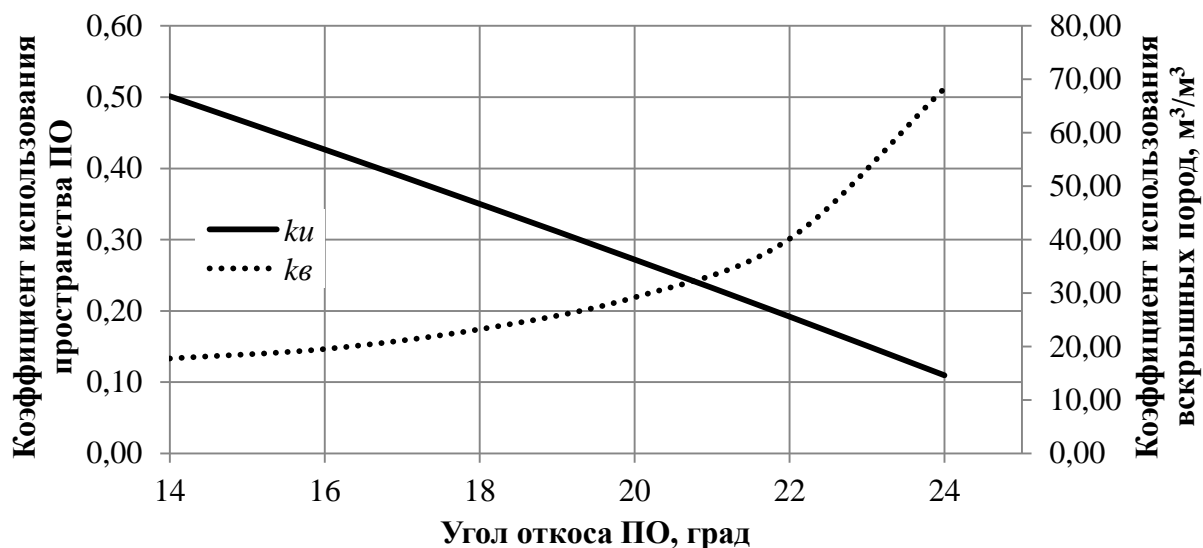


Рисунок 3.14 – Коэффициенты использования пространства ПО и использования вскрышных пород от угла откоса ПО при растекании для технологической схемы складирования ПО на наклонное основание

Как видно из графиков на рисунках 3.7 – 3.14 и таблицы 3.2, складирование ПО с насыпи вскрышных пород под откос по предложенным технологическим схемам эффективно только при содержании твердого компонента в пастообразном материале, не превышающем 62 %.

Для более плотных ПО предложены следующие технологические решения, позволяющие увеличить коэффициент использования пространства ПО.

### 3.4 Технологические решения по увеличению коэффициента использования пространства пастообразными отходами

Решение 1. Складирование ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород показано на рисунке 3.15.

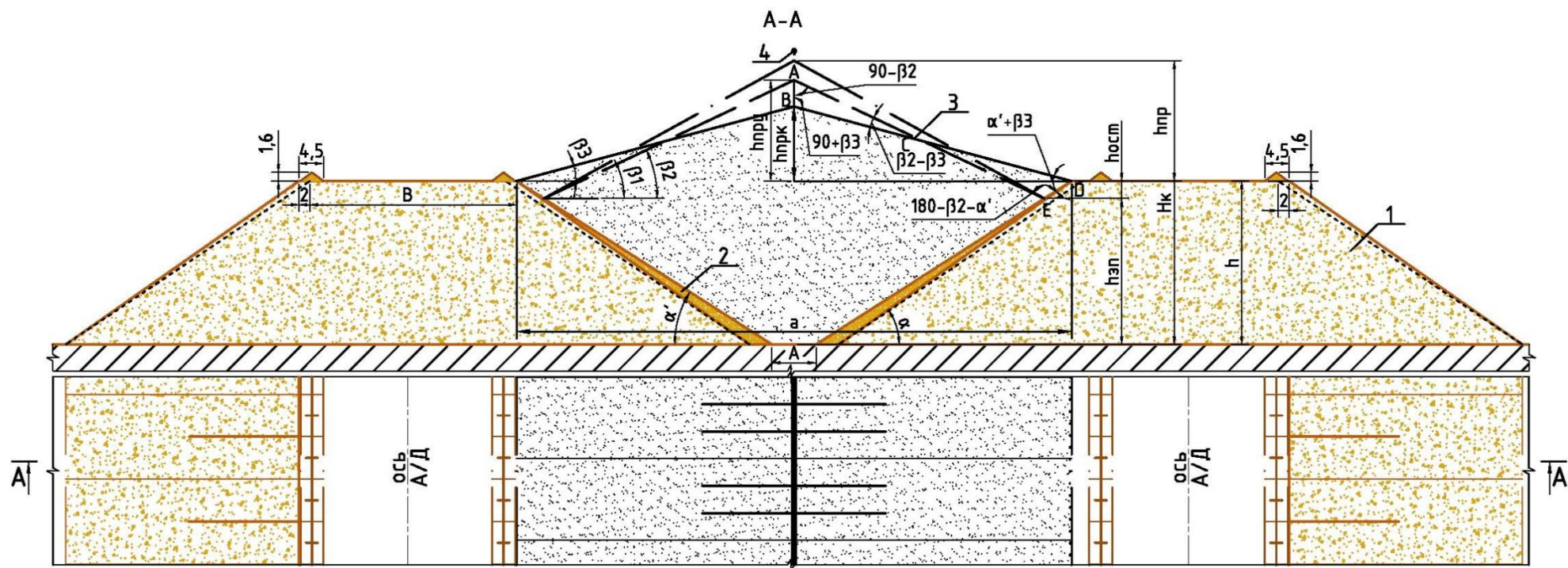


Рисунок 3.15 – Технологическая схема складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород:

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

При складировании ПО с исходной высотой  $H_k$  и углом откоса при растекании  $\beta_1$  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  $h_{npу}$  и, соответственно угол откоса ПО до величины  $\beta_2$ . Воздействие дождевых осадков размоют поверхность консолидированных ПО до угла откоса  $\beta_3$ , в результате чего величина превышения ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород составит  $h_{npк}$ .

Для предохранения верхних площадок насыпи вскрышных пород от растекания на них пастообразного материала необходимо заполнять созданное пространство между насыпями вскрышных пород ПО до высоты  $h_{zn}$ .

Для определения величины  $h_{zn}$  необходимо вычислить величину  $h_{ост}$  (высоту не заполняемого ПО пространства) из равенства площадей треугольников ABC и CDE (рисунок 3.15).

Площадь треугольника ABC определим по формуле

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \cdot BC \cdot AC \cdot \sin(\beta_2 - \beta_3), \text{ м}^2. \quad (3.40)$$

Площадь треугольника CDE по формуле

$$S_{CDE} = \frac{1}{2} \cdot CE \cdot CD \cdot \sin(\beta_2 - \beta_3), \text{ м}^2. \quad (3.41)$$

Из равенства площадей треугольников ABC и CDE:

$$BC \cdot AC = CE \cdot CD. \quad (3.42)$$

По теореме  $\sin$  определим стороны BC, AC, CE, CD:

$$BC = \frac{(h_{нpy} - h_{нрк}) \cdot \sin(90 - \beta_2)}{\sin(\beta_2 - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.43)$$

$$AC = \frac{(h_{нpy} - h_{нрк}) \cdot \sin(90 + \beta_3)}{\sin(\beta_2 - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.44)$$

$$CE = \frac{\frac{h_{ocm}}{\sin \alpha'} \cdot \sin(\alpha' + \beta_3)}{\sin(\beta_2 - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.45)$$

$$CD = \frac{\frac{h_{ocm}}{\sin \alpha'} \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta_2)}{\sin(\beta_2 - \beta_3)}, \text{ м}. \quad (3.46)$$

Полученные выражения (3.43)–(3.46) подставим в равенство 3.42 и получим:

$$\left( \frac{h_{ocm}}{\sin \alpha'} \right)^2 \cdot \sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta_2) = (h_{нpy} - h_{нрк})^2 \cdot \sin(90 - \beta_2) \cdot \sin(90 + \beta_3). \quad (3.47)$$

Из выражения (3.47) определим величину  $h_{ост}$ :

$$h_{ocm} = \sin \alpha' \cdot \sqrt{\frac{(h_{нpy} - h_{нрк})^2 \cdot \sin(90 - \beta_2) \cdot \sin(90 + \beta_3)}{\sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta_2)}}, \text{ м}. \quad (3.48)$$

Высоту превышения конуса ПО после его консолидации и размыва дождевыми осадками над верхней площадкой насыпи вскрышных пород можно определить по формуле

$$h_{\text{нрк}} = \frac{a}{2} \cdot \text{tg} \beta_3, \text{ м.} \quad (3.49)$$

Тогда, для предохранения верхних площадок насыпи вскрышных пород от растекания на них пастообразного материала высоту заполнения пространства ПО необходимо определять по формуле:

$$h_{\text{зн}} = h - \sin \alpha' \cdot \sqrt{\frac{(h_{\text{нpy}} - \frac{a}{2} \cdot \text{tg} \beta_3)^2 \cdot \sin(90 - \beta_2) \cdot \sin(90 + \beta_3)}{\sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta_2)}}, \text{ м,} \quad (3.50)$$

или

$$h_{\text{зн}} = h - \sin \alpha' \cdot \sqrt{\frac{(h_{\text{нpy}} - \frac{a}{2} \cdot \text{tg} \beta_3)^2 \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \beta_3}{\sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(\alpha' + \beta_2)}}, \text{ м.} \quad (3.51)$$

Полученное выражение (3.51) действительно при условии:

$$\begin{cases} A = a - 2h \cdot \text{tg}(90 - \alpha') \geq 0 \\ H_{\text{к}} > h \end{cases}$$

Высота превышения ПО после консолидации над верхней площадкой насыпи вскрышных пород ( $h_{\text{нpy}}$ ) определяется по данным таблицы 2.8 и зависит от исходной высоты ПО ( $H_{\text{к}}$ ) и содержания твердого компонента в ПО.

Угол откоса ПО после консолидации ( $\beta_2$ ) также зависит от исходной высоты ПО ( $H_{\text{к}}$ ) и содержания твердого компонента в ПО и определяется по таблице 2.9.

В качестве примера произведем расчет высоты заполнения пространства ПО ( $h_{\text{зн}}$ ) по формуле (3.51) со следующими исходными данными: высота насыпи вскрышных пород ( $h$ ) – 20 м; расстояние между верхними бровками насыпи

вскрышных пород ( $a$ ) – 62,6 м; угол откоса более мелкой породы вскрыши отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород ( $\alpha'$ ) – 33 град; высота ПО при складировании ( $H_k$ ) – 37 м; угол откоса ПО при растекании ( $\beta_1$ ) – 29 град; высота превышения ПО после консолидации над верхней площадкой насыпи вскрышных пород ( $h_{пры}$ ) – 14,3 м; угол откоса ПО после консолидации ( $\beta_2$ ) – 24,5 град; угол откоса ПО после консолидации и размыва дождевыми осадками ( $\beta_3$ ) – 15 град.

$$h_{zn} = 20 - \sin 33 \cdot \sqrt{\frac{(14,3 - \frac{62,6}{2} \cdot \operatorname{tg} 15)^2 \cdot \cos 24,5 \cdot \cos 15}{\sin(33+15) \cdot \sin(33+24,5)}} = 16,2 \text{ м.}$$

Для технологической схемы складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород (рисунок 3.15), площадь заполняемого пространства ПО можно найти по формуле:

при площади заполняемого пространства, имеющего треугольную форму поперечного разреза:

$$S_{наст} = \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \beta_3)} + \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}(90 - \alpha')}, \text{ м}^2, \quad (3.52)$$

или

$$S_{наст} = \frac{a^2 \cdot \sin(\alpha' + \beta_3)}{4 \cos \alpha' \cdot \cos \beta_3}, \text{ м}^2; \quad (3.53)$$

при площади заполняемого пространства, имеющего трапецевидную форму поперечного разреза:



$$S_{насм} = \frac{a^2}{4tg(90 - \beta_3)} + (a - h \cdot tg(90 - \alpha')) \cdot h, \text{ м}^2, \quad (3.54)$$

или

$$S_{насм} = \frac{a^2 \cdot tg\beta_3}{4} + (a - h \cdot ctg\alpha') \cdot h, \text{ м}^2. \quad (3.55)$$

Тогда коэффициент использования пространства ПО можно найти следующим образом:

при площади заполняемого пространства, имеющего треугольную форму поперечного разреза:

$$k_u = \frac{\frac{a^2}{4tg(90 - \beta_3)} + \frac{a^2}{4tg(90 - \alpha')}}{\frac{a^2}{4tg(90 - \alpha')}}, \quad (3.56)$$

или

$$k_u = \frac{\sin(\alpha' + \beta_3)}{\sin \alpha' \cdot \cos \beta_3}; \quad (3.57)$$

при площади заполняемого пространства, имеющего трапециевидную форму поперечного разреза:

$$k_u = \frac{a^2 \cdot tg\beta_3}{4h(a - h \cdot ctg\alpha')} + 1. \quad (3.58)$$

Коэффициент использования пространства ПО в технологической схеме складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород (рисунок 3.15) будет варьироваться от 1,2 до 1,4.

Коэффициент использования вскрышных пород в технологической схеме складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород (рисунок 3.15) можно вычислить по следующим формулам:

при площади заполняемого пространства, имеющего треугольную форму поперечного разреза:

$$k_e = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha') \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta_3)}{a^2 \cdot (\operatorname{tg}(90 - \beta_3) + \operatorname{tg}(90 - \alpha'))}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.59)$$

или

$$k_e = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha') \cdot \cos \alpha' \cdot \cos \beta_3}{a^2 \cdot \sin(\alpha' + \beta_3)}, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (3.60)$$

при площади заполняемого пространства, имеющего трапециевидную форму поперечного разреза:

$$k_e = \frac{8h \cdot (B + h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta_3)}{(a^2 + h \cdot (a - h \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha')) \cdot 4 \operatorname{tg}(90 - \beta_3))}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.61)$$

или

$$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}{a^2 + h \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.62)$$

Значения коэффициента 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 (рисунок 3.15) представлены на рисунке 3.16, при высоте насыпи вскрышных пород 30 м и ширине насыпи вскрышных пород по гребню 40 м.

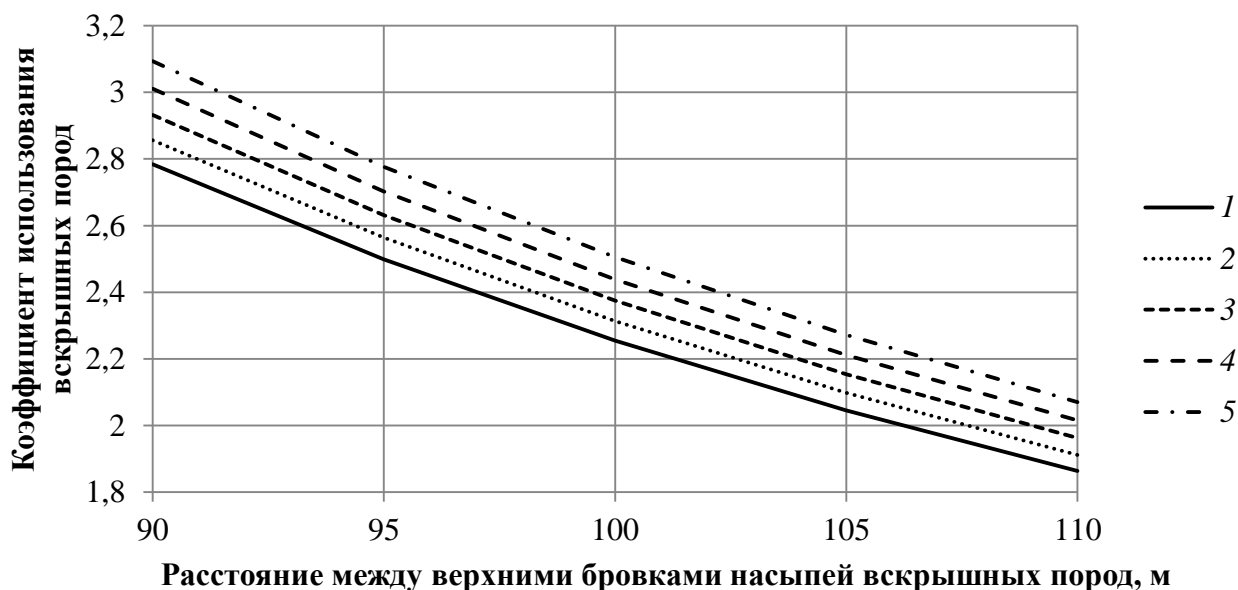


Рисунок 3.16 – Значения коэффициента использования вскрышных пород для технологической схемы складирования ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород в зависимости от расстояния между верхними бровками насыпи вскрышных пород, при высоте насыпи вскрышных пород 30 м и ширине насыпи вскрышных пород по гребню 40 м, при плотности ПО: 1 – 2,1; 2 – 2,0; 3 – 1,9; 4 – 1,8; 5 – 1,7 т/м<sup>3</sup>

Решение 2. Складирование ПО в создаваемое пространство, ограниченное насыпями вскрышных пород, с монтированием пульпопровода на всю ширину создаваемого пространства, подвешивая его на гибкой опоре в точке поворотного пункта (рисунок 3.17). Складирование ПО производится веером с обратным ходом. По мере заполнения пространства ПО производится демонтаж секции пульпопровода с верхней площадки насыпи вскрышных пород и его монтаж в новой точке поворотного пункта. Влияние длины демонтируемой секции

пульпопровода на коэффициент использования пространства ПО представлено на рисунке 3.18.

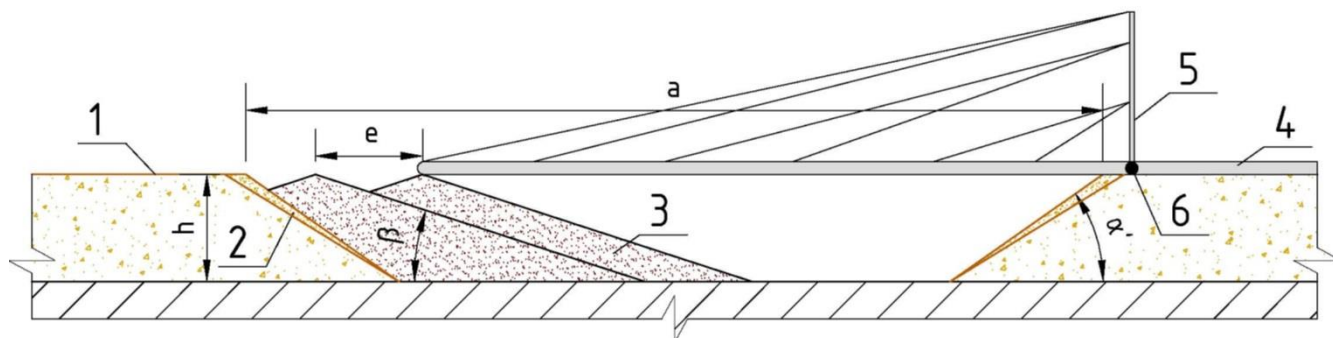


Рисунок 3.17 – Схема складирования ПО веером с обратным ходом:

1 – насыпь вскрышных пород; 2 – мелкая порода вскрыши, отсыпанная на внутренние откосы насыпи вскрышных пород; 3 – ПО обогащения; 4 – пульпопровод; 5 – гибкая опора пульпопровода; 6 – точка поворотного пункта пульпопровода;  $e$  – длина демонтируемой секции пульпопровода, м;  $a$  – расстояние между верхними бровками насыпей вскрышных пород, м;  $h$  – высота насыпи вскрышных пород, м;  $\alpha'$  – угол откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы насыпей вскрышных пород, град

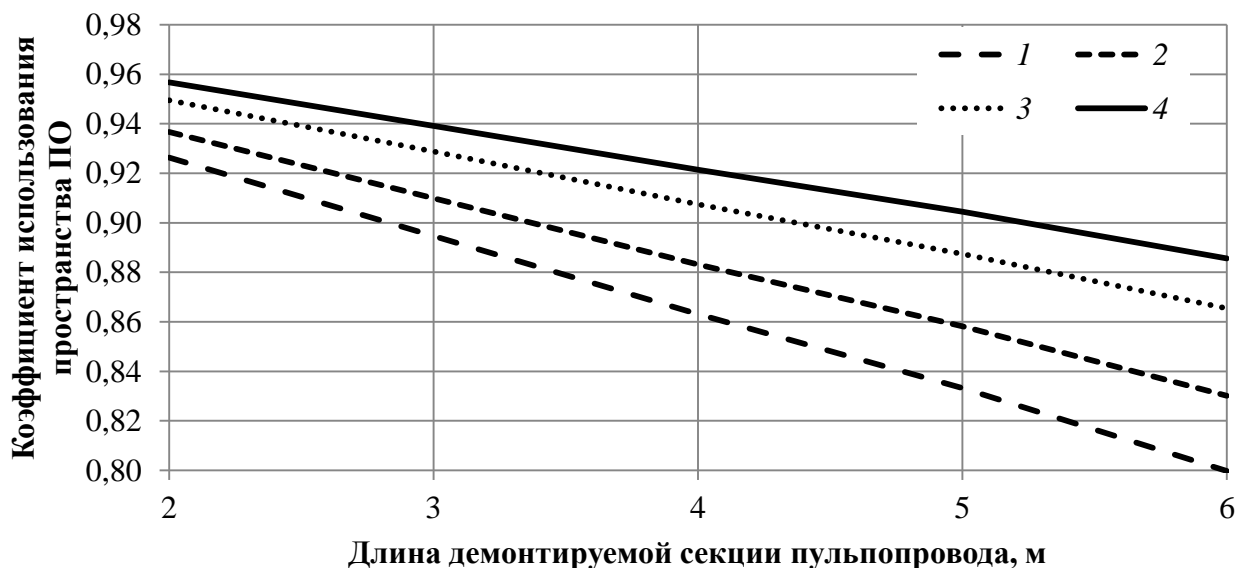


Рисунок 3.18 – Зависимость длины демонтируемой секции пульпопровода на коэффициент использования пространства ПО при плотности ПО: 1 – 2,1; 2 – 2; 3 – 1,9; 4 – 1,8 т/м<sup>3</sup>

Недостатком данной технологической схемы является остановка насосного оборудования при демонтаже секции пульпопровода, что может негативно повлиять на работу пульпопровода в зимний период.

Коэффициент использования вскрышных пород при данной технологической схеме складирования ПО можно определить по следующей формуле:

$$k_e = \frac{2 \cdot (B + h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')}{G \cdot k_u \cdot (a - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha')} \quad (3.63)$$

Значения коэффициента использования вскрышных пород для данной технологической схемы складирования ПО представлены на рисунке 3.19.



Рисунок 3.19 – Изменение коэффициента использования вскрышных пород в технологической схеме складирования ПО веером с обратным ходом, в зависимости от расстояния между верхними бровками насыпей вскрышных пород

Решение 3. При складировании ПО между насыпью вскрышных пород и наклонным основанием. Предлагается производить складирование ПО со стороны наклонного основания с превышением над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород  $h_{np}$  (рисунок 3.20).

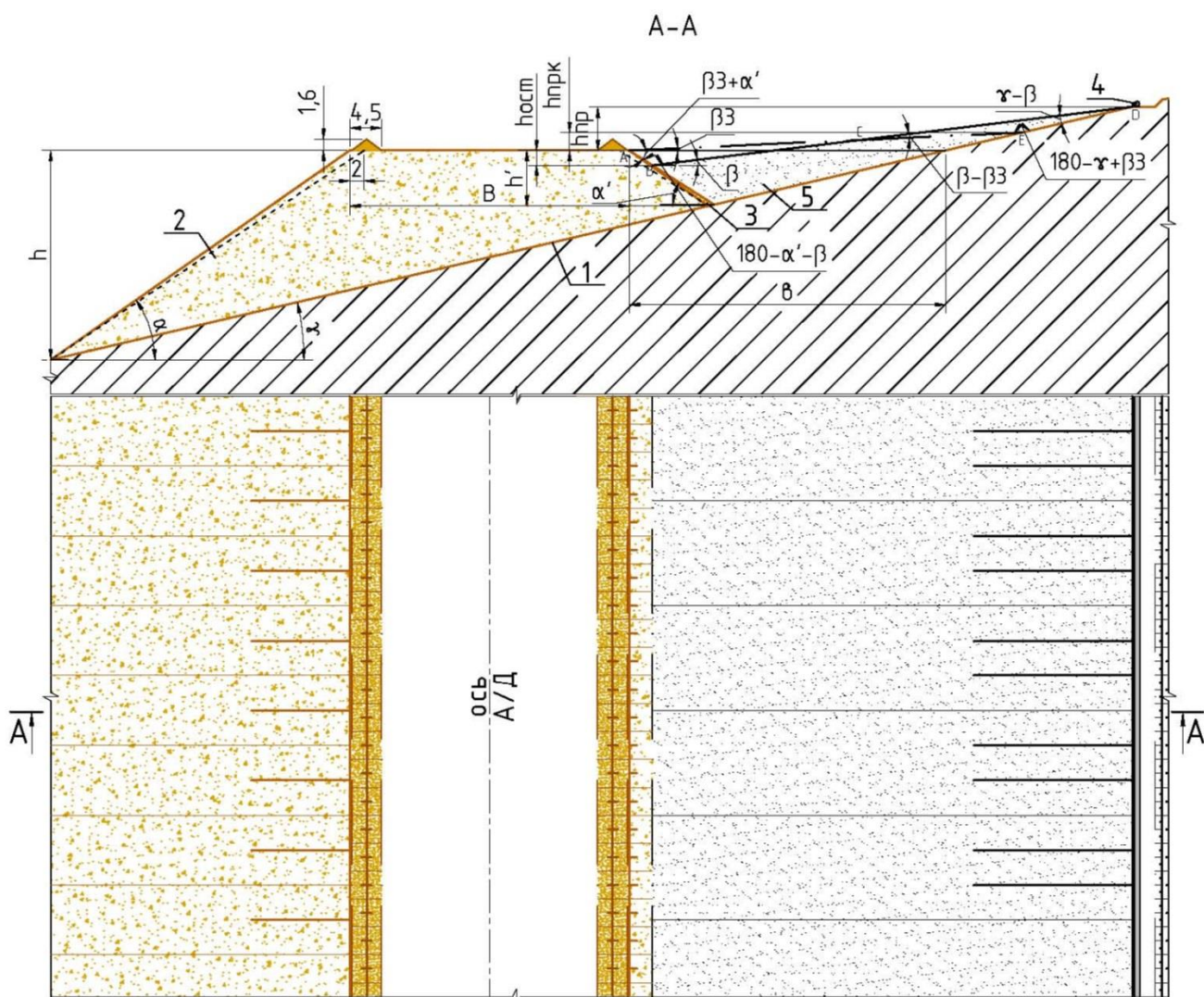


Рисунок 3.20 – Технологическая схема складирования ПО на наклонном основании со стороны склона с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород:

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

Укладка ПО данным способом возможна только при условии  $\gamma > \beta$ , т.е. при таких физико-механических свойствах ПО, которые при растекании образуют угол откоса меньше, чем угол наклона основания.

Для предохранения верхней площадки насыпи вскрышных пород от растекания на неё ПО при размыве дождевыми осадками необходимо заполнять созданное пространство между насыпью вскрышных пород и наклонным

основанием до высоты  $h_{зн}$ , которая меньше высоты насыпи вскрышных пород со стороны склона  $h'$  на величину  $h_{осм}$ .

Вычислить величину  $h_{осм}$  можно из равенства площадей треугольников ABC и CDE (рисунок 3.20).

Площадь треугольника ABC можно определить по формуле

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \cdot BC \cdot AC \cdot \sin(\beta - \beta_3), \text{ м}^2. \quad (3.64)$$

Площадь треугольника CDE можно определить по формуле

$$S_{CDE} = \frac{1}{2} \cdot CE \cdot CD \cdot \sin(\beta - \beta_3), \text{ м}^2. \quad (3.65)$$

Из равенства площадей треугольников ABC и CDE

$$BC \cdot AC = CE \cdot CD. \quad (3.66)$$

По теореме sin определим стороны BC, AC, CE, CD:

$$BC = \frac{\frac{h_{осм}}{\sin \alpha'} \cdot \sin(\beta_3 + \alpha')}{\sin(\beta - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.67)$$

$$AC = \frac{\frac{h_{осм}}{\sin \alpha'} \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta)}{\sin(\beta - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.68)$$

$$CE = \frac{\frac{h_{np} - h_{npк}}{\sin \gamma} \cdot \sin(\gamma - \beta)}{\sin(\beta - \beta_3)}, \text{ м}; \quad (3.69)$$

$$CD = \frac{\frac{h_{np} - h_{npк}}{\sin \gamma} \cdot \sin(180 - \gamma + \beta_3)}{\sin(\beta - \beta_3)}, \text{ м}. \quad (3.70)$$

Полученные выражения (3.67)–(3.70) подставим в равенство (3.66), получим:

$$\left(\frac{h_{ocm}}{\sin \alpha'}\right)^2 \cdot \sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta) = \left(\frac{h_{np} - h_{npк}}{\sin \gamma}\right)^2 \cdot \sin(180 - \gamma + \beta_3) \cdot \sin(\gamma - \beta). \quad (3.71)$$

Из полученного выражения (3.71) определим  $h_{ocm}$ :

$$h_{ocm} = \sin \alpha' \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{h_{np} - h_{npк}}{\sin \gamma}\right)^2 \cdot \sin(180 - \gamma + \beta_3) \cdot \sin(\gamma - \beta)}{\sin(\alpha' + \beta_3) \cdot \sin(180 - \alpha' - \beta)}}, \text{ м}. \quad (3.72)$$

Высоту превышения ПО со стороны склона после его размыва дождевыми осадками над верхней площадкой насыпи вскрышных пород можно определить по формуле

$$h_{npк} = \frac{e \cdot \sin \beta_3 \cdot \sin \gamma}{\sin(\gamma - \beta_3)}, \text{ м}. \quad (3.73)$$

В технологической схеме складирования ПО на наклонном основании со стороны склона, с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи



вскрышных пород (рисунок 3.20), площадь заполняемого пространства ПО можно найти по формуле

$$S_{наст} = \frac{e \cdot h'}{2} + \frac{e^2 \cdot \sin \beta_3 \cdot \sin(180 - \gamma)}{2 \sin(\gamma - \beta_3)}, \text{ м}^2. \quad (3.74)$$

Коэффициент использования пространства ПО в технологической схеме складирования ПО на наклонном основании со стороны склона, с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород (рисунок 3.20), составит:

$$k_u = 1 + \frac{e \cdot \sin \beta_3 \cdot \sin(180 - \gamma)}{h' \cdot \sin(\gamma - \beta_3)}. \quad (3.75)$$

Значения коэффициента использования пространства ПО для технологической схемы складирования ПО на наклонном основании со стороны склона, с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород (рисунок 3.20), в зависимости от высоты насыпи вскрышных пород со стороны склона, представлены на рисунке 3.21.

Коэффициент использования вскрышных пород для технологической схемы складирования ПО на наклонном основании со стороны склона, с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород (рисунок 3.20), можно найти из выражения:

$$k_e = \frac{2h \cdot (B + h \cdot ctg \alpha') - (B + 2h \cdot ctg \alpha')^2 \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \sin \alpha'}{\sin(\gamma + \alpha')}}{\frac{e \cdot h'}{2} + \frac{e^2 \cdot \sin \beta_3 \cdot \sin(180 - \gamma)}{2 \sin(\gamma - \beta_3)}}. \quad (3.76)$$



Рисунок 3.21 – Зависимость коэффициента использования пространства ПО от высоты насыпи вскрышных пород со стороны склона для технологической схемы складирования ПО на наклонном основании со стороны склона, с превышением выпуска над уровнем верхней площадки насыпи вскрышных пород

Представленные технологические решения по увеличению коэффициента использования пространства ПО, а именно складирование ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород (рисунок 3.15) и складирование ПО веером с обратным ходом (рисунок 3.17), показывают высокую эффективность при складировании ПО с высоким содержанием твердого компонента.

### **3.5 Систематизация предложенных технологических схем складирования пастообразных отходов**

Систематизация предложенных технологических схем складирования ПО представлена на рисунке 3.22.

### Технологические схемы складирования ПО

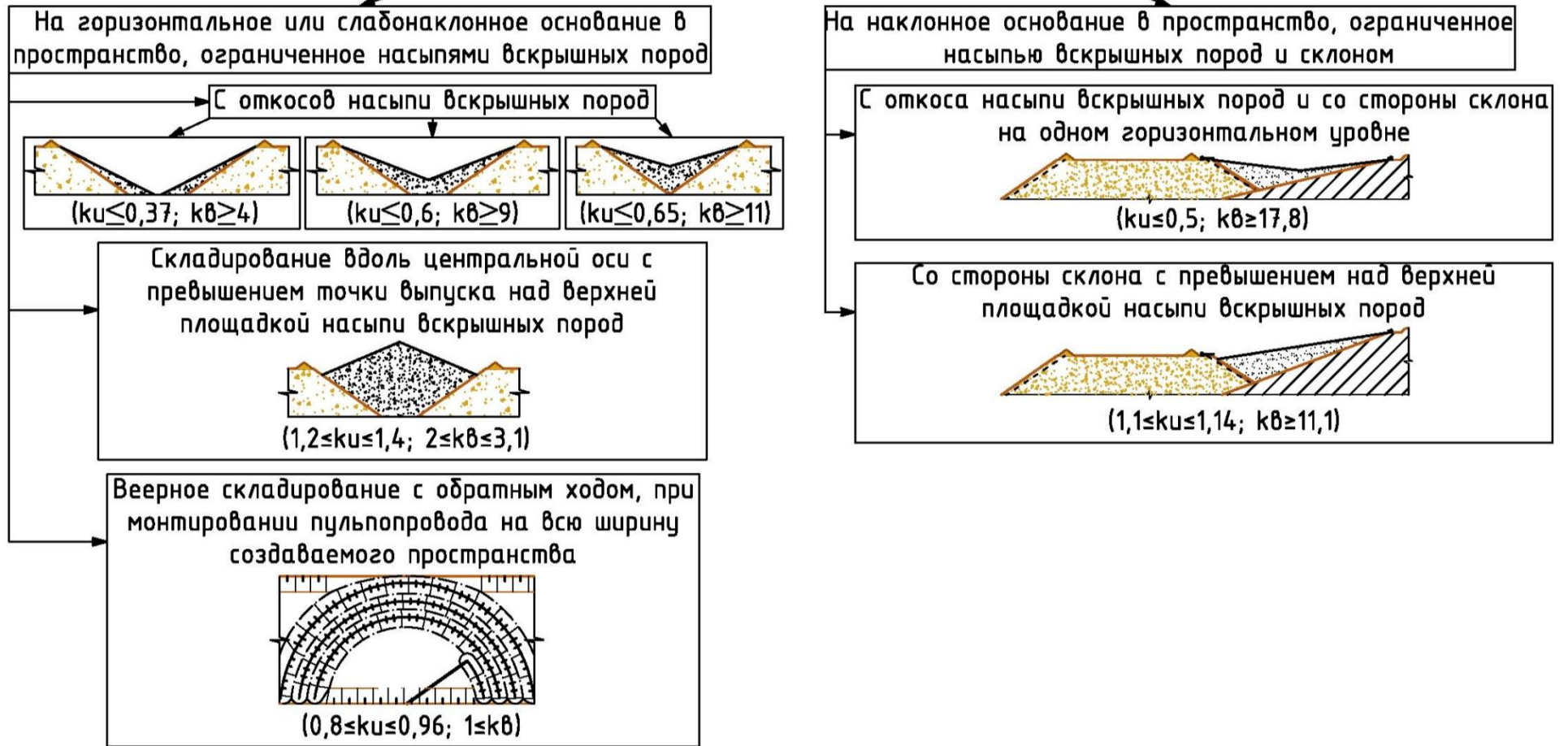


Рисунок 3.22 – Систематизация предложенных технологических схем складирования ПО

### 3.6 Оценка площадей, занимаемых пастообразными отходами

Оценку площадей, занимаемых ПО, произвели на примере месторождения рудного золота Боголюбовское, расположенного в Мотыгинском районе Красноярского края.

На данном месторождении запроектировано хвостохранилище для складирования отходов обогащения в течение 10 лет эксплуатации обогатительной фабрики, при производительности 500 тыс. т руды в год.

Полезная емкость хвостохранилища обеспечивает возможность складирования 3850 тыс. м<sup>3</sup> отходов обогатительного передела, при этом его площадь на конец эксплуатации составит 390 тыс. м<sup>2</sup> [97].

При этом содержание твердого в пульпе – 29,18 %; удельный вес твердого – 2,9 т/м<sup>3</sup>; плотность пульпы – 1,174 т/м<sup>3</sup>.

За весь период эксплуатации месторождения в хвостохранилище поступит 4258,9 тыс. м<sup>3</sup> отходов.

При сгущении отходов обогатительного передела руд до пастообразного состояния объем пасты за весь срок эксплуатации месторождения Боголюбовское представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Объем ПО за весь срок эксплуатации месторождения Боголюбовское в зависимости от плотности сгущения

Параметр	Величина								
	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Плотность пастообразных отходов, т/м <sup>3</sup>	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10
Объем ПО за весь срок эксплуатации месторождения Боголюбовское, тыс. м <sup>3</sup>	3030,3	2941,2	2857,1	2777,8	2702,7	2631,6	2564,1	2500,0	2381,0

Рассчитаем площадь, занимаемую ПО с разной плотностью сгущения, при складировании следующими способами:

- складирование ПО в пространство с откосов отвалов вскрышных пород (рисунок 3.1);

- складирование ПО в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, веером с обратным ходом (рисунок 3.17);

- складирование ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород (рисунок 3.15).

Полученные результаты представим в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Оценка площадей, занимаемых ПО разной плотности сгущения

Параметр	Величина								
	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0	72,4
Плотность пастообразных отходов ( $\rho_{ПО}$ ), т/м <sup>3</sup>	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10
Угол откоса ПО при растекании ( $\beta$ ), град	12,8	14,1	15,4	16,8	18,4	20,2	22,1	24,2	29,0
Объем ПО за весь срок эксплуатации месторождения Боголюбовское, тыс. м <sup>3</sup>	3030,3	2941,2	2857,1	2777,8	2702,7	2631,6	2564,1	2500,0	2381,0
Угол откоса ПО после консолидации и размыва дождевыми осадками ( $\beta_3$ ), град	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
$tg\beta_3$	0,18	0,19	0,19	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27
<b>Складирование ПО в пространство с откосов отвалов вскрышных пород</b>									
Параметры пространства, ограниченного отвалом вскрышных пород									
Высота ( $h$ ), м	30,0								
Расстояние между верхними бровками отвалов вскрышных пород ( $a$ ), м	100,0								
Угол откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы отвалов вскрышных пород ( $\alpha'$ ), град	33,0								
Площадь пространства, ограниченная отвалами вскрышных пород, в поперечном разрезе, занятая ПО, м <sup>2</sup>	1044,6	988,5	926,3	857,4	-	-	-	-	-
Требуемая длина пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, под ПО в плане (с учетом коэффициента использования пространства ПО в плане)*, м	2975,3	3067,5	3196,3	3374,9	-	-	-	-	-
Коэффициент использования пространства ПО в плане*	0,98	0,97	0,97	0,96	-	-	-	-	-
Площадь, занимаемая ПО в плане, га	29,8	30,7	32,0	33,7	-	-	-	-	-
Сокращение площади в сравнении со строительством хвостохранилища, %	23,7	21,3	18,0	13,5	-	-	-	-	-
<b>Складирование ПО в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, веером с обратным ходом</b>									
Параметры пространства, ограниченного отвалом вскрышных пород									
Высота ( $h$ ), м	30,0								
Расстояние между верхними бровками отвалов вскрышных пород ( $a$ ), м	200,0								
Угол откоса мелкой породы вскрыши, отсыпанной на внутренние откосы отвалов вскрышных пород ( $\alpha'$ ), град	33,0								
Коэффициент использования пространства ПО в зависимости от длины демонтируемой секции пульпопровода	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93
Площадь пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, в поперечном разрезе, занятая ПО, м <sup>2</sup>	4498,8	4475,7	4452,6	4429,6	4406,5	4383,4	4360,3	4337,3	4291,1

Параметр	Величина								
	Содержание твердого компонента в ПО, %	56,8	58,6	60,3	62,0	63,8	65,5	67,2	69,0
Плотность пастообразных отходов ( $\rho_{ПО}$ ), т/м <sup>3</sup>	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,10
Требуемая длина пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, под ПО в плане, м	673,6	657,1	641,7	627,1	613,3	600,3	588,1	576,4	554,9
Площадь, занимаемая ПО в плане, га	13,5	13,1	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,1
Сокращение площади в сравнении со строительством хвостохранилища, %	65,5	66,3	67,1	67,8	68,5	69,2	69,8	70,4	71,5
<b>Складирование ПО вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород</b>									
Параметры пространства, ограниченного отвалом вскрышных пород									
Высота ( $h$ ), м	30,0								
Расстояние между верхними бровками отвалов вскрышных пород ( $a$ ), м	100,0								
Угол откоса мелкой породы вскрыши отсыпанной на внутренние откосы отвалов вскрышных пород ( $\alpha'$ ), град	33,0								
$ctga'$	1,54								
Площадь пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, в поперечном разрезе, занятая ПО (формула 3.55), м <sup>2</sup>	2054,9	2077,5	2100,1	2145,5	2191,3	2214,3	2237,4	2260,7	2284,0
Требуемая длина пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, под ПО в плане (с учетом коэффициента использования пространства ПО в плане*), м	1158,3	1100,0	1045,7	974,0	908,5	866,3	826,7	789,6	736,7
Коэффициент использования пространства ПО в плане*	1,27	1,29	1,30	1,33	1,36	1,37	1,39	1,40	1,42
Площадь, занимаемая ПО в плане, га	11,6	11,0	10,5	9,7	9,1	8,7	8,3	7,9	7,4
Сокращение площади в сравнении со строительством хвостохранилища, %	70,3	71,8	73,2	75,0	76,7	77,8	78,8	79,8	81,1

*Примечание. \*Коэффициент использования пространства ПО в плане зависит от расстояния между выпусками ПО, соответствует коэффициенту использования пространства ПО, зависящего от длины демонтируемой секции пульпопровода, значения которого представлены на рисунке 3.18*

Сгущение отходов обогатительного передела руд до пастообразного состояния и складирование их в пространство, ограниченное отвалами вскрышных пород, позволит на месторождении рудного золота Боголюбовское исключить до 80 % потери земель, занимаемых проектным хвостохранилищем.

### **3.7 Технология отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения на примере месторождения Боголюбовское**

Складирование пустых пород на Боголюбовском месторождении производится во внешний отвал. Способ отвалообразования – бульдозерный.

Отвал пустых пород формируется последовательно в три яруса высотой 30 м каждый. Изначально отсыпается первый, нижний, ярус до его конечных размеров, после второй ярус до конечных размеров, далее третий ярус. Календарный план вскрышных работ по месторождению Боголюбовское представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Календарный план вскрышных работ по месторождению Боголюбовское

Показатель	Ед. изм.	Годы эксплуатации										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Горная масса	тыс. м <sup>3</sup>	9000	9273	9000	9000	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Вскрыша	тыс. м <sup>3</sup>	<b>8598</b>	<b>8854</b>	<b>8694</b>	<b>8760</b>	<b>7189</b>	<b>7266</b>	<b>7194</b>	<b>7215</b>	<b>7177</b>	<b>7164</b>	<b>7249</b>
Коэффициент вскрыши	м <sup>3</sup> /т	26,0	17,7	17,4	17,5	14,4	14,5	14,4	14,4	14,4	14,3	14,5

В диссертационной работе рассматривается складирование ПО в создаваемое пространство при формировании отвала вскрышных пород вблизи обогатительной фабрики.

В связи с тем, что в первый год отработки Боголюбовского месторождения дорабатываются окисленные руды, перерабатываемые по технологии кучного выщелачивания, поступлений ПО в отвал не ожидается. Поэтому в первый год разработки месторождения существует возможность формирования отвала в три яруса и создания в верхнем ярусе пространства для складирования ПО плотностью 2 т/м<sup>3</sup> на протяжении трех лет (рисунок 3.23). Параметры пространства следующие: длина – 400 м, ширина – 100 м, глубина – 30 м. В последующие годы возможно последовательное формирование ярусов отвалов. Для складирования всего объема ПО потребуется создание трех пространств представленных параметров.

Конечное положение отвала скальных вскрышных пород со складированными в него ПО представлено на рисунке 3.24.

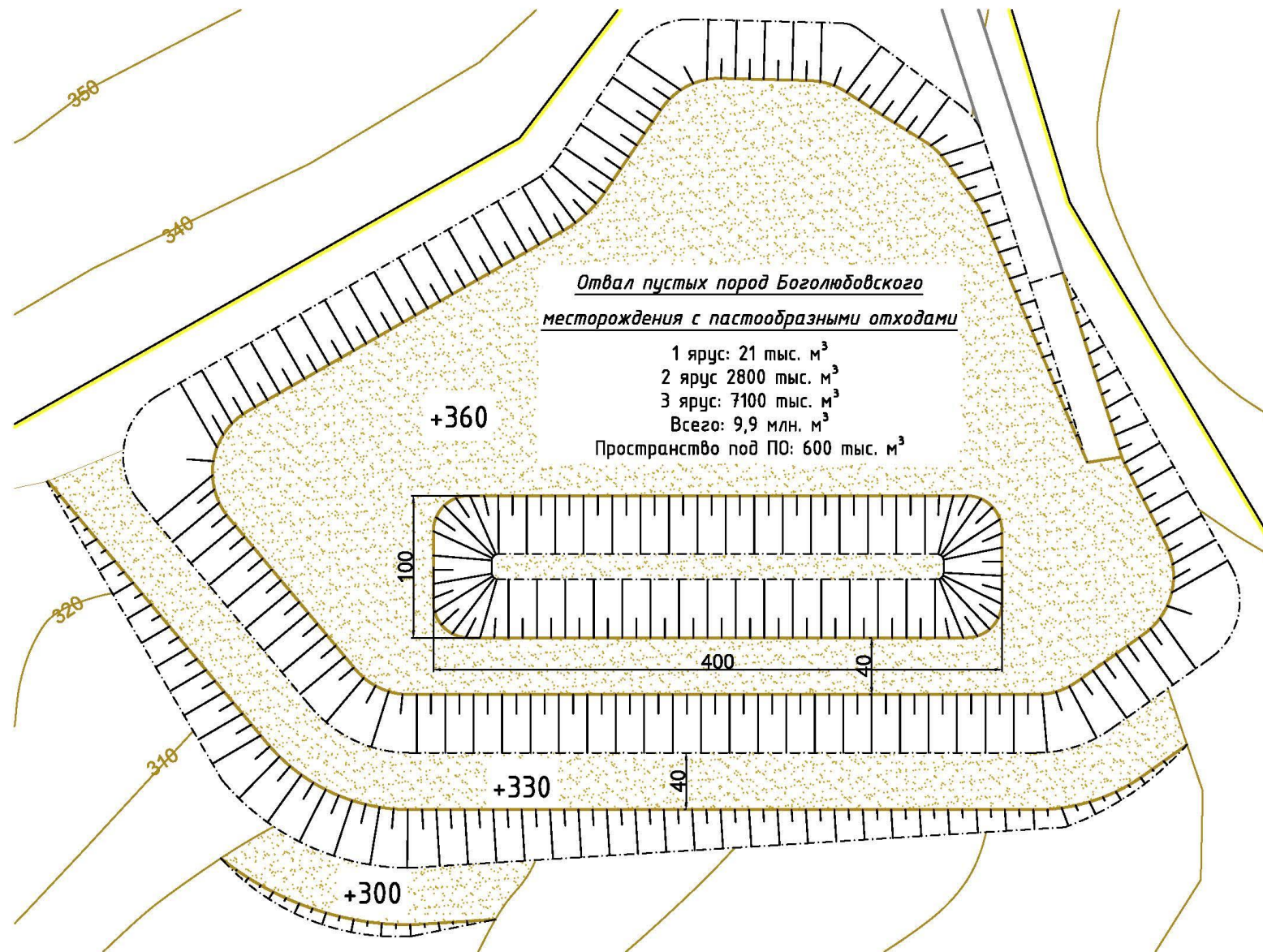


Рисунок 3.23 – Формирование отвала с пространством под ПО в первый год разработки Боголюбовского месторождения



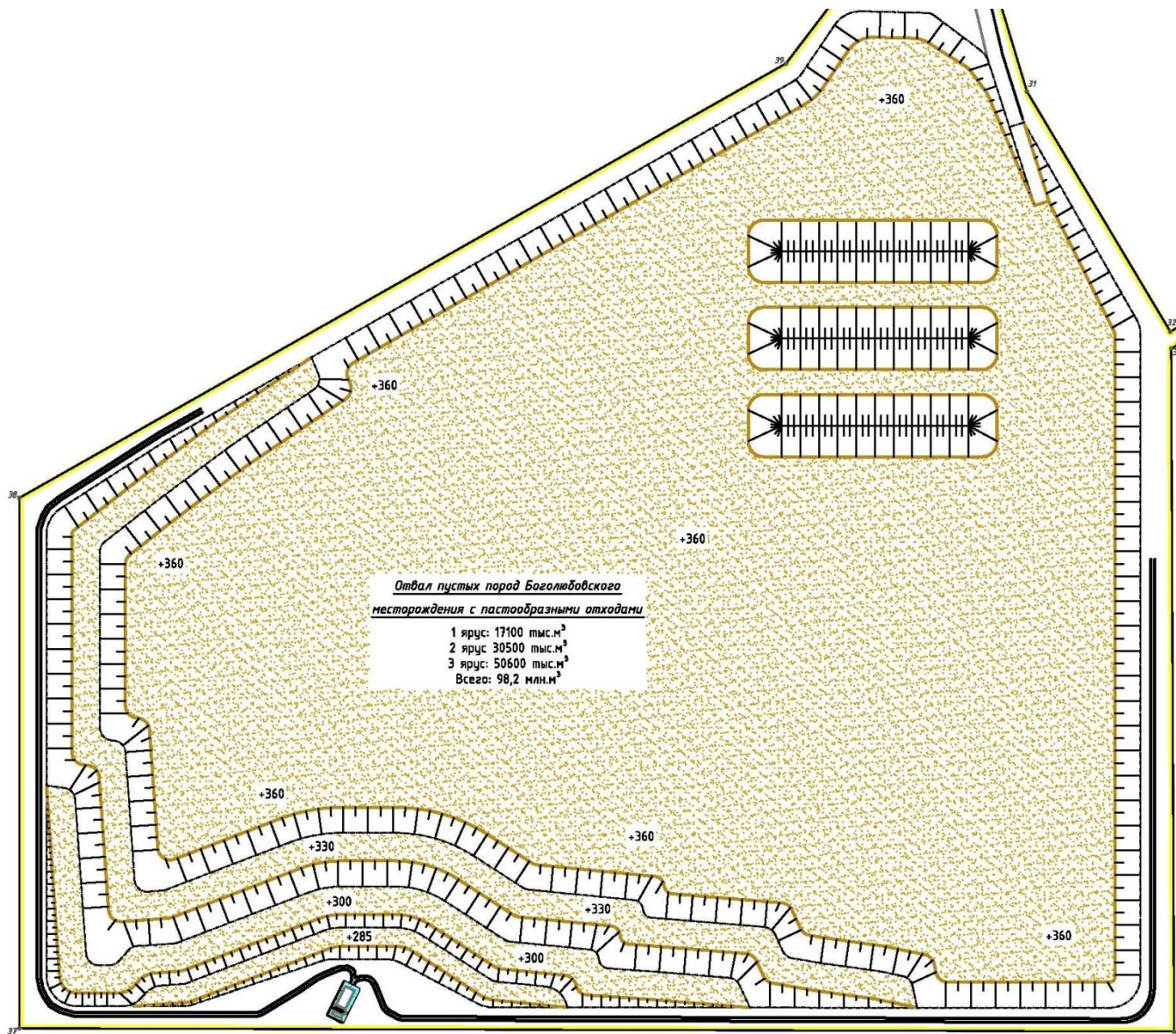


Рисунок 3.24 – Конечное положение отвала вскрышных пород со складированными в него ПО



Выполним расчет первого элемента системы – насыпи вскрышных пород.  
Определим вес насыпи с учетом треугольника  $CIDF$ :

$$P_{омв} = S_{ABCD} \cdot \gamma_{омв} + S_{CIDF} \cdot \gamma_{наст}, \text{ Т}, \quad (3.77)$$

где  $S_{ABCD}$  и  $S_{CIDF}$  – площади фигур на рисунке 3.23, м<sup>2</sup>;  $\gamma_{омв}$  и  $\gamma_{наст}$  – объемный вес пород насыпи и ПО, т/м<sup>3</sup>.

Вычислим нормальные силы блока, действующие на основание  $AD$ :

$$N_{омв} = P_{омв} \cdot \cos \delta, \text{ Т}. \quad (3.78)$$

Вычислим сдвигающие силы, действующие на призму возможного обрушения по поверхности скольжения  $AD$ :

$$T_{омв} = P_{омв} \cdot \sin \delta, \text{ Т}. \quad (3.79)$$

Определим удерживающие силы в соответствии с теорией предельного равновесия для данного расчетного элемента по поверхности скольжения  $AD$ :

$$T_{омв.уд} = k_{омв} \cdot |AD| + N_{омв} \cdot \operatorname{tg} \rho_{омв}, \text{ Т}, \quad (3.80)$$

где  $k_{омв}$  – сцепление пород в отвале, т/м<sup>2</sup>;  $\rho_{омв}$  – угол внутреннего трения пород в отвале, град.

Выполним расчет второго элемента системы – ПО.

Вычислим вес ПО – фигуры  $EDF$ :

$$P_{наст} = S_{EDF} \cdot \gamma_{наст}, \text{ Т}. \quad (3.81)$$

Вычислим нормальные силы, действующие на основание ПО длиной  $DE$ :

$$N_{насм} = P_{насм} \cdot \cos \delta, \text{ т.} \quad (3.82)$$

Вычислим сдвигающие силы, действующие на призму возможного обрушения, по поверхности скольжения  $DE$ :

$$T_{насм} = P_{насм} \cdot \sin \delta, \text{ т.} \quad (3.83)$$

Определим удерживающие силы в соответствии с теорией предельного равновесия для расчетного элемента системы – ПО по поверхности скольжения  $DE$ :

$$T_{насм.уд} = k_{насм} \cdot |DE| + N_{насм} \cdot \text{tg} \rho_{насм}, \text{ т.} \quad (3.84)$$

Составим уравнение предельного равновесия системы «насыпь–ПО». Определим суммарные сдвигающие и удерживающие силы системы:

$$T_{сдв} = T_{отв} + T_{насм}, \text{ т.} \quad (3.85)$$

$$T_{уд} = T_{отв.уд} + T_{насм.уд}, \text{ т.} \quad (3.86)$$

Коэффициент запаса системы определим как отношение удерживающих и сдвигающих сил, действующих по линии  $AE$ :

$$n = T_{уд} / (T_{сдв} \cdot n_3), \quad (3.87)$$

где  $n_3$  – нормативное значение коэффициента запаса устойчивости, принят согласно методическим указаниям [93] и составляет 1,3.

Результаты выполненных расчетов представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Расчет устойчивости системы «насыпь–ПО»

Параметры	Ед. измер.	Значение					
Угол наклона основания, $\delta$	град	13,7	14,3	14,9	15,5	16,3	17,0
$\cos\delta$		0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96
$\sin\delta$		0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
Объемный вес пород в насыпи, $\gamma_{отв}$	т/м <sup>3</sup>	2,9					
Объемный вес ПО, $\gamma_{наст}$	т/м <sup>3</sup>	2,0					
Площадь фигуры ABCD, $S_{ABCD}$	м <sup>2</sup>	1057,1	1009,0	962,3	916,2	856,0	804,4
Площадь фигуры C1DF, $S_{C1DF}$	м <sup>2</sup>	41,3	32,4	24,7	18,2	11,2	6,7
Площадь фигуры EDF, $S_{EDF}$	м <sup>2</sup>	1207,0	698,6	421,6	256,3	127,5	86,8
Длина основания  AD	м	93,2	92,2	91,1	90,0	88,7	87,5
Длина основания  DE	м	278,1	181,7	125,5	89,0	56,5	45,5
Вес насыпи вскрышных пород с учетом треугольника C1DF, $P_{отв}$	т	3152,3	2995,0	2843,0	2695,0	2505,9	2346,8
Вес ПО, фигуры EDF, $P_{наст}$	т	2534,7	1467,0	885,4	538,2	267,8	182,3
Нормальные силы блока действующие на основание AD, $N_{отв}$	т	3062,6	2902,0	2747,0	2597,0	2405,2	2244,3
Нормальные силы блока действующие на основание DE, $N_{наст}$	т	2462,6	1422,0	855,6	518,7	257,0	174,3
Сдвигающие силы, действующие на призму возможного обрушения по поверхности скольжения AD, $T_{отв}$	т	746,6	739,8	730,9	720,3	703,3	686,1
Сдвигающие силы, действующие на призму возможного обрушения по поверхности скольжения DE, $T_{наст}$	т	600,3	362,4	227,7	143,8	75,1	53,3
Сцепление пород в насыпи вскрышных пород, $k_{отв}$	т/м <sup>2</sup>	7,6					
Сцепление в ПО, $k_{наст}$	т/м <sup>2</sup>	0,5					
Угол внутреннего трения пород в насыпи, $\rho_{отв}$	град	30,8					
Угол внутреннего трения в ПО, $\rho_{наст}$	град	9					
Удерживающие силы расчетного элемента по поверхности AD, $T_{отв,уд}$	т	2534,0	2431,0	2330,0	2232,0	2107,9	2002,9
Удерживающие силы расчетного элемента по поверхности DE, $T_{наст,уд}$	т	529,1	316,0	198,3	126,6	69,0	50,4
Суммарные сдвигающие силы, $T_{сдв}$	т	1346,9	1102,0	958,6	864,1	778,5	739,4
Суммарные удерживающие силы, $T_{уд}$	т	3063,1	2747,0	2528,0	2359,0	2176,9	2053,2
Нормативный коэффициент запаса устойчивости, $n_3$		1,3					
Коэффициент запаса устойчивости системы, $n$		1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,1

Выполним расчет устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании на основании теории предельного равновесия сыпучей среды, при допущении деформаций по круглоцилиндрической поверхности по прочностным свойствам отвальных пород [99].

В верхних слоях отвала прочностные характеристики пород несколько ниже, чем самого отвала в связи с влиянием внешних условий: дождь, снег, выветривание и др. Поэтому принимаем следующие расчетные характеристики для нагруженного отвала:

$$K_n = \frac{7,6}{1,3} = 5,8 \text{ м/м}^2; \quad (3.88)$$

$$\operatorname{tg} \rho_n = \frac{\operatorname{tg} 30,8^\circ}{1,3} = 0,4586; \quad (3.89)$$

$$\rho_n = 26,3^\circ. \quad (3.90)$$

Объемная масса с учетом коэффициента разрыхления:

$$\gamma_{отв} = \frac{\gamma}{K_p} = \frac{2,9}{1,25} = 2,32 \text{ т/м}^3. \quad (3.91)$$

Произведем оценку устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании по поверхности  $AC$  и дополнительно по поверхностям  $A'B'$ ,  $A''B'$  (рисунок 3.26).

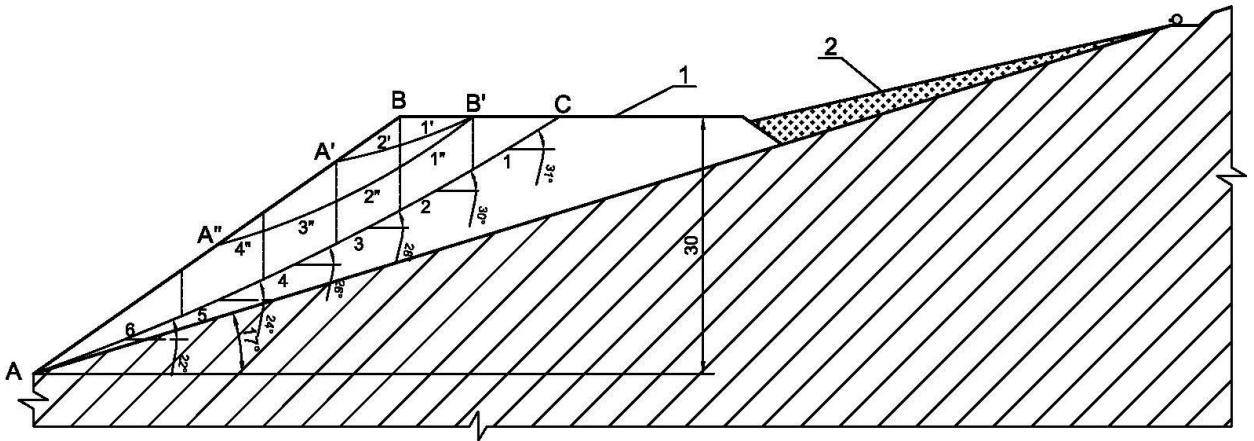


Рисунок 3.26 – Схема к расчету устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании

Все необходимые данные для определения коэффициента запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании по поверхностям  $AC$ ,  $A'B'$ ,  $A''B''$  приведены в таблицах 3.7–3.9.

Таблица 3.7 – Вычисление коэффициента запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения на наклонном основании по поверхности  $AC$

№ п/п	$a$	$h$	$\rho$	$P$	$\phi$	$\sin\phi$	$T_{сдв}$	$\cos\phi$	$N$	$\iota$	$\delta$	$\tau$	$T_{y0}$
1	10,0	3,8	2,32	88,2	31	0,515	45,4	0,857	75,6	10,0	7,6	6,0	60,0
2	8,5	8,7	2,32	171,6	30	0,500	85,8	0,866	148,6	8,5	17,5	12,0	102,0
3	7,5	10,1	2,32	175,7	28	0,469	82,5	0,883	155,2	7,5	20,7	13,0	97,5
4	8,5	8,7	2,32	171,6	26	0,438	75,2	0,899	154,2	8,5	18,1	12,3	104,55
5	9,6	6,4	2,32	142,5	24	0,407	58,0	0,914	130,2	9,6	13,6	10,0	96,0
6	17,3	3,2	2,32	128,4	22	0,375	48,1	0,927	119,1	17,3	6,9	5,0	86,5
<b>Итого</b>							395,0						546,55

Таблица 3.8 – Вычисление коэффициента запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения на наклонном основании по поверхности  $A'B'$

№ п/п	$a$	$h$	$\rho$	$P$	$\phi$	$\sin\phi$	$T_{сдв}$	$\cos\phi$	$N$	$\iota$	$\delta$	$\tau$	$T_{y0}$
1'	8,5	2,1	2,32	41,4	23	0,391	16,2	0,921	38,1	8,5	4,5	4,0	34,0
2'	7,5	2,1	2,32	36,5	16	0,276	10,1	0,961	35,1	7,5	4,7	4,1	30,75
<b>Итого</b>							26,3						64,75

Таблица 3.9 – Вычисление коэффициента запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения на наклонном основании по поверхности  $A''B''$

№ п/п	$a$	$h$	$\rho$	$P$	$\phi$	$\sin\phi$	$T_{сдв}$	$\cos\phi$	$N$	$l$	$\delta$	$\tau$	$T_{y\delta}$
1"	8,5	3,2	2,32	63,1	36	0,588	37,1	0,809	51,1	8,5	6,0	4,8	40,8
2"	7,5	5,1	2,32	88,7	29	0,485	43,0	0,875	77,6	7,5	10,3	7,0	52,5
3"	8,5	3,6	2,32	71,0	23	0,391	27,7	0,921	65,3	8,5	7,7	6,1	51,85
4"	5,5	1,5	2,32	19,1	18	0,309	5,9	0,951	18,2	5,5	3,3	3,5	19,25
<b>Итого</b>							113,8						164,4

В таблицах 3.7–3.9 использованы следующие обозначения:

$a_i$  – ширина элементарного блока, на которые разбита призма, примыкающая к откосу и ограниченная расчетной (наиболее напряженной) поверхностью, м;

$h_i$  – высота (средняя) элементарного блока, м;

$\rho$  – объемный вес отвальной массы с учетом коэффициента разрыхления, т/м<sup>3</sup>;

$P_i = a_i \cdot h_i \cdot \rho$  – вес элементарного блока, т;

$\phi_i$  – угол наклона основания элементарного блока, град;

$T_{i\text{сдв}} = P_i \cdot \sin\phi_i$  – касательная составляющая веса элементарного блока, действующая вдоль его основания, т;

$N_i = P_i \cdot \cos\phi_i$  – нормальная составляющая веса элементарного блока, т;

$l_i$  – площадь основания элементарного блока, м<sup>2</sup>;

$\delta_i = N_i / l_i$  – нормальное напряжение в основании элементарного блока, т/м<sup>2</sup>;

$\tau_i$  – удельное сопротивление сдвигу отвальной массы при нормальном напряжении  $\delta_i$  (снимается с графика сопротивления сдвигу отвальной массы, прил. 2 [100]);

$T_{iy\delta} = l_i \cdot \tau_i$  – общее сопротивление сдвигу отвальной массы вдоль основания элементарного блока, т.

Вычисление коэффициента запаса устойчивости отвала производится по формуле

$$n = \frac{\sum T_{y\delta}}{\sum T_{сдв}}. \quad (3.92)$$



Коэффициенты запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании соответственно равны:

по поверхности  $AC - n = 1,4$ ;

по поверхности  $A'B' - n = 2,5$ ;

по поверхности  $A''B' - n = 1,4$ ;

Коэффициенты запаса устойчивости откоса ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) на наклонном основании больше нормативного ( $n = 1,3$ ), следовательно, отсыпка ограждающего сооружения (насыпи вскрышных пород) с высотой яруса в 30 м на прочном основании с наклоном до  $17^\circ$  допустима.

### 3.9 Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие заключения:

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

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

3. При складировании ПО над верхней площадкой насыпи вскрышных пород необходимо учитывать консолидацию и устойчивость ПО к воздействию дождевых осадков, во избежание растекания пастообразного материала за пределы складированного пространства.

4. 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.

5. 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.

#### **4 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОГОЛЮБОВСКОЕ**

Боголюбовское месторождение рудного золота расположено в южной части Енисейского кряжа. Месторождение находится на территории Мотыгинского района Красноярского края, в 30 км к северу от районного центра пос. Мотыгино и в 2 км от пос. Раздолинск. Местность приравнена к районам Крайнего Севера.

С поселком Мотыгино поселок Раздолинск связан круглогодично действующей улучшенной грунтовой дорогой.

На Боголюбовском месторождении в базовом варианте запроектировано хвостохранилище для складирования отходов обогащения в течение 10 лет эксплуатации обогатительной фабрики при производительности 500 тыс. т/год.

Предложен вариант с исключением строительства хвостохранилища, сгущением отходов обогащения до пастообразного состояния и их складирование вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска над верхней площадкой насыпи вскрышных пород.

Для определения более выгодного варианта произведем расчет стоимости владения комплексами оборудования изменяемых технологических процессов в хвостовом хозяйстве и определим основные технико-экономические показатели эффективности проекта в базовом и предложенном вариантах. Стоимость владения комплексом оборудования изменяемых технологических процессов будет складываться из первоначальной стоимости оборудования и совокупных эксплуатационных затрат.

#### 4.1 Расчет капитальных затрат изменяемых технологических процессов

Смета горно-капитальных работ изменяемых технологических процессов по базовому варианту и при внедрении в производство предлагаемых инженерных решений представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Смета горно-капитальных работ

Вид работ	Объем работ, тыс. м <sup>3</sup>	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, тыс. руб.
<b>Капитальные работы по базовому варианту</b>			
Строительство хвостохранилища	240	5500	1320000
Складирование отходов	4258,9	120	511068
Отвалообразование, с учетом разрыхления	98165	63	6184300
<b>Всего по карьере:</b>			<b>8015368</b>
<b>Капитальные работы по предложенному варианту</b>			
Отвалообразование, с учетом разрыхления	98165	70	6871500
Складирование пастообразных отходов	2500	125	312500
<b>Всего по карьере:</b>			<b>7184000</b>

Капитальные затраты на производственные здания и сооружения представлены в таблице 4.2.

Смета капитальных затрат на заменяемое электромеханическое оборудование приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.2 – Смета капитальных затрат на содержание зданий и сооружений

Здания и сооружения	Ед. изм.	Количество	Цена за единицу, тыс. руб.	Общая сумма затрат, тыс. руб.
<b>По базовому варианту</b>				
Пульпопровод магистральный и распределительный	м	1200	32	38400
Кадастровая стоимость земель, занятых хвостохранилищем	га	39	1,71	0,7

Здания и сооружения	Ед. изм.	Количество	Цена за единицу, тыс. руб.	Общая сумма затрат, тыс. руб.
Содержание хвостохранилища	за год	10	52800	528000
<b>Всего по карьере:</b>				<b>566401</b>
<b>По предложенному варианту</b>				
Пульпопровод магистральный и распределительный	м	1800	33	59400
Кадастровая стоимость земель занятая пастообразными хвостами	га	7,9	1,71	0,1
<b>Всего по карьере:</b>				<b>59400</b>

Таблица 4.3 – Смета капитальных затрат на заменяемое электромеханическое оборудование

Оборудование	Количество единиц с учетом резерва	Балансовая стоимость, тыс. руб.	Общая сумма капитальных затрат, тыс. руб.
<b>По базовому варианту</b>			
Сгуститель	1	180000	180000
Насосная станция	1	250000	250000
<b>Итого по аналогу:</b>			<b>430000</b>
<b>По предложенному варианту</b>			
Пастообразный сгуститель	1	215000	215000
Насосная станция	1	426500	426500
<b>Итого по проекту:</b>			<b>641500</b>

Капитальные затраты при строительстве предприятия с базовым вариантом и при строительстве по предложенному варианту приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Капитальные затраты

Наименование затрат	Сумма затрат, тыс. руб.
<b>Часть 1 по базовому варианту</b>	
Горно-капитальные работы	8015368
Промышленные здания и сооружения	566401
Электромеханическое оборудование	430000
Инструменты и производственный инвентарь	123591
Благоустройство промышленной площадки	247183
Временные объекты на строительные работы	642675
<b>Итого по первой части сметы:</b>	<b>10025217</b>
<b>Часть 2 по базовому варианту</b>	

Наименование затрат	Сумма затрат, тыс. руб.
Содержание дирекции строящегося предприятия	154390
Подготовка эксплуатационных кадров	120939
Проектные и изыскательские работы	257317
<b>Итого по второй части сметы:</b>	<b>532646</b>
<b>Всего по первой и второй части сметы:</b>	<b>10557863</b>
Непредвиденные расходы	1313218
<b>Всего по смете:</b>	<b>11871081</b>
<b>Часть 1 по предложенному варианту</b>	
Горно-капитальные работы	<b>7184000</b>
Промышленные здания и сооружения	59400
Электромеханическое оборудование	641500
Инструменты и производственный инвентарь	116484
Благоустройство промышленной площадки	232969
Временные объекты на строительные работы	605718
<b>Итого по первой части сметы:</b>	<b>8840071</b>
<b>Часть 2 по предложенному варианту</b>	
Содержание дирекции строящегося предприятия	145512
Подготовка эксплуатационных кадров	113985
Проектные и изыскательские работы	242520
<b>Итого по второй части сметы:</b>	<b>502017</b>
<b>Всего по первой и второй части сметы:</b>	<b>9342088</b>
Непредвиденные расходы	1237702
<b>Всего по смете:</b>	<b>10579790</b>

#### 4.2 Организация труда, численность трудящихся хвостового хозяйства

Режим работы предприятия – непрерывный: 365 рабочих дней в году, 7 рабочих дней в неделю, 2 смены в сутки по 11 часов.

Контроль технического состояния объектов и руководство работами осуществляется мастером хвостового хозяйства лично ежедневно с занесением результата визуального осмотра в специальный журнал. В случае возникновения предпосылок аварийной ситуации к работам по их устранению привлекается землеройно-транспортная техника предприятия.

Обслуживание хвостового хозяйства осуществляется рабочими с привлечением, в случае, необходимости, персонала ремонтной службы обогатительной фабрики.

Коэффициент списочного состава  $K_{сн}$  определим по формуле

$$K_{cn} = \frac{T_k - t_{np} - t_{вых}}{(T_k - t_{np} - t_{вых} - t_{отп}) \cdot K_{ув}} = \frac{365 - 0 - 104}{(365 - 0 - 104 - 90) \cdot 0,95} = 1,61, \quad (4.1)$$

где  $T_k$  – календарный фонд времени (составляет 365 дней);  $t_{np}$  – число праздничных дней в году;  $t_{вых}$  – число выходных дней в году;  $t_{отп}$  – продолжительность отпуска, дней;  $K_{ув}$  – коэффициент, учитывающий отсутствие работников по уважительной причине.

Списочное количество сотрудников по процессам определено умножением явочной численности на коэффициент списочного состава.

Численность обслуживающего персонала хвостового хозяйства по базовому варианту и предложенному варианту остается неизменной и приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Численность трудящихся хвостового хозяйства

Профессия	Явочная численность, чел.	Списочная численность, чел.
Мастер	1	2
Регулировщик намыва	2	3
Машинист насосной станции	2	3
Итого:	5	8

### 4.3 Расчет эксплуатационных затрат

Эксплуатационные затраты определены по статьям расходов хвостового хозяйства.

#### 4.3.1 Вспомогательные материалы

Данная статья включает затраты на расход применяемого флоакуланта полиакриламида (далее – ПАА). Расчет затрат по статье «Вспомогательные материалы» приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Расчет затрат по статье «Вспомогательные материалы»

Материалы	Ед. измерения	Объем производства отходов, тыс. т	Норма расхода, г/т	Цена за единицу, руб.	Сумма затрат, тыс. руб.
<b>По базовому варианту</b>					
Расход ПАА	г/т	5000	16	0,042	<b>3360</b>
<b>По предложенному варианту</b>					
Расход ПАА	г/т	5000	20	0,042	<b>4200</b>

### 4.3.2 Расчет затрат на электроэнергию

В данной статье по базовому варианту учитываются затраты на электроэнергию для следующих электроприемников: насосной станции оборотного водоснабжения, дренажной насосной станции, а также для освещения дамбы хвостохранилища.

При использовании новой технологии электроприемником будет служить только насосная станция подачи ПО. Освещение места складирования ПО не учитываем, так как затраты на освещение отвалного хозяйства учтены в обоих вариантах.

Результаты расчетов затрат на электроэнергию представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчет затрат на электроэнергию

Потребители электроэнергии	Устан. мощность, кВт	Расчетная мощность, кВт	Расход эл. энергии в год, кВт*ч	Тариф за		Плата за		Общие затраты, руб.
				устан. мощность, руб.	потребленную эл. энергию, руб.	устан. мощность, руб.	потребленную эл. энергию, руб.	
<b>По базовому варианту</b>								
Насосная станция оборотного водоснабжения	173	136	65 682	177	13,45	30 621	883 423	916 964
Дренажная насосная станция	11,5	11,5				2 036		
Освещение дамбы	5	5				885		
<b>Итого:</b>	<b>189,5</b>	<b>152,5</b>	<b>65 682</b>			<b>33 542</b>	<b>883 423</b>	<b>916 964</b>
<b>По ращпредложению</b>								
Насосная станция подачи ПО	200	200	71 200	177	13,45	35 400	957 640	993 040
<b>Итого:</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>71200</b>			<b>35 400</b>	<b>957 640</b>	<b>993 040</b>



### 4.3.3 Основная заработная плата персонала хвостового хозяйства

К основной заработной плате относят все виды оплаты за фактически выполненную работу или отработанное время. Расчет фонда заработной платы обслуживающего персонала хвостового хозяйства приведен в таблице 4.8.

Затраты по основной заработной плате, руб.:

$$Z_o = 12 \cdot \sum N_e \cdot T_p \cdot (K_n \cdot K_n \cdot K_p \cdot K_c), \quad (4.2)$$

где  $N_e$  – количество выходов одной профессии, дней;  $T_p$  – тарифная ставка;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий доплату в ночное время,  $K_n = 1$ ;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий доплату за премирование рабочих из фондов зарплаты,  $K_n = 1,4$ ;  $K_p$  – районный коэффициент,  $K_p = 1,3$ ;  $K_c$  – северные надбавки,  $K_c = 1,2$ .

Затраты на дополнительную заработную плату принимают в размере 20,5 % от основной заработной платы.

Отчисления на социальное страхование во внебюджетные фонды также приведены в таблице 4.8

### 4.3.4 Расходы по эксплуатации и содержанию оборудования

В данную статью включают затраты по эксплуатации оборудования, зданий и сооружений и ремонту основного вида оборудования. Расчеты приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Содержание и эксплуатация оборудования

Статьи затрат	По базовому варианту, руб.	По предложенному варианту, руб.
Эксплуатация насосного оборудования, формирование инженерных сооружений (3 % от стоимости)	53 652 000	21 027 000
Текущий ремонт оборудования, содержание и эксплуатация инженерных сооружений (8 % от стоимости)	34 400 000	51 320 000
<b>Итого:</b>	<b>88 052 000</b>	<b>72 347 000</b>

Таблица 4.8 – Расчет фонда заработной платы обслуживающего персонала хвостового хозяйства

Профессия	Месячный оклад, тыс. руб.	Списочная численность, чел.	Основная заработная плата, тыс. руб.			Итого основной заработной платы с районным коэф. и надбавками для районов Крайнего Севера, тыс. руб.	Доп. з/п, тыс. руб.	Всего фонд з/п, тыс. руб.	Отчисления на соцстрахование, тыс. руб.	
			Тарифный фонд или фонд по окладам	Премии	Итого основная з/п				ЕСН (34 %)	ОСС (4,1 %)
Мастер	53,5	2	1284	514	1798	2804	575	3379	1149	139
Регулировщик намыва	50,3	3	1811	724	2535	3955	811	4766	1620	195
Машинист насосной станции	47,8	3	1721	688	2409	3758	770	4529	1540	186
<b>Итого:</b>		<b>8</b>				<b>10517</b>	<b>2156</b>	<b>12673</b>	<b>4309</b>	<b>520</b>

## 4.4 Эффективность инвестиционного проекта

### 4.4.1 Общие положения

Общую эффективность инвестиционного проекта характеризуют системой показателей, отражающих соотношение затрат и результатов деятельности.

Различают следующие показатели общей эффективности инвестиционного проекта:

- показатели коммерческой (финансовой) эффективности, учитывающие финансовые последствия реализации проекта для его непосредственных участников;
- показатели бюджетной эффективности, отражающие финансовые последствия осуществления проекта для федерального, регионального или местного бюджета;
- показатели экономической эффективности, учитывающие затраты и результаты, связанные с реализацией проекта, выходящие за пределы прямых финансовых интересов участников инвестиционного проекта и допускающие стоимостное измерение.

Оценку предстоящих затрат и результатов при определении эффективности инвестиционного проекта осуществляют в пределах расчетного периода (горизонта расчета), который принят продолжительности создания, эксплуатации и (при необходимости) ликвидации объекта – 13 лет.

Горизонт расчета измеряют количеством шагов расчета.

Шагом расчета при определении показателей эффективности в пределах расчетного периода могут быть: месяц, квартал или год.

Затраты, осуществляемые участниками, подразделяют на первоначальные (капиталообразующие инвестиции), текущие и ликвидационные, которые осуществляются соответственно на строительной, функционирования и ликвидационной стадиях.

При оценке эффективности инвестиционного проекта соизмерение разновременных показателей осуществляют путем приведения (дисконтирования)

их к ценности в начальном периоде. Для приведения разновременных затрат, результатов и эффектов используют норму дисконта, принятой 12 %.

Сравнение различных инвестиционных проектов и выбор лучшего из них рекомендуют производить с использованием показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности (ИД);
- срок окупаемости.

#### **4.4.2 Расчет экономической эффективности инвестиционного проекта**

Экономическую эффективность (финансовое обоснование) проекта определяют соотношением финансовых затрат и результатов, обеспечивающих требуемую норму доходности.

При осуществлении проекта выделяют три вида деятельности: инвестиционную, операционную и финансовую.

В рамках каждого вида деятельности происходит приток и отток денежных средств.

Потоком реальных денег называют разность между притоком и оттоком денежных средств от инвестиционной и операционной деятельности в каждом периоде осуществления проекта (на каждом шаге расчета).

Расчет экономической эффективности базового варианта проекта представлен в таблице 4.9, по предложенному варианту в таблице 4.10.

Таблица 4.9 – Расчет экономической эффективности базового варианта проекта

Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Производственная программа</b>														
Объем добываемой горной массы, тыс. м <sup>3</sup>	88773	0	0	9000	9273	9000	9000	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Объем вскрышной породы укладываемой в отвал, с учетом коэффициента разрыхления, тыс. м <sup>3</sup>	98164	0	0	9888	10182	9998	10074	8267	8356	8273	8297	8254	8239	8336
Объем перерабатываемой руды, тыс. т	5000	0	0	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Выпуск металла, кг	15048	0	0	0	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505
<b>Инвестиционная деятельность</b>														
<b>Капитальные вложения, млн руб.</b>	<b>4372</b>	<b>757</b>	<b>1754</b>	<b>1401</b>	<b>460</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
ПИР, млн руб.	257	257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Временные объекты на строительные работы, млн руб.	643	200	200	243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Электромеханическое оборудование, млн руб.	430	0	430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Инструменты и производственный инвентарь, млн руб.	124	0	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Благоустройство промышленной площадки, млн руб.	247	0	0	0	247	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Строительство хвостохранилища, млн руб.	1320	0	600	720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Строительство магистрального и распределительного пульпопровода, млн руб.	38	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Непредвиденные расходы, млн руб.	1313	300	400	400	213	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Остаток ОФ на начало периода, млн руб.					4372	3935	3498	3061	2623	2186	1749	1312	874	437
Амортизация, млн руб.	4372	0	0	0	437	437	437	437	437	437	437	437	437	437
Остаток ОФ на конец периода, млн руб.					3935	3498	3061	2623	2186	1749	1312	874	437	0
<b>Эксплуатационные затраты</b>														
Эксплуатационные затраты по экскавации горной массы, млн руб.	10653	0	0	1080	1113	1080	1080	900	900	900	900	900	900	900
Эксплуатационные затраты по переработке руды, млн руб.	3000	0	0	0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отвалообразование, млн руб.	6184	0	0	623	641	630	635	521	526	521	523	520	519	525
Складирование отходов обогащения, млн руб.	511	0	0	0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Плата за земли, занятые хвостохранилищем, млн руб.	1	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Содержание хвостохранилища, млн руб.	528	0	0	0	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Прочие расходы, млн руб.	275	75	79	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Расход ПАА, млн руб.	3	0	0	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Затраты на электроэнергию, млн руб.	917	0	0	0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
ФЗП персонала обслуживающего хозяйства, млн руб.	13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксплуатация насосного оборудования, формирование инженерных сооружений, млн руб.	54	0	0	9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Текущий ремонт оборудования, содержание и эксплуатация инженерных сооружений, млн руб.	34	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Амортизация, млн руб.	4372	0	0	0	437	437	437	437	437	437	437	437	437	437
Итого полные затраты, млн руб.	26546	75	79	1833	2697	2652	2657	2363	2369	2364	2365	2362	2361	2368
<b>Операционная деятельность</b>														
1. Выручка от реализации продукции, млн руб.	33858	0	0	0	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386
2. Себестоимость выпуска продукции, млн руб.	23597	0	0	0	2514	2489	2513	2238	2263	2277	2298	2314	2333	2358
3. в т.ч. амортизация, млн руб.	4372	0	0	0	437	437	437	437	437	437	437	437	437	437
4. Балансовая прибыль (п.1-п.2), млн руб.	10261	0	0	0	872	897	873	1148	1123	1109	1088	1071	1053	1028
5. Налог на имущество, млн руб.	962	0	0	0	183	164	144	125	106	87	67	48	29	10
6. Налогооблагаемая прибыль (п.4-п.5), млн руб.	9299	0	0	0	689	733	729	1023	1017	1022	1021	1023	1024	1018
7. Налог на прибыль, млн руб.	1860	0	0	0	138	147	146	205	203	204	204	205	205	204
8. Чистая прибыль (п.6-п.7), млн руб.	4170	0	0	0	551	587	583	818	814	818	816	819	819	815
Сальдо потока от операционной деятельности, млн руб.	6794	0	0	0	989	1024	1020	1255	1251	1255	1254	1256	1257	1252
Сальдо чистого денежного потока, млн руб.	7439	-757	-1754	-1401	528	1024	1020	1255	1251	1255	1254	1256	1257	1252
Сальдо потока нарастающим итогом, млн руб.	11473	-757	-2511	-3912	-3384	-2360	-1340	-84	1166	2421	3675	4931	6188	7439

Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дисконтированное сальдо, млн руб.	1540	-757	-1657	-1182	398	689	613	673	599	536	478	428	382	340
Норма дисконта		1,00	0,94	0,84	0,75	0,67	0,60	0,54	0,48	0,43	0,38	0,34	0,30	0,27
Дисконтированное сальдо нарастающим итогом, млн руб.		-757	-2414	-3596	-3199	-2510	-1897	-1224	-625	-89	389	817	1200	1540

Таблица 4.10 – Расчет экономической эффективности предложенного варианта проекта

Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Производственная программа</b>														
Объем добываемой горной массы, тыс. м <sup>3</sup>	88773	0	0	9000	9273	9000	9000	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Объем вскрышной породы укладываемой в отвал, с учетом коэффициента разрыхления, тыс. м <sup>3</sup>	98164	0	0	9888	10182	9998	10074	8267	8356	8273	8297	8254	8239	8336
Объем перерабатываемой руды, тыс. т	5000	0	0	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Выпуск металла, кг	15048	0	0	0	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505
<b>Инвестиционная деятельность</b>														
<b>Капитальные вложения, млн руб.</b>	<b>3136</b>	<b>743</b>	<b>1358</b>	<b>665</b>	<b>371</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
ПИР	243	243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Временные объекты на строительные работы, млн руб.	606	200	200	206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Электромеханическое оборудование, млн руб.	642	0	642	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Инструменты и производственный инвентарь, млн руб.	116	0	116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Благоустройство промышленной площадки, млн руб.	233	0	0	0	233	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Строительство хвостохранилища, млн руб.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Строительство магистрального и распределительного пульпопровода, млн руб.	59	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Непредвиденные расходы, млн руб.	1238	300	400	400	138	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Остаток ОФ на начало периода, млн руб.					3136	2823	2509	2195	1882	1568	1255	941	627	314
Амортизация, млн руб.	3136	0	0	0	314	314	314	314	314	314	314	314	314	314
Остаток ОФ на конец периода, млн руб.					2823	2509	2195	1882	1568	1255	941	627	314	0
<b>Эксплуатационные затраты</b>														
Эксплуатационные затраты по экскавации горной массы, млн руб.	10653	0	0	1080	1113	1080	1080	900	900	900	900	900	900	900
Эксплуатационные затраты по переработке руды, млн руб.	3000	0	0	0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Отвалообразование, млн руб.	6871	0	0	692	713	700	705	579	585	579	581	578	577	584
Складирование отходов обогащения, млн руб.	313	0	0	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Плата за земли, занятые хвостохранилищем, млн руб.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Содержание хвостохранилища, млн руб.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Прочие расходы, млн руб.	259	75	71	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Расход ПАА, млн руб.	4	0	0	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Затраты на электроэнергию, млн руб.	993	0	0	0	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
ФЗП персонала хвостового хозяйства, млн руб.	13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксплуатация насосного оборудования, формирование инженерных сооружений, млн руб.	21	0	0	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Текущий ремонт оборудования, содержание и эксплуатация инженерных сооружений, млн руб.	51	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Амортизация, млн руб.	3136	0	0	0	314	314	314	314	314	314	314	314	314	314
Итого полные затраты, млн руб.	25315	75	71	1892	2578	2532	2538	2231	2237	2232	2233	2230	2229	2236
<b>Операционная деятельность</b>														
1. Выручка от реализации продукции, млн руб.	33858	0	0	0	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386	3386
2. Себестоимость выпуска продукции, млн руб.	22587	0	0	0	2447	2415	2434	2142	2162	2170	2185	2196	2209	2229
3. в т.ч. амортизация, млн руб.	3136	0	0	0	314	314	314	314	314	314	314	314	314	314



Показатели	Итого	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4. Балансовая прибыль (п.1-п.2), млн руб.	11271	0	0	0	939	971	952	1244	1224	1216	1201	1190	1177	1157
5. Налог на имущество, млн руб.	690	0	0	0	131	117	103	90	76	62	48	34	21	7
6. Налогооблагаемая прибыль (п.4-п.5), млн руб.	10581	0	0	0	808	853	848	1155	1148	1154	1152	1156	1157	1150
7. Налог на прибыль, млн руб.	2116	0	0	0	162	171	170	231	230	231	230	231	231	230
8. Чистая прибыль (п.6-п.7), млн руб.	4773	0	0	0	646	683	678	924	919	923	922	924	925	920
Сальдо потока от операционной деятельности, млн руб.	6655	0	0	0	960	996	992	1237	1232	1237	1236	1238	1239	1233
Сальдо чистого денежного потока, млн руб.	8465	-743	-1358	-665	589	996	992	1237	1232	1237	1236	1238	1239	1233
Сальдо потока нарастающим итогом, млн руб.	24139	-743	-2101	-2766	-2176	-1180	-188	1049	2282	3519	4754	5992	7231	8465
Дисконтированное сальдо, млн руб.	2510	-743	-1283	-561	444	670	596	663	590	529	472	422	377	335
Норма дисконта		1,00	0,94	0,84	0,75	0,67	0,60	0,54	0,48	0,43	0,38	0,34	0,30	0,27
Дисконтированное сальдо нарастающим итогом, млн руб.		-743	-2026	-2587	-2143	-1473	-877	-214	376	905	1376	1798	2175	2510

#### 4.4.3 Показатели эффективности проекта

Чистый дисконтированный доход определен как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенный к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине приведенных капиталовложений.

Срок окупаемости – период, в настоящей работе измеряемый в годах, начиная с которых первоначальные вложения и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом, покрываются суммарными результатами его осуществления.

Внутренняя норма доходности – ставка дисконтирования, при которой приведенная стоимость будущих притоков денег равна приведенной стоимости инвестиций.

Основные технико-экономические показатели эффективности проекта представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Основные технико-экономические показатели эффективности проекта

Показатели	Базовый вариант	Предлагаемый вариант
Цена грамма золота, тыс. руб.	2,25	2,25
Объём добываемой горной массы, тыс. м <sup>3</sup>	88773	88773
Объём перерабатываемой руды, тыс. т	5000	5000
Прибыль балансовая, млн руб.	10261	11271
Налог на прибыль, млн руб.	1860	2116
Чистая прибыль предприятия, млн руб.	4170	4773
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	1539,8	2510,3
Внутренняя норма доходности, %	18,9 %	25,6 %
Срок окупаемости простой, лет	7,1	6,2
Срок окупаемости дисконтированный, лет	9,2	7,4
Индекс доходности	2,7	3,7

#### **4.5 Вывод**

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.

## 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 складированного 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс: [www.minerjob.ru](http://www.minerjob.ru)
2. Электронный ресурс: [www.infomine.com](http://www.infomine.com)
3. Электронный ресурс: [www.newmont.com](http://www.newmont.com)
4. Pueblo Viejo Gold Mine // ANNUAL REPORT. – 2013.
5. Gold Fields Integrated // Annual Review, Operating statistics. – 2013.
6. Analyst Visit GEITA GOLD MINE // Quarterly Report. – June 2014.
7. TECHNICAL REPORT ON THE CORTEZ JOINT VENTURE // Nevada Mine Tour Cortez. – 2014.
8. Paracatu Project Brazil National Instrument // Technical Report. – 2014.
9. Morila Gold Mine // Annual Report. – 2012.
10. Living a mining heritage – Cripple Creek & Victor Gold Mining Company. – 2011.
11. Commission Internationale des Grands Barrages – 151. Bd Haussmann, 75008. – Paris.
12. Aldea, C. Paste backfill mix / C. Aldea, B. Cornelius // International Mining. – April 2010. – P. 79-80.
13. Виноградский, Э.Б. Техничко-экономическое обоснование сгущения хвостовых пульп в горнорудной промышленности / Э.Б. Виноградский // Обогащение руд. – 2010. – Т. – С. 39-43.
14. Электронный ресурс: <http://www.westech-inc.com>
15. Электронный ресурс: <http://www.outotec.com>
16. Электронный ресурс: <http://www.flsmidth.com>
17. Баранов, В.Ф. Системы сгущения и складирования отвальных хвостов (обзор мировой практики) / В.Ф. Баранов // Обогащение руд. – 2009. – Т. 3. – С. 43-48.
18. Yu, J.F. Flocculation of kaoline particles by two typical polyelectrolytes: a comparative study on the kinetics and floc structures / J.F. Yu, D.S. Wang, X.P. Ge, et

al. // *Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* – 2006. – Vol. 290. – P. 288–294.

19. Smith-Palmer, T. Flocculation of particles. In: Somasundaran, P., Hubbard, A. (Eds.) / T. Smith-Palmer, R. Pelton // *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. Taylor & Francis. – 2012. – P. 2584–2599.

20. Alamgir, A. Al-PAM assisted filtration system for abatement of mature fine tailings / A. Alamgir, D. Harbottle, J. Masliyah, et al. // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – Vol. 80. – P. 91–99.

21. O'Shea, J.-P. Solid–liquid separations with a temperature-responsive polymeric flocculant: effect of temperature and molecular weight on polymer adsorption and deposition / J.-P. O'Shea, G.G. Qiao, G.V. Franks // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2010. – Vol. 348. – P. 9–23.

22. Ji, Y. Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculants / Y. Ji, Q. Lu, Q. Liu, et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2013. – Vol. 430. – P. 29–38.

23. Lee, K.E. Flocculation of kaoline in water using novel calcium chloride-polyacrylamide (CaCl<sub>2</sub>-PAM) hybrid polymer / K.E. Lee, T.T. Teng, N. Morad, et al. // *Separation and Purification Technology*. – 2010. – Vol. 75. – P. 346–351.

24. Dash, M. Studies on the effect of flocculant adsorption on the dewatering of iron ore tailings / M. Dash, R.K. Dwari, S.K. Biswal, et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 173. – P. 318–325.

25. Чуянов, Г.Г. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды / Г.Г. Чуянов // М., Изд-во: Недра, 1987. – 260 с.

26. Meggyes, T. Paste and Thickened Tailings Technology / T. Meggyes // Federal Institute for Materials Research and Testing, (BAM Forschungsbericht 280). Berlin. – 2007.

27. High Density & Paste // Seminar, Santiago. – April 2002. – P. 11–13.

28. Электронный ресурс: [www.tailing.info](http://www.tailing.info)

29. Электронный ресурс: [www.solidliquid-separation.com](http://www.solidliquid-separation.com)

30. Сарвин, Г.Т. Из практики эксплуатации хвостохранилищ / Под общей редакцией Б.А. Волнина // М., Изд-во: Атомиздат, 1980. – 40 с.
31. Электронный ресурс: <http://www.mekhanobr.com/>
32. Lugão, W. Dry Stacking of Cycloned Tailings / W. Lugão, M. Almeida, A. Guimarães, F. Magalhães, S. Mohallem // Belo Horizonte, Brazil. – 17-20 June 2013.
33. Семёнова, К.М. Совершенствование технологии гидроотвалообразования на основе подачи высоконасыщенных гидросмесей с учетом геоморфологических факторов: дис. канд. техн. наук : 25.00.22 / Семёнова Ксения Михайловна. – М., 2013. – 171 с.
34. Rayo, J. Large tailings disposal – conventional versus paste/ J. Rayo, R. Fuentes, R. Orellana // Proc. of the 12<sup>th</sup> Intern. Seminar on Past and Thickened Tailings «Past 2009», April 21-24, 2009. Vina del Mar, Chile. Perth: Australian Centre for Geomechanics – 2009. – P. 271-281.
35. Авксентьев, С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковой руды: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.06 / Авксентьев Сергей Юрьевич – Санкт-Петербург, 2009. – 20 с.
36. Киричко, С.Н. Обоснование методов расчетов параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей / С.Н. Киричко, Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова // Обогащение полезных ископаемых (Украина). – 2012. – Т. 51. – С. 92.
37. Семененко, Е.В. Обоснование метода расчета параметров гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных добавок / Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2007. – Т. 25. – С. 72-80.
38. Повх, И.Л. Турбулентное течение вязкой жидкости и слабых растворов полимеров в трубах / И.Л. Повх, В.А. Никулин // Физическая гидродинамика: Сборник статей. – 1977. – С. 25-34.
39. Иванюта, Ю.Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения слабых растворов полимеров в трубах различного диаметра /



Ю.Ф. Иванюта, Л.А. Чкалова // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. 21, № 1. – С. 5-11.

40. Повх, И.Л. Влияние добавок полиакриламида на снижение гидравлических потерь в водных потоках с твердыми частицами / И.Л. Повх, А.Б. Ступин // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 22, № 5. – С. 919-921.

41. Покровская, В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская // М., Изд-во: Недра, 1985. – 192 с.

42. Патент 2298726 РФ, МПК F17D1/00, F04D3/02. Напорная трубопроводная система для транспортирования пастообразных материалов / Тарасов Ю.Д., Николаев А.К.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова». – № 2006106021/06; заявл. 26.02.2006; опубл. 10.05.2007. – 3 с.

43. Патент 2477813 РФ, МПК F04B 15/02, F04B 7/00. Способ транспортировки пастообразных масс и насосное устройство для транспортировки пастообразных масс / Швинг Фридрих, Швинг Штефан; заявитель и патентообладатель Швинг Фридрих, Швинг Штефан. – № 2011134273/06; заявл. 14.01.2010; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8. – 15 с.

44. Oesterlink, J. High-density pumping / J. Oesterlink // Mining Magazine. – 2008. – P. 99-102.

45. Сазонов, К.Г. Проект эксплуатации хвостового хозяйства ЗИФ горнодобывающего и перерабатывающего предприятия на базе месторождения Благодатное на пусковой период 2011-2012 гг. / ЗАО «МЕХАНОБР ИНЖИНИРИНГ». – С-Петербург, 2010. – 141 с.

46. Нечаева, Е. Вебинар Outotec по вопросам сгущения хвостов обогащения. – 17 марта 2016 г.

47. Рязанцев, С.С. Обоснование рациональных параметров отвалообразования на склонах и разработка методов их расчета на рудных карьерах Забайкальского края: автореф. дис. канд. техн. наук : 25.00.22 / Рязанцев Степан Сергеевич – Чита, 2013. – 27 с.

48. Obermeyer, J. Design, Construction and Operation of a Large Centerline Tailing Storage Facility with High Rate of Rise / J. Obermeyer, T. Alexieva // Proceedings Tailings and Mine Waste. Vancouver. – 6-9 November, 2011.
49. Robinsky, E.I. Tailing disposal by the thickened discharge method for improved economy and environmental control. Proceedings of the 2nd International Tailings Symposium, Denver, Colorado / E.I. Robinsky // Tailing Disposal Today. – 1978. – Vol. 2. – P. 75-92.
50. Mining and the Environment IV – Ontario, Canada – October, 2007.
51. Оценка воздействия на окружающую природную среду строительства и эксплуатации Березитового рудника: Отчет / ОАО «Иргиредмет»; Руководитель работ – Дементьев Е.В.; ответственные исполнители – Замятин О.В., Петров В.Ф. – Иркутск: 2005. – 191 с.
52. Кибирев, В.И. Эффективная технология сгущения хвостовой пульпы / В.И. Кибирев // Обогащение руд. – 1997. – Т. 2. – С. 60.
53. Кибирев, В.И. Сгущение хвостовой пульпы – шаг к «зеленой» технологии складирования хвостов / В.И. Кибирев // Обогащение руд. – 2010. – Т. 6. – С. 44-48.
54. Чмырев, А.В. Снижение себестоимости производства концентрата на ОАО «КМАруда» за счет создания системы внутреннего водооборота / А.В. Чмырев, П.Х. Глендиннинг // Горная промышленность. – 2009. – Т. 5, № 87). – С. 2-3.
55. Электронный ресурс: [http://www.equipnet.ru/articles/other/other\\_452.html](http://www.equipnet.ru/articles/other/other_452.html)
56. Медведева, О.А. Хвостохранилища Кривбасса, проблемы и особенности их эксплуатации / О.А. Медведева // Межведомственный сборник научных трудов «Геотехническая механика». – 2012. – Т. 103. – С. 279-285.
57. Медведева, О.А. Обоснование технологий совместного складирования отходов обогащения с различной степенью сгущения / О.А. Медведева, С.Н. Киричко // Межведомственный сборник научных трудов «Геотехническая механика». – 2013. – Т. 109. – С. 134-142.

58. Блюсс, Б.А. Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд / Б.А. Блюсс, Н.А. Головач // Днепропетровск, Изд-во: Полиграфист, 1999. – 126 с.
59. Багатонов, А.П. Водовоздушное хозяйство обогатительных фабрик / А.П. Багатонов // М., Изд-во: Недра, 1984. – 295 с.
60. Криль, С.И. Влияние мелких фракций полидисперсного твердого материала на параметры его транспортирования турбулентным потоком / С.И. Криль, В.М. Карасик, Ю.К. Витошкин, В.Ф. Очеретько // Труды конференции. Ин-т гидродинамики ЧССР – Прага, 1983. – с. 88-90.
61. Дмитриев, Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили // М., Изд-во: Недра, 1991. – 304 с.
62. Докукин, В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта / В.П. Докукин // Санкт-Петербург, Изд-во: СПГГИ(ТУ), 2005. – 105 с.
63. Звягильский, Е.Л. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семенько // Севастополь, Изд-во: Вебер, 2002. – 247 с.
64. Махарадзе, Л.И. Трубопроводный гидротранспорт твердых сыпучих материалов / Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, С.И. Криль, и др. // Тбилиси, Изд-во: Мецниереба, 2006. – 305 с.
65. Рыльникова, М.В. Обоснование технологической схемы и комплекса оборудования для утилизации текущих хвостов обогащения в выработанном подземном пространстве / М.В. Рыльникова, В.А. Ангелов, И.С. Туркин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – С. 62-69.
66. Aldea, C. Why paste backfill rheology matters / C. Aldea, B. Cornelius, M. Davies // International Mining. – April 2009. – P. 8-9.
67. Biesinger M. Tailings paste disposal – more than water recovery / M. Biesinger // International Mining. – April 2011. – P. 10-12.

68. Dry Stacking Operation at Pogo Mine, Alaska June 12, 2014.
69. Dunbar, S. Basics of Mining and Mineral Processing / S. Dunbar // Americas School of Mines, 2012.
70. SUMMARY AUDIT REPORT. International Cyanide Management Code Audit. Compañia Minera Mantos De Oro and Kinross Gold Corporation, December 2010.
71. Гавришев, С.Е. Перспективные направления использования отвалов и выработанного карьерного пространства / С.Е. Гавришев, И.А. Пыталев // Вестник МГТУ. – 2007. – Т. 4. – С. 10-14.
72. Пыталев, И.А. Обоснование параметров карьеров и отвалов, формируемых в виде емкостей для размещения промышленных отходов: автореф. дис. канд. техн. наук : 25.00.22 / Пыталев Иван Алексеевич – Магнитогорск, 2008. – 20 с.
73. Электронный ресурс: <http://www.urm.ru/ru/75-journal63-article455>
74. Илимбетов, А.Ф. Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на основе отходов переработки руд / А.Ф. Илимбетов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Сборник науч. тр. симпозиума «Неделя горняка-2007». – 2008. – Т. 19. – С. 247-256.
75. Шевченко, Е.В. Экономическая эффективность утилизации отходов горного производства / Е.В. Шевченко, О.Г. Бурдзиева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – С. 43-48.
76. Yilmaz, E. Investigating the hydrogeotechnical and microstructural properties of cemented paste backfill using the CUAPS apparatus: Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Environmental Sciences / Erol Yilmaz. – Rouyn-Noranda (Canada), 2010. – 388 P.
77. **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.

78. Алабужев, П.М. Теории подобия и размерностей. Моделирование / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич и др. // М., Изд-во: Высшая школа, 1968. – 208 с.
79. Кисляков, В.Е. Прогнозирование угла естественного откоса пастообразных хвостов / В.Е. Кисляков, **А.А. Шершнев**, А.И. Кулаков, и др. // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – Т. 1. – С. 50-51.
80. Сарвин, Г.Т. Исследование уплотнения тонкодисперсных материалов при намыве хвостохранилищ: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.15.03 / Сарвин Георгий Тимофеевич. – М., 1972. – 20 с.
81. Волнин, Б.А. Некоторые результаты намыва суглинистых грунтов / Б.А. Волнин, Тхай Фунг Нэ // Гидротехническое строительство. – 1965. – Т. 3. – С. 13-15.
82. Красный, И.В. Исследование вопросов осаждения и уплотнения мелкодисперсных хвостов при намыве хвостохранилищ с применением радиоактивных изотопов: автореф. дис. канд. техн. наук – М., 1969. – 27 с.
83. Филиппов, Н.А. Исследование деформации сооружений намываемых из шламов тонкого помола: автореф. дис. канд. техн. наук – М., 1974. – 43 с.
84. Смирнов, О.П. Исследование процесса осветления технической воды и обезвоживания шламов в циклах оборотного водоснабжения обогатительных фабрик, перерабатывающих марганцевые руды: автореф. дис. канд. техн. наук – Киев, 1971. – 21 с.
85. Волнин, Б.А. Изменение некоторых параметров материалов по длине пляжа намыва хвостохранилищ / Волнин Б.А., Сарвин Г.Т. // Горный журнал. – 1974. – Т. 11. – С. 65-66.
86. Гальперин, А.М. Специальные вопросы инженерной геологии при гидромеханизации открытых разработок / А.М. Гальперин // М., Изд-во: МГИ, 1974. – 71 с.
87. Технические указания по расчету консолидации хвостохранилищ // Л., Изд-во: МЦМ, МК и ССО СССР, 1975. – 23 с.

88. Кисляков, В.Е. Расчет отстойников оборотного водоснабжения при разработке россыпей / В.Е. Кисляков // Красноярск, Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. – 176 с.
89. Ломтадзе, В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов / В.Д. Ломтадзе // М., Изд-во: Госгеолиздат, 1952. – 234 с.
90. Справочник по обогащению руд. Обоганительные фабрики / Под редакцией О.С. Богданова // М., Изд-во: Недра, 1984. – 360 с.
91. Кисляков, В.Е. Разработка технологии оборотного водоснабжения в сложных горнотехнических условиях освоения золотосодержащих россыпей: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.15.03 / Кисляков Виктор Евгеньевич. – М., 1999. – 36 с.
92. Кисляков, В.Е. О возможности применения пастового сгущения хвостов обоганительного передела / В.Е. Кисляков, А.В. Никитин, **А.А. Шершнев** // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – Т. 4. – С. 21-24.
93. Кисляков, В.Е. Схемы складирования пастообразных отходов в отвал вскрышных пород / В.Е. Кисляков, **А.А. Шершнев** // Маркшейдерия и недропользование. – 2016. – Т. 3. – С. 11-13.
94. 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.
95. 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.
96. 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.

97. Проект строительства хвостохранилища Боголюбовского месторождения 130110ПрБ-02-10.1-ПЗ // ОАО «Забайкалцветмет-НИИпроект». – 53 с.

98. Бесимбаева, О.Г. Расчет устойчивости откосов ограждающих дамб золоотвалов / О.Г. Бесимбаева, Ф.К. Низаметдинов, В.Н. Долгоносков // Журнал «Труды университета» Карагандинского государственного технического университета. Раздел «Геотехнологии. Безопасность жизнедеятельности». – 2010 – Т. 3. – С. 45-48.

99. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров // Министерство угольной промышленности СССР – Ленинград, 1972. – 165 с.

100. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах // Министерство топлива и энергетики РФ – С.-Петербург, 1999. – 208 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТЕКАНИЯ  
ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Таблица А1 – Растекание ПО плотностью 2,1 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,0	9,6	4,0	9,6	4,0
5	12,8	3,0	12,4	3,1	12,2	3,1
10	13,1	2,9	12,6	3,0	12,3	3,1
15	13,1	2,9	12,6	3,0	12,7	3,0
20	13,1	2,9	12,9	3,0	13,0	3,0
25	13,1	2,9	12,9	3,0	13,0	3,0
30	13,4	2,9	12,9	3,0	13,0	3,0
35	13,4	2,9	12,9	3,0	13,0	3,0
40	13,4	2,9	12,9	3,0	13,0	3,0

Таблица А2 – Растекание ПО плотностью 2,0 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,2	9,6	4,2	9,6	4,2
5	12,7	3,2	13,1	3,1	12,9	3,1
10	13,2	3,1	13,8	2,9	14,0	2,9
15	14,2	2,8	14,1	2,9	14,5	2,8
20	14,7	2,7	14,5	2,8	14,5	2,8
25	14,7	2,7	14,5	2,8	14,5	2,8
30	14,7	2,7	14,5	2,8	14,5	2,8
35	14,7	2,7	14,5	2,8	14,5	2,8
40	14,7	2,7	14,5	2,8	14,5	2,8

Таблица А3 – Растекание ПО плотностью 1,95 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,3	9,6	4,3	9,6	4,3
5	14,2	2,9	14,0	3,0	13,6	3,0
10	15,1	2,7	14,2	2,9	14,0	3,0
15	16,0	2,6	15,0	2,8	15,0	2,8
20	16,0	2,6	16,4	2,5	15,9	2,6
25	16,3	2,5	16,4	2,5	16,5	2,5
30	16,9	2,4	16,4	2,5	16,5	2,5
35	16,9	2,4	16,4	2,5	16,5	2,5
40	16,9	2,4	16,4	2,5	16,5	2,5



Таблица А4 – Растекание ПО плотностью 1,9 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,1	9,6	4,1	9,6	4,1
5	12,6	3,2	12,0	3,3	13,2	3,0
10	12,8	3,1	12,2	3,3	12,8	3,1
15	12,8	3,1	13,0	3,1	12,8	3,1
20	13,5	2,9	13,3	3,0	13,2	3,0
25	13,6	2,9	13,5	2,9	13,7	2,9
30	13,6	2,9	13,7	2,9	13,7	2,9
35	14,0	2,8	13,9	2,9	13,7	2,9
40	14,0	2,8	13,9	2,9	13,7	2,9

Таблица А5 – Растекание ПО плотностью 1,85 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,3	9,6	4,3	9,6	4,3
5	16,0	2,6	16,0	2,6	15,6	2,6
10	16,7	2,4	16,3	2,5	15,7	2,6
15	16,7	2,4	16,9	2,4	15,7	2,6
20	17,0	2,4	16,9	2,4	16,5	2,5
25	17,5	2,3	17,9	2,3	17,6	2,3
30	17,6	2,3	17,9	2,3	17,6	2,3
35	17,6	2,3	18,0	2,3	17,6	2,3
40	17,6	2,3	18,0	2,3	17,6	2,3

Таблица А6 – Растекание ПО плотностью 1,8 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,4	9,6	4,4	9,6	4,4
5	17,6	2,4	17,0	2,5	16,2	2,6
10	17,7	2,4	17,6	2,4	16,7	2,5
15	17,9	2,3	17,7	2,4	17,0	2,5
20	17,9	2,3	17,9	2,3	17,5	2,4
25	18,2	2,3	18,5	2,3	17,8	2,4
30	19,0	2,2	18,5	2,3	18,6	2,3
35	19,0	2,2	18,5	2,3	18,6	2,3
40	19,0	2,2	18,5	2,3	18,6	2,3

Таблица А7 – Растекание ПО плотностью 1,75 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,2	9,6	4,2	9,6	4,2
5	21,8	1,9	21,5	1,9	22,0	1,8
10	22,3	1,8	21,9	1,9	22,4	1,8
15	23,4	1,7	21,9	1,9	22,9	1,8
20	23,5	1,7	22,3	1,8	23,2	1,7
25	24,1	1,7	22,6	1,8	23,6	1,7
30	24,1	1,7	23,0	1,8	24,0	1,7
35	24,6	1,6	23,5	1,7	24,0	1,7
40	24,6	1,6	23,5	1,7	24,0	1,7

Таблица А8 – Растекание ПО плотностью 1,7 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,4	9,6	4,4	9,6	4,4
5	28,0	1,5	27,6	1,5	28,3	1,5
10	28,4	1,5	28,0	1,5	28,7	1,5
15	28,5	1,5	28,4	1,5	29,0	1,4
20	29,8	1,4	29,0	1,4	29,2	1,4
25	29,8	1,4	29,0	1,4	29,5	1,4
30	30,0	1,4	29,3	1,4	30,4	1,4
35	30,0	1,4	29,4	1,4	30,4	1,4
40	30,0	1,4	29,4	1,4	30,4	1,4

Таблица А9 – Растекание ПО плотностью 1,65 т/м<sup>3</sup>

Время растекания, мин	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см	S, см <sup>2</sup>	h, см
0	9,6	4,5	9,6	4,5	9,6	4,5
5	32,0	1,3	31,5	1,4	31,8	1,4
10	33,0	1,3	33,2	1,3	32,4	1,3
15	33,7	1,3	34,0	1,3	34,0	1,3
20	34,6	1,2	34,5	1,2	34,7	1,2
25	35,0	1,2	35,0	1,2	35,1	1,2
30	35,5	1,2	35,0	1,2	35,4	1,2
35	35,7	1,2	35,5	1,2	36,0	1,2
40	35,7	1,2	35,5	1,2	36,0	1,2

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор  
ООО «Сисим»  
М.Н. Ковальков



«    »    2016 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов диссертационной работы  
«Обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород  
при складировании отходов обогащения»  
Шершнева Андрея Александровича

Настоящим актом подтверждаем, что на объектах ООО «Сисим» следующие результаты диссертационной работы Шершнева А.А. приняты к внедрению для разработки проектной документации:

- технологическая схема складирования пастообразных отходов обогащения на горизонтальное или слабонаклонное основание;
- технологическая схема складирования пастообразных отходов обогащения вдоль центральной оси пространства, ограниченного отвалами вскрышных пород, с превышением точки выпуска над верхней площадкой насыпи вскрышных пород;
- технологическая схема складирования пастообразных отходов обогащения на наклонное основание.

В результате внедрения технологических схем будет достигнуто сокращение объёмов намывного хвостохранилища и высвобождение площадей, предназначенных для размещения отходов обогащения.

Заместитель генерального  
директора по производству

И.В. Тархов