

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*

**Кустов Владимир Васильевич**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ  
ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЫПУЧИХ ГОРНЫХ ПОРОД**

25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: Д.т.н., доцент  
**Лабинский Константин Николаевич,**  
ГОУВПО «Донецкий национальный техниче-  
ский университет», профессор  
кафедры «Строительство зданий,  
подземных сооружений и геомеханика»

Официальные оппо- 1...  
ненты:

2...

Ведущая организация: ...

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д01.008.01 при ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, к. 203. Тел. факс: 380 (62) 304-30-55, e-mail: vchenarada@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д01.008.001  
доктор технических наук, профессор

И.А. Бершадский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Недра Донбасса богаты различными видами минерального сырья, значительная часть которых добывается открытым способом. Сегодня открытый способ разработки характеризуется усложнением горно-геологических условий месторождений и ростом требований к уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Устойчивое развитие экономики Украины и России в значительной степени зависит от эффективности горно-металлургического комплекса в целом. Metallургические предприятия почти полностью используют отечественные рудные компоненты, в том числе металлургические флюсы – известняки и доломиты. Добыча известняков и доломитов осуществляется на флюсовых предприятиях практически полностью открытым способом. Кроме металлургии они обеспечивают сырьем химическую, строительную и пищевую промышленности, сельское хозяйство.

Неотъемлемой особенностью технологических процессов добычи и переработки флюсов является создание техногенных месторождений с накоплением значительных объемов отходов и сопутствующих продуктов. Значительная роль в решении задач по рациональному использованию минеральных ресурсов уделяется повторной добыче сырья из отходов горного производства на основании применения нестандартных технологических решений и внедрения в практику горного производства научных достижений. Отходами переработки известняков и доломитов на обогатительных фабриках является, как правило, щебёночно-песчаная смесь. При удовлетворительных химических показателях она размещается в отвалы, так как ее фракционный состав (более 80 % мелкой фракции) не отвечает современным требованиям металлургических предприятий. Только в Донецкой области в отвалах обогатительных фабрик находится более 143 млн. м<sup>3</sup> отходов переработки флюсов. При всем многообразии оборудования и технологических схем, которые применяются при создании насыпных техногенных месторождений, можно выделить явления, степень проявления которых в значительной степени влияет на качественные показатели массива техногенного месторождения в целом и его отдельных частей. Одним из таких явлений является гравитационная сегрегация – распределение сыпучих пород по крупности или плотности составляющих частиц в процессе отсыпки на откос.

Таким образом, разработка технологии формирования техногенных месторождений с прогнозируемой структурой и качественными показателями на основании установленных закономерностей сегрегации является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет большое значение для горнодобывающей промышленности.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической основой для установления закономерностей сегрегации горной массы по гранулометрическому составу являются работы А.Н. Колмогорова, Л.А. Вайсберга, Д.Г. Рубинова.

Большой вклад в изучение процесса сегрегации горных пород по крупности при отсыпке отвалов внесли К.Н. Трубецкой, Э.И. Черней, А.В. Гальянов, Ю.В. Лаптев, Ю.Г. Вилкул, В.К. Слободянюк, Л.П. Иванчишина, Е.А. Ворон,

Ю.А. Рыжков, И.И. Попов, Р.П. Окатов, Ф.И. Низаметдинов и другие.

Проблемам оценки техногенных образований, подходам к классификации техногенных месторождений, рассмотрению вопросов по использованию отходов горного производства посвящены работы В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, М.Г. Новожилова, И.Л. Гуменика, М.С. Четверика, Г.И. Шегая, Л.Ф. Наркелюна, А.И. Едильбаева, Г.В. Секисова, Ю.А. Проскурни, К. Дребенштедта и других отечественных и зарубежных исследователей.

Следует отметить, что в исследованиях названных авторов основное внимание уделяется, как правило, породам вскрыши, некондиционным или сопутствующим полезным ископаемым, которые извлекались в процессе добычи основного полезного ископаемого.

В то же время недостаточно уделено внимания отходам переработки обогатительных фабрик флюсодобывающих предприятий, которые вынужденно укладываются в отвалы. При этом следует учесть, что отходы переработки полезного ископаемого, пройдя по всей технологической цепи горного производства и обогащения, на выходе представляют сыпучую массу, которая, приобретая новые технологические характеристики, сохраняет значительное содержание полезного компонента.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с программами научно-исследовательских работ ГВУЗ «Национальный горный университет», которые связаны с госбюджетными темами: ГП-448 «Исследование и разработка технологий эффективного и экологического освоения природных ресурсов при открытой разработке месторождений» (№ГГ 0111U002818) и ГП-460 «Развитие теории рационального природопользования для обеспечения устойчивого функционирования техно-экосистем горнодобывающих регионов и охрана окружающей среды» (№ГГ 0113U000404).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является обоснование технологий целенаправленного формирования техногенных образований с прогнозируемыми качественными и потребительскими свойствами, управляемой структурой и устойчивостью откосов.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи исследования:

1. Изучить современное состояние разработки нерудных материалов, эффективности распределительных процессов на отвалах и складах готовой продукции, возможностей комплексного использования отходов производства, реализации природоохранных мероприятий.

2. Провести лабораторные исследования процесса гравитационной сегрегации сыпучих горных пород и их параметров, влияющих на эффективность процесса сегрегации.

3. Разработать математическую модель процесса сегрегации сыпучих горных пород с целью определения основных характеристик и установления закономерностей распределительных процессов, влияющих на характеристики техногенного образования.

4. Обосновать рациональные технологии формирования и параметры техногенных месторождений с целью обеспечения качественных характеристик.

5. Обосновать рациональное использование горнотранспортного оборудования для разработки техногенных месторождений.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является технология формирования техногенных месторождений и образований из сыпучих горных пород. Предмет исследования – закономерности разделительных процессов в сыпучих горных породах при формировании техногенных образований.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые установлено, что при формировании сыпучих техногенных месторождений тонкими слоями тангенс угла естественного откоса зависит от класса крупности сыпучих горных пород с учетом его влажности. При этом при влажности угла до 17% тангенс угла уменьшается с увеличением крупности, а при влажности более 17 % – возрастает, что негативно влияет на устойчивость техногенного месторождения.

2. Впервые установлен закон распределения размера кусков насыпного материала в техногенном образовании конической формы, сформированного отсыпкой тонкими слоями. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что размер куска сыпучей горной породы в сформированном месторождении зависит от его пространственного расположения, общей высоты конуса и максимального размера куска.

3. Впервые установлено, что при отсыпке тонкими слоями минимальная высота уступа, обеспечивающая технологическую стратификацию для сыпучих горных пород крупностью 0 – 80 мм, не зависит от плотности горных пород. Миграция более плотных частиц происходит в пределах расстояний на порядок меньше толщины отсыпаемого слоя, что не оказывает существенного влияния на общую стратификацию породы по откосу.

4. Впервые установлены условия формирования техногенного месторождения из сыпучих горных пород, обеспечивающие возможность селективной разработки с обеспечением заданного потребительского качества. Показано, что минимальная высота откоса, обеспечивающая максимально возможную стратификацию по крупности, описывается логарифмической зависимостью от максимального размера куска в составе сыпучих горных пород. Это позволяет проектировать технологические параметры формирования и разработки техногенных месторождений.

5. Впервые показано, что при формировании техногенных месторождений сыпучих горных пород по разработанной технологии естественная кривизна откоса и наличие в нижней части призмы из скальной породы наибольшей фракции, которая выполняет роль контрфорса, обеспечивает повышение устойчивости отвала  $F$  на 12% по сравнению с рассчитанной по Петерсону-Фелениусу.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Разработана математическая модель процесса сегрегации сыпучих горных пород с целью определения основных характеристик и установления закономерностей распределительных процессов, влияющих на характеристики техногенного образования.

2. Разработаны технологические схемы отдельной разгрузки штабелей товарной продукции, представленных сыпучими горными породами с учетом их крупности и технологии образования насыпи. Это позволит, в случае отклонения по грансоставу на 10...20% товарной продукции от допустимых значений, уменьшить на 15% объем горной массы для повторного пересейвания;

3. Предложенная схема отдельной разгрузки штабелей в форме конуса, плоского слоя или в форме хребта. Предложенный в работе технологический комплекс оборудования и рекомендации по практическому использованию внедрены для условий производственно-коммерческого ООО «Видис» в Донецкой области;

4. Разработана методика управления качественными характеристиками техногенных образований на основании установленных закономерностей сегрегационного распределения сыпучих горных пород.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы применен комплексный метод исследования, который включает в себя анализ, обобщение и систематизацию литературных данных; методы математической статистики – при изучении показателей сегрегации и закономерностей их изменения; теории планирования эксперимента – при моделировании процесса сегрегации в массиве горных пород; метод численного решения с использованием пакета прикладных программ – при установлении показателей сегрегации в отвале флюсовых отходов и на складах готовой продукции; аналитический – для обоснования технологических параметров при строительстве техногенных образований

**Положения, выносимые на защиту.** Следующие основные научные разработки и положения выносятся на защиту:

1. Зависимость изменения тангенса угла естественного откоса техногенных месторождений сыпучих горных пород от их влажности и крупности.

2. Зависимость среднего размера куска для элементарного объема в цилиндрических координатах от его пространственного расположения.

3. Зависимость минимальной высоты откоса, обеспечивающей максимальную стратификацию сыпучих горных пород, от их максимальной крупности.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследования и научных теорий, адекватностью разработанных математических моделей, результатами экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью результатов промышленных испытаний и внедрений на предприятиях.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Международной научной конференции «Современные проблемы экологии и геотехнологии» (г. Житомир, 2008г.); Международных конференциях «Форум горняков» (г. Днепропетровск, 2008 – 2013г.); Международной научно-технической конференции «Устойчивое развитие промышленности и общества» (г. Кривой Рог, 2012 г.).

В полном объеме результаты работы рассматривались на кафедре строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, 2016 г.).

**Личный вклад соискателя** заключается: в установлении математических зависимостей и сравнительном анализе полученных данных; литературном поиске особенностей физического проявления сегрегации в горном деле, соответствующего математического аппарата и графической обработке результатов исследований; математическом планировании экспериментов; проведении экспериментов и обработке результатов экспериментов; разработке и создании установки для проведения лабораторных исследований; в определении требований к технологическому комплексу отвального оборудования для достижения максимального распределительного эффекта на откосе; в разработке технологических схем разработки техногенных месторождений, сформированных на основе установленных закономерностей сегрегации.

**Публикации.** Основные научные положения и результаты работы по теме диссертации опубликованы в 15 научных работах, из которых 9 – в специализированных изданиях ВАК Украины, 1 – в специализированном издании ВАК ДНР, 5 материалов докладов на международных и национальных научных конференциях.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, перечня использованных литературных источников из 104 наименований отечественных и зарубежных авторов на 12 страницах и 3 приложений. Общий объем работы – 158 страниц машинописного текста, в том числе 61 рисунок, 13 таблиц, а также 3 приложения на 16 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе** выполнен анализ объёмов и состава отходов открытой разработки месторождений полезных ископаемых с учетом двойной функциональной предназначенности. С одной стороны, как источника природных ресурсов, который может быть использован наряду и наравне с первичным сырьем месторождений. С другой – в роли экологического потенциала, который обеспечивает как общие условия жизни производства, так и саму степень возможного вовлечения в эксплуатацию ресурсов, их переработку и использование. В настоящее время в отвалах и хвостохранилищах горных предприятий страны накопилось свыше 7 млрд. т пород, открытыми горными работами нарушено около 190 тыс. га земель, при этом, значительная часть подобных техногенных формирований содержит в себе потенциальное сырье для различных отраслей народного хозяйства, т.е. представляет собой техногенные месторождения.

Выполнен обзор результатов исследований в области формирования и разработки техногенных месторождений. Однако в большинстве работ рассматриваются вопросы, связанные с управлением процесса формирования отвалов на открытых горных работах для обеспечения их устойчивости или для решения вопросов рекультивации. Недостаточно изучены вопросы формирования техногенных месторождений с заданной структурой для последующей их разработки,

в особенности тех, что представлены отходами переработки обогатительных фабрик горных предприятий и вынужденно укладываются в отвалы.

В отвалы обогатительных фабрик горно-металлургических предприятий Донбасса ежегодно складывается порядка 2.5 млн. м<sup>3</sup> сухих отходов переработки флюсов. Одной из причин попадания в отходы – несоответствие гранулометрического состава гранулометрическому составу товарной продукции. Отходы, пройдя по технологической цепи горного производства, на выходе представляют сыпучую горную массу с новыми технологическими свойствами, но с химическим составом подобным полезному ископаемому.

Показано, что существенное влияние на структуру техногенного образования, товарную ценность его структурных элементов, устойчивость массива в целом оказывает степень проявления сегрегации сыпучих горных пород, которая в свою очередь зависит от технологии отвалообразования. Недостаточная изученность закономерностей сегрегации и влияния технологии отвалообразования на степень проявления сегрегации в сыпучих горных породах не позволяет прогнозировать структуру техногенные месторождения с целью эффективной разработки их в будущем.

На основании обобщения теоретических основ управления процессами сегрегации горных пород предложена теоретическая концепция кинетики процесса сегрегации дробленого скального материала при отсыпке отвалов. В основе этой концепции лежит модель перемещающейся горной массы как некоего образования, которое претерпевает различные фазные переходы при движении по поверхности с углом естественного откоса.

Процесс движения горной массы по откосу в реальных условиях отвалообразования делится на три фазы:

– первая фаза – движение горной массы в виде консолидированного образования, с коэффициентом разрыхления, обеспечивающим определенную стабильность объема рыхлых пород в данный момент времени. Подобное состояние характеризуется тем, что в процессе движения сыпучей горной массы, каждая отдельность (кусок) испытывает постоянное объемное взаимодействие, то есть действие окружения со всех (шести) направлений;

– вторая (промежуточная) фаза характеризуется постепенным увеличением числа отдельностей, движение которых напоминает хаотически сталкивающиеся свободные частицы;

– третья фаза – это фаза максимальной дезинтеграции или «свободного движения» отдельностей, то есть когда подавляющее большинство частиц при своем движении периодически испытывают соударения с одного, максимум с двух направлений.

Вклад каждой из фаз в разделительный процесс горной массы, двигающейся по откосу, определяется свойствами горных пород, общей высотой отвала, производительностью отвалообразования (исходным потоком горной массы), технологией и параметрами процесса отвалообразования.

На основании проведенного анализа современных достижений науки и практики открытой разработки месторождений полезных ископаемых сформулированы вышеуказанные цель и задачи исследований.



Во **втором разделе** установлены закономерности процесса сегрегации при формировании техногенных образований.

Лабораторные исследования проводились на специально разработанном стенде (рис. 1). При этом решались следующие задачи:

- установить взаимосвязь между углом естественного откоса штабеля и гранулометрическим составом слагающих его пород для заданной влажности массива, что практически не определялось ранее при проведении подобных исследований;

- установить закономерности формирования внутренней структуры техногенных формирований различной формы (слой, конус) в зависимости от режима отсыпки (имитация конвейерной непрерывной разгрузки или автомобильной разгрузки на откос с последующим бульдозерным сталкиванием);

- исследовать характер изменения качественных показателей горной массы при формировании техногенных объектов;

- оценить разделительную способность наклонной плоскости (откоса);

- оценить влияние исходного гранулометрического состава сыпучего материала на проявление эффекта сегрегации.

По результатам эксперимента установлено следующее:

При отсыпке штабеля из сыпучих горных пород происходит перераспределение масс по крупности материала в теле штабеля. В верхней части штабеля доминирует мелкая фракция, в нижней части – крупная. Отсыпка производится наклонными слоями, а распределение масс по крупности формирует слои, параллельные основанию штабеля.

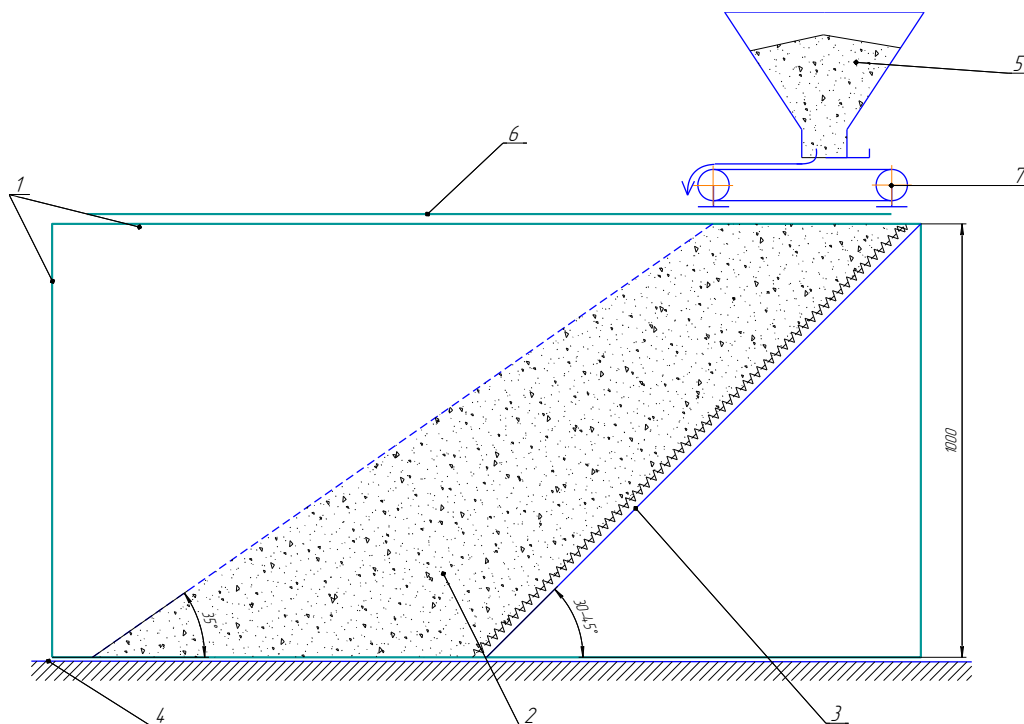


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда

1 – каркас корпуса; 2 – передняя стенка корпуса; 3 – плоский наклонный щиток с переменным углом установки; 4 – горизонтальное основание; 5 – бункер; 6 – направляющие; 7 – питатель

В поперечном сечении штабеля выделяются три зоны формирования его внутренней структуры. Первая прилегает непосредственно к пионерной насыпи и ограничивается поверхностью с углом естественного откоса. Вторая занимает основной объем штабеля и характеризуется достаточно стабильным, устоявшимся соотношением масс различных фракций. Третья зона отсыпки непосредственно прилегает к поверхности штабеля (рис. 2). Распределение масс по крупности в третьей зоне значительно отличается от распределения масс внутри штабеля



Рисунок 2 – Распределение и плотность укладки сыпучих горных пород в передней части штабеля (вид с боку)

Экспериментально установлено, что разделительная способность наклонной поверхности зависит от степени дезинтеграции исходного материала в начальный момент движения по откосу. Степень дезинтеграции горной массы по мере её сползания по откосу возрастает. Из этого следует, что формирование техногенных месторождений предпочтительнее производить оборудованием с возможностью максимальной дезинтеграции при отсыпке (конвейерная отсыпка предпочтительнее бульдозерной).

Экспериментально установлено, что разделительная способность наклонной поверхности насыпных тел увеличивается по мере возрастания высоты штабеля, а ее способность к торможению (удержанию) кусков породы – «шероховатость» возрастает по откосу сверху-вниз, то есть, к основанию штабеля.

В процессе сползания массы происходит втирание мелких фракций в пространство между кусками крупных фракций. Постепенно просеиваясь, фракции-заполнители перемещаются от верха до основания штабеля, что позволяет сделать вывод о том, что для сыпучей горной породы определенного гранулометрического состава существует оптимальная высота наклонной поверхности эффективного разделения.

При отсыпке сыпучих пород на горизонтальное, либо на наклонное осно-

вание происходит формирование определенного угла естественного откоса, который для данного типа пород определяется в основном классом крупности и влажностью и не зависит от способа формирования насыпи (табл. 1).

Таблица 1

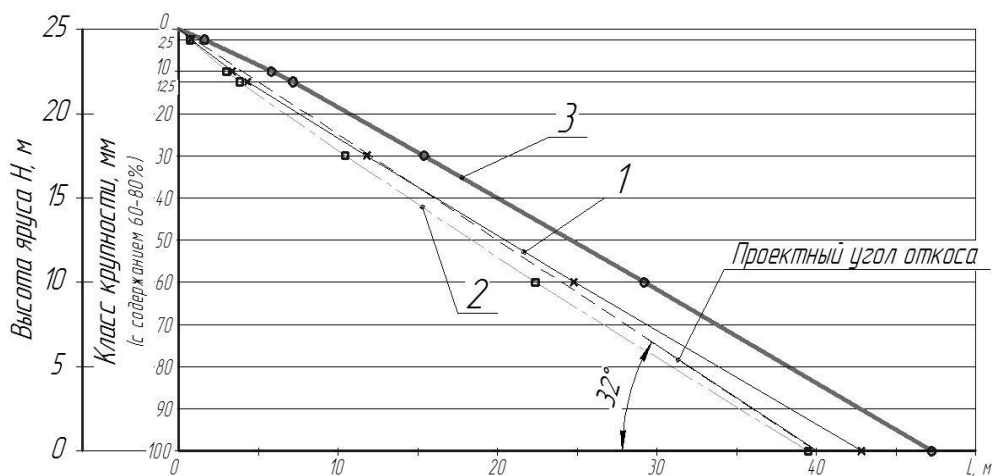
Зависимость угла естественного откоса от класса крупности и влажности породы

Класс крупности, мм	Угол естественного откоса штабеля пород, (град. мин.)		
	Сухие породы	Влажные породы (весовая влажность $W = 12\%$ )	Мокрые породы ( $W \geq 17\%$ )
0 – 2.5	38° 20'	42° 00'	21° 30'
2.5 – 5.0	38° 00'	40° 30'	27° 50'
5.0 – 15.0	36° 30'	36° 45'	32° 30'
15.0 – 20.0	34° 35'	36° 20'	33° 15'
20.0 – 40.0	34° 30'	34° 55'	33° 55'
40.0 – 80.0	34° 00'	34° 30'	33° 50'
80.0 – 130.0	33° 55'	34° 15'	34° 10'

Кривизна поверхности откоса техногенного формирования, сложенного из сыпучих горных пород, определяется распределением масс по крупности и влажности слагающих пород. На рис. 3 изображены поверхности откосов техногенного месторождения сформированного в результате отсыпки горных пород заданной крупности (табл. 1) при различной влажности.

Аналитическая зависимость между тангенсом угла естественного откоса и гранулометрическим составом сыпучей горной породы представлена на рис. 4.

Результаты физического моделирования процесса сегрегации отвалных пород позволили разработать требования для создания математической модели сегрегации.



Форма откоса для пород:  
1 – естественной влажности; 2 – влажных; 3 – мокрых

Рисунок 3 – Форма откоса в зависимости от грансостава и влажности материала

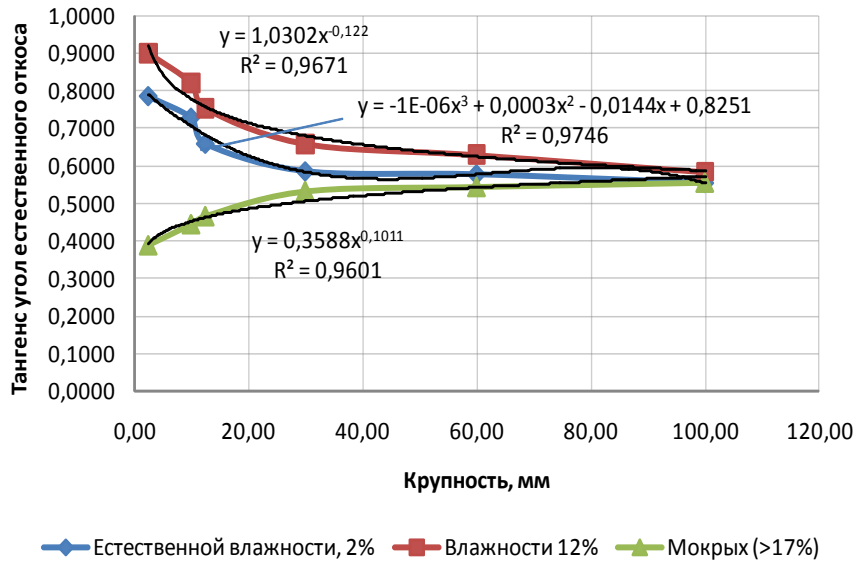


Рисунок 4 – Изменение тангенса угла естественного откоса штабеля от класса крупности материала и его влажности

Математическое моделирование эффекта сегрегации осуществляется на основании фундаментальных законов теоретической механики. При этом соблюдаются следующие требования:

- математическая модель учитывает характеристики горной массы (гранулометрический состав, связность элементов, геометрическую форму и физические свойства частиц), что достигается введением характерного безразмерного параметра  $R$ , пропорционального размеру среднего размера куска  $d_{cp}$  ( $R \sim d_{cp}/2$ );
- характер взаимодействия (1, 2) между частицами и особенности взаимодействия этих частиц с основанием и стенками бункера учитывает гравитационную составляющую, которая пропорциональна  $R^3$ , реакцию опоры при взаимодействии кусков между собой и с ограничивающими поверхностями и влияние среды, которые пропорциональны  $R^2$ :

$$f_x = f_{x1} - G \cdot v_{x1} \cdot R^2, \quad (1)$$

$$f_z = f_{z1} - g \cdot m + B \cdot \exp\left(-\frac{z_1}{b}\right) \cdot R^2 - G \cdot v_{z1} \cdot R^2, \quad (1)$$

$$f_x = f_{x1} + dt \cdot x_1 \cdot r_{s1} - G_2 \cdot G_1 \cdot (v_{x1} - v_{x2}) + \sigma, \quad (2)$$

$$f_z = f_{z1} + dt \cdot z_1 \cdot r_{s1} - G_2 \cdot G_1 \cdot (v_{z1} - v_{z2}) + \sigma, \quad (2)$$

где  $G_1, G_2$  – параметры, характеризующие трение между взаимодействующими объектами 1 и 2 (частица – частица, частица – поверхность);  $\sigma$  – дополнительное слагаемое учитывающее трение о воздух.

Предполагается, что отсыпка сыпучего материала (вбрасывание частиц – кусков различной величины) и взаимодействие между частицами происходит в соответствии с законом нормального распределения – закона Гаусса.

Взаимодействие между частицами происходит на эффективных радиусах  $R_i$ , которые в первом приближении пропорциональны  $V_i^{1/3}$   $i$ -ой частицы – (рис. 5).

На эффективный радиус взаимодействия накладывается дополнительное требование:

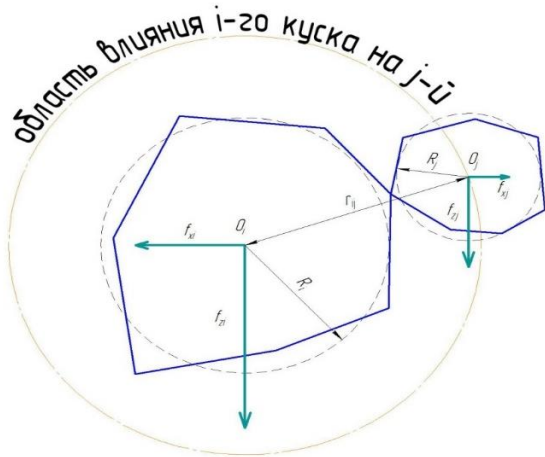


Рисунок 5 – Схема взаимодействия кусков породы

$$r_{ij} = C \exp \left[ \frac{1 - \frac{r \cdot r'}{R_0 \cdot R_0'}}{c} \right]$$

где  $r, r'$  – радиус-вектора, определяемые выражением  $r = \text{abs}(\Delta x + i \cdot \Delta z)$

Ограничения по пространству взаимодействия вокруг отдельно взятого  $i$ -го куска с учетом формы кусков -  $\lambda$ , устанавливаются условием  $r_{ij} \leq \lambda |R_i + R_j|$

Массив скоростей движения  $v$  и положений  $(x, z)$  для отдельностей (кусков) определяется путем выделения тангенциальных и нормальных составляющих (4)

$$v_x = v_{x0} + dt \cdot f_x / m$$

$$v_z = v_{z0} + dt \cdot f_z / m$$

$$x = x_0 + dt \cdot v_x$$

$$z = z_0 + dt \cdot v_z$$

(4)

– модель должна быть адаптирована к реальным схемам формирования техногенных объектов, что обеспечивается возможностями моделировать программой Matlab необходимый гранулометрический состав, производительность разгрузочного устройства, ширину разгрузочного устройства и, в известных пределах, характер взаимодействия между элементами системы.

Блок схема алгоритма решения задачи по определению распределения грансостава в результате сегрегации сыпучего материала приведена на рис. 6.

Основным результатом разработанной математической модели на данном этапе является возможность определения гранулометрической характеристики сыпучего материала в любом сечении конусообразного насыпного объекта, определяемой по совокупности рассчитанных значений  $R_{cp}(h, r)$ . Величина  $R_{cp}$  зависит от исходного гранулометрического состава и физико-механических свойств сыпучего материала, а так же условий формирования (горнотехнических факторов и параметров горнотранспортного оборудования).

Для каждого горизонтального сечения (слоя) конусообразной насыпи закон распределения гранулометрического состава исходного материала в цилиндрических координатах имеет вид (5),

$$R_{cp} = \gamma \cdot ((1 - R_0/R_{max}) \times \exp(-r^2/H^2 \text{ctg}^2 \alpha)) + A(\rho)R_0^3 - B(\text{tg}(\varphi)R_0^2 + C(\lambda)R_0 + R_{min}/R_{max}), \quad (5)$$

где  $R_0, R_{max}$  и  $R_{min}$  – соответствующие значения для среднего, максимального и минимального (обычно  $R_{min} \rightarrow 0$ ) размера куска исходного материала, м;  $\gamma = R_{max} \times (H-h)^2/H^2$  – нормировочный коэффициент;  $A, B$  и  $C$  – величины характеризующие физико-механические свойства сыпучего материала и про-

порциональны плотности куска  $\rho$ , коэффициенту внутреннего трения сыпучего материала  $f = tg\varphi$ , фактору «лещадности»  $\lambda$  и имеют соответственно размерность  $[м^{-3}]$ ,  $[м^{-2}]$  и  $[м^{-1}]$ ;  $H$  – высота конуса, м;  $h$  – высота изучаемого горизонта (слоя) относительно основания, м.

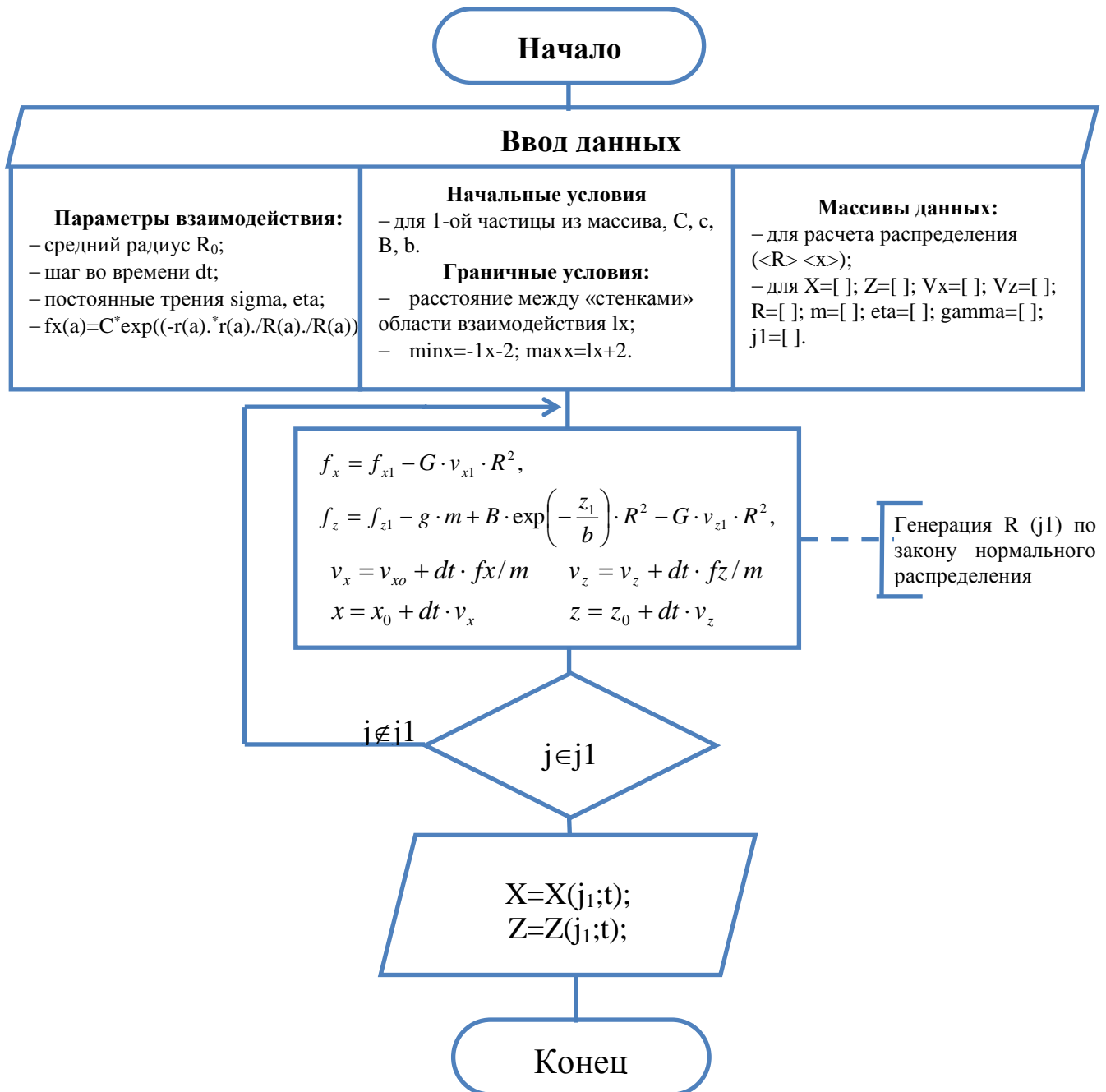


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма математической модели

Для отходов ДОФ №1 ЧАО «ДФДК», отгружаемых на конус, статистика распределения частиц по среднему радиусу  $R_{cp} = f(r, h)$  представлена на рис. 7, а семейство кривых (для  $R_{cp} = const$  при шаге построения  $\Delta h = 0,5$  м и  $\Delta r = 1,0$  м) – на рис. 8. Построение осуществлялось при следующих условиях: параметры насыпи – высота  $H = 5$  м, угол откоса  $34^0$ ; характеристика сыпучего материала –  $R_0 = 0,85$  мм,  $R_{max} = 40$  мм,  $R_{min} = 0$  мм.



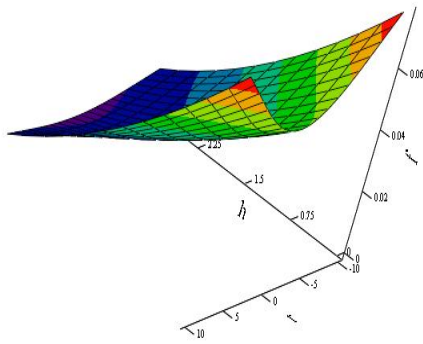


Рисунок 7 – Изменение среднего размера куска породы в техногенном образовании - насыпном конусе

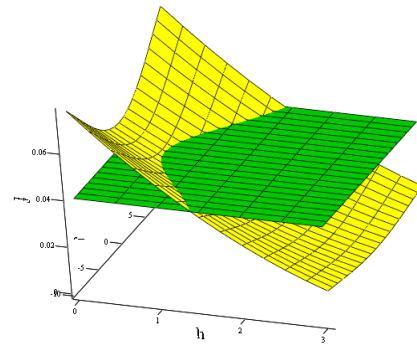


Рисунок 8 – Получение кривых постоянного гранулометрического состава породы в насыпном конусе (для  $R_{cp} = 0,040\text{м}$ ).

Область постоянного значения  $R_{cp}$  в теле конуса определяется совместным решением (5) и уравнения для плоскости  $R_{cp}=f(r,h)=const$

$$h = H - (HR_{cp}) \times (R_{max} - R_0 \exp(-r^2/H^2 \text{ctg}^2 \alpha))^{-0.5}, \quad (6)$$

Установленная в результате моделирования зависимость между средним размером куска породы для выделенного горизонтального слоя от положения этого слоя относительно основания яруса (высоты конуса) позволяет прогнозировать качество сегрегационного эффекта на наклонной поверхности для исходного продукта с заданным гранулометрическим составом. Обработка расчётных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность полученной математической модели.

Моделирование отсыпки сыпучего материала, состоящего из зерен разного размера и плотности, на откос яруса показало, что происходит естественное разделение сыпучих горных пород, которое характеризуется концентрацией в нижнем слое наиболее крупных и массивных зерен, а в верхнем слое мелких и менее плотных (рис. 9). Степень выраженности этого эффекта зависит от гранулометрического состава и влажности исходного материала, формы и плотности отдельностей, а также толщины отсыпаемого слоя на наклонную поверхность. Тело яруса приобретает слоистую структуру со слоями с различными коэффициентами разрыхления.

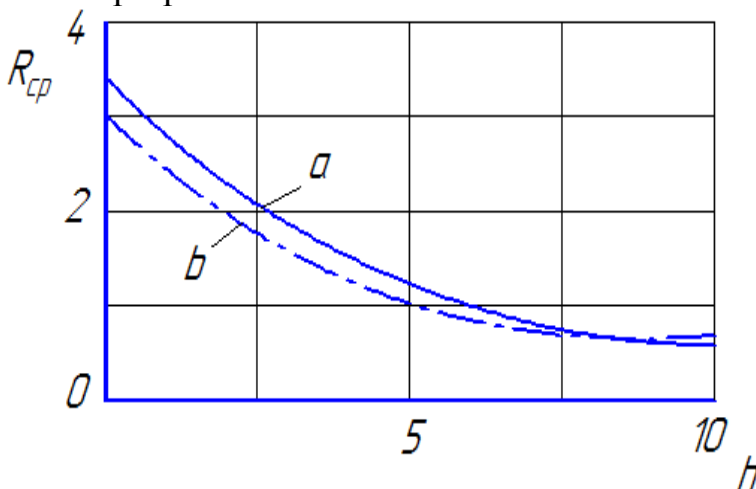


Рисунок 9 – Характер распределения среднего радиуса «кусков» породы по высоте отвала:

*a* – кривая распределения для случая равной плотности различных кусков материала; *б* – распределение с учетом утяжеления мелких фракций

Результаты моделирования показали, что миграция более плотных частиц проходит в пределах толщины отсыпаемого слоя, при этом расстояния миграции на порядок ниже его.

Потребительские свойства сыпучего материала определяются его гранулометрической характеристикой, которая выражается через средний размер куска -  $R_{\text{ср}}$ . В связи с этим степень раскрытия сыпучего материала по крупности вдоль поверхности откоса, а, следовательно, и эффективность процесса сегрегации  $R_{\text{ср(отн)}}$  предлагается оценивать величиной равной отношению среднего размера куска в рассматриваемом слое -  $R_{\text{ср}}$  к величине среднего размера куска в исходном материале до разделения -  $R_{0\text{ср}}$ . Скорость изменения величины  $R_{\text{ср(отн)}}$  вдоль образующей откоса характеризует эффективность применяемой технологии и влияние параметров отсыпки с использованием эффекта гравитационной сегрегации. Диапазон значений величины характеризует возможный перечень товарной продукции.

В результате моделирования установлено, что минимальная высота, обеспечивающая максимальную стратификацию по крупности, описывается логарифмической зависимостью от максимального размера куска сыпучих горных пород:

$$H_{\text{min}} = 3,3269 \ln(d_{\text{max}}) - 0,6014 \quad (7)$$

В **третьем разделе** выполнено обоснование технологических схем и параметров формирования техногенных месторождений при отсыпке горных пород.

Выполнен анализ влияния технологии и параметров отвалообразования на структуру техногенного месторождения, который свидетельствует о том, что в подавляющем большинстве оно формируется путем отдельной укладки различных по своим свойствам горных пород. Отмечено, что при складировании сыпучих горных пород с учетом влияния технологии и параметров отвалообразования на эффективность сегрегации позволит получать структурные элементы в массиве образования с новыми качественными характеристиками и прочностными свойствами.

Разработаны схемы рационального применения отвального оборудования при использовании конвейерного и колесного видов транспорта, обеспечивающей максимальную степень сегрегации сыпучих горных пород, высокую производительность оборудования на отвальном участке, минимизацию экологических издержек при соблюдении требований по безопасному ведению отвальных работ.

Произведена оценка эффективности применения конвейеров, автомобильно-бульдозерных комплексов и карьерных погрузчиков при формировании техногенных месторождений с учетом их влияния на эффект сегрегации.

Выполнено объемное моделирование процесса отвалообразования отходов ДОФ с учетом характера проявления сегрегации (для материала с крупностью 0-5 мм - 70%, 5-10 мм - 20% и 10-25 мм - 10%) с применением программного продукта «AutoCAD 2009». Определены форма и параметры переходных областей между областями различного гранулометрического состава. Выбрана рациональная схема работы - непрерывный поворот поворотного-звеньевое отвалообразователя с минимальным вылетом отвального звена  $l_{\text{зв}} = 1 - 2\text{м}$  (рис. 10).



Показано, что стратификация по крупности, при обеспечении параметров разработанной технологии отсыпки, обеспечивает повышение коэффициента запаса устойчивости  $F$  на 12% по сравнению с расчетным (по Петерсону-Фелениусу) за счет естественного контрфорса.

Периферийная разгрузка автосамосвалов и погрузчиков создает условия для начала движения горной массы по откосу в состоянии максимального разрыхления с эффективной сегрегацией.

Выполнен выбор оборудования и расчет схемы использования карьерных погрузчиков в качестве выемочно-погрузочного и погрузочно-транспортного оборудования для формирования техногенного месторождения металлургических флюсов в условиях ДОФ №1 ЧАО «Докучаевский флюсо-доломитный комбинат». Установлена номинальная грузоподъемность погрузчиков от 11,5 до 15,0 тонн, что обеспечивается вместимостью ковшей от 3,5 до 9,3 м<sup>3</sup>. Для условий ЧАО «ДФДК» обосновано применение модели погрузчика Volvo L120F (12,5 т) в качестве погрузочно-транспортного оборудования и в качестве забойного погрузочного оборудования с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7548 (42т).

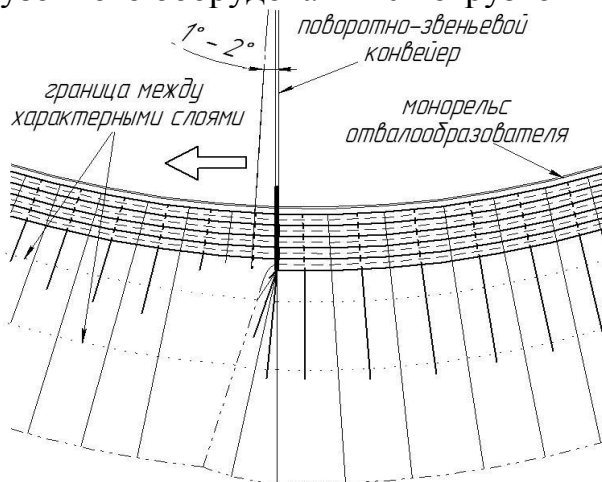


Рисунок 10 – Формирование отвала с непрерывным поворотом конвейера и малым вылетом отвальной консоли

Для автомобильно-бульдозерных отвальных комплексов и колесных карьерных погрузчиков максимальное сегрегационное разделение сыпучего материала (песчано-гравийная смесь) на наклонной поверхности откоса техногенного образования, достигается при высоте яруса не менее 15 м.

Достижение проектной высоты насыпи обеспечивается поочередной отсыпкой трех ярусов высотой по 20 м, или четырех – по 15 м, что увеличивает количество продуктивных зон в массиве.

**Четвертый раздел** посвящен использованию результатов исследований для повышения эффективности разработки техногенных месторождений металлургических флюсов.

С целью уменьшения материальных и финансовых потерь, сокращения объемов конечного продукта, требующих дополнительной переработки – грохочения, разработаны схемы разгрузки напольных складов (для крупности 40-80 мм) конусной и хребтовой формы с учетом методики определения их внутренней структуры.

Структура техногенного образования в виде насыпного конуса для фракции 40 – 80 мм известняка обычного, с превышением допустимого предела по классу -40мм более 5%, определена по схеме, представленной на рис. 11.

Положение поверхностей предельных значений соответствующей крупности относительно основания насыпи определяются параметрами  $H_{1,2}$ , которые в цилиндрических координат ( $H, r$ ), соответствуют (8)

$$H_{1,2} = H - (H d_{cp1,2}/2) \times (d_{max} - d_{cp1,2}/2 \times \exp(-r^2/H^2 \text{ctg}^2 \alpha))^{-0.5}, \quad (8)$$

где  $d_{cp1}$  и  $d_{cp2}$  - средний размер куса исходного материала и средний размер куса кондиционного материала соответственно, мм.

Для склада, представленного сыпучей горной породой крупностью 40-80 мм, при  $d_{cp1}=56,2$  мм и  $d_{cp2}=57,7$  мм получим для исходного сырья  $H_1 = 9,2$  м, а для кондиционного сырья  $H_2 = 8,4$  м. Высоты определены относительно основания склада вдоль оси техногенного образования (рис. 12).

Порядок отработки двухфазного штабеля (рис.12) состоит из двух этапов: первоначально производится снятие некондиционного верхнего горизонтального слоя мощностью  $H_n=7,6$  м (верхняя часть конуса) с транспортированием извлеченной горной массы на повторное просеивание, а затем – выемка кондиционного слоя мощностью  $H_k = 8,4$  м с отгрузкой потребителю в средства железнодорожного транспорта.

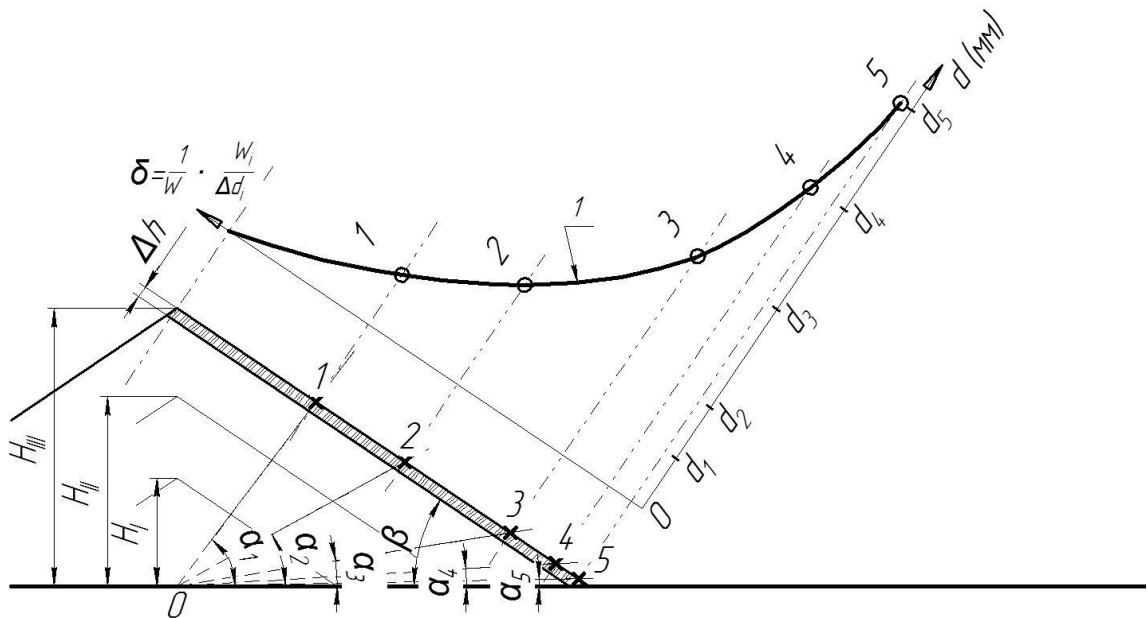


Рисунок 11 – Схема к определению распределения сыпучего скального материала по крупности в тонком слое  $\Delta h$  откоса насыпного образования на основе кривой – 1 распределения частностей весовых выходов  $\delta = f(d)$ :  $H_1, H_2, H_3$  – этапы образования насыпи;  $\beta$  – угол откоса;  $\alpha_1 \dots \alpha_5$  – углы определяющие границы (пределы) для соответствующей крупности

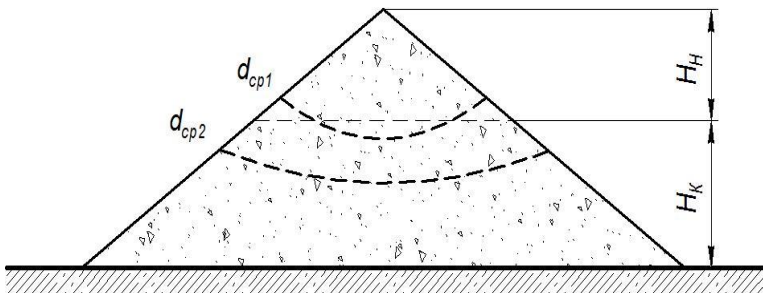


Рисунок 12 – Распределение объема штабеля готовой продукции на области фактического и нормативного качества сырья, определенные по значениям  $d_{cp}$  (обозначены пунктирными линиями).

Предложены технологии разработки техногенных месторождений различным горнотранспортным оборудованием. При отдельной разгрузке склада фракции 40 – 80 мм известняка обычными горизонтальными слоями с применением традиционного выемочно-погрузочного оборудования (карьерные мехлопаты, роторные экскаваторы, погрузчики), требуется пересевание 12% горной массы. Для параметров склада ЦПТЛ ЧАО «ДФДК» это составит 11500 м<sup>3</sup>. Применение грейферной разгрузки снижает потери кондиционного материала на 2 – 4 %, что дополнительно сэкономит 150 тыс. руб. в год.

Для условий ЧАО «ДФДК» и ПК ООО «Видис» разработана технология создания и последующей обработки техногенных месторождений металлургических флюсов экскаваторами типа прямая лопата (рис.13). Апробация полученных результатов была произведена на базе ДОФ №1, ЦПТЛ ЧАО «Докучаевский ФДК» и участка №2 ПК ООО «Видис» для условий складирования щебня фракции 5-15мм естественной влажности и 20% содержанием некондиционных крупности – 5 мм.

По мере отгрузки фракции 5 – 15мм на  $L_{0 \max} = 7,5$ м осаживается «шапка» конуса произвольно или принудительно с помощью навесного оборудования (скребка), которая содержит 73% и более фракцию 0 – 5мм. После отгрузки этого объема горной массы, как продукции для производства закладочных работ, вновь обнажается поверхность откоса для сегрегации щебня.

Применение прямых гидравлических мехлопат позволяет производить первоначальную выемку пород мелких фракций в верхней части откоса, а затем пород крупных фракций в нижней, с минимальным разубоживанием полезного ископаемого (рис. 14).

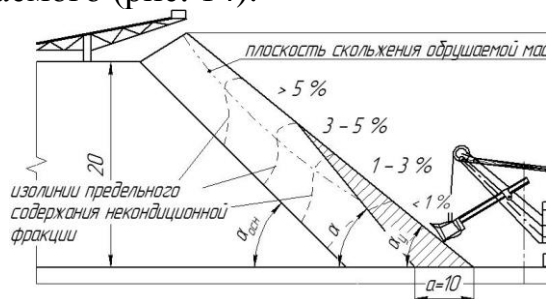


Рисунок 13 – Схема отработки кондиционной области (фракция 5-15мм) с поверхности конуса отвала

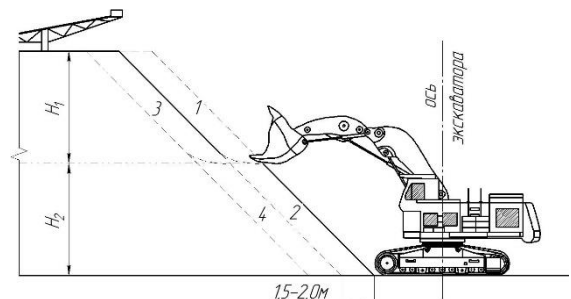


Рисунок 14 – Схема последовательной обработки горных пород после сегрегационного разделения на откосе: 1, 3-мелкая фракция; 2,4 – крупная фракция

Предложена схема отдельной разгрузки техногенного месторождения на участке переработки отходов ДОФ №1 ЧАО «ДФДК» и участке № 2 ПК ООО «Видис» с применением роторных экскаваторов.

Принимая во внимание сезонность работ на участках (с апреля по ноябрь месяц), при продолжительности сезона 4400 часов, годовая производительность экскаватора составит – 861 300 м<sup>3</sup>/год или 1.8 млн. т/год. Для обеспечения заданной производительности участка в 1.2 млн. т/год достаточно одного экскаватора ЭР-320.

Разработан вариант послойной обработки массива техногенного месторождения с использованием мобильного оборудования (погрузчиков) по схеме работы на двух уступах. Слои кондиционных пород мощностью до 15 м обрабатываются одним погрузчиком, который обслуживает 2 уступа. Переходный верхний слой мощностью 3 м и переходный нижний слой в 5 м обрабатываются одним уступом отдельно.

Рациональный шаг переноса съезда при поочередной работе погрузчика на нескольких горизонтах (подустапах) может быть выявлен на основе минимума приведенных затрат на выемку, погрузку и транспортировку

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенных технологических решений на ЧАО «Докучаевском ФДК» составляет 5 272 тыс. грн.

## **ВЫВОДЫ**

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой получено решение актуальной научно-практической задачи по разработке технологии формирования техногенных месторождений с прогнозируемой структурой и качественными показателями на основании установленных закономерностей сегрегации, что позволяет решать задачи по рациональному комплексному использованию минеральных ресурсов, по повторной добыче сырья из отходов горного производства, по уменьшению негативного воздействия горного производства на окружающую среду.

1. На основании математического моделирования процесса сегрегации крупнокусковых горных пород установлено, что этот процесс может быть описан стохастической функцией Фоккера-Планка, а гранулометрический состав исходных горных пород – функцией Розина-Раммлера с ограничениями по их максимальной крупности. Впервые определена связь между эффективностью сегрегации сыпучего материала при формировании техногенного образования и технологией его отсыпки с учетом физико-механических свойств и гранулометрического состава сыпучих горных пород.

2. Впервые проведены экспериментальные исследования на специально разработанной установке, которые подтвердили экспоненциальные закономерности процесса сегрегации горных пород. По эффективности разделительного процесса установлены рациональные комплексы карьерного оборудования и технологические схемы их работы. Раздельная разгрузка техногенных образований с применением выемочно-разгрузочного оборудования различных типов позволяет уменьшить объем продукции, которая требует дополнительной сортировки на 16 %, с минимальным разубоживанием пород различной крупности. Разгрузка слоев штабеля торцевыми забоями обеспечивает рациональную организацию работ с максимальной производительностью выемочно-погрузочного оборудования как циклического, так и поточного действия.

3. Обоснован технологический комплекс оборудования и схемы его работы для формирования техногенного образования с заданными характеристиками качества флюсового сырья. Разработаны технологические схемы разработки техногенных насыпей с применением различного выемочно-погрузочного и транспортного оборудования.

4. Определено, что при отсыпке и сегрегации горных пород наибольшее изменение гранулометрического состава наблюдается в верхнем и нижнем слоях массива. Средний слой имеет гранулометрический состав подобный исходному материалу. Плотность укладки материала в массиве неравномерная, что приводит к его «пятнистой» структуре и образованию внутренних зон с пониженной плотностью. Наименьшая плотность укладки создается в нижней передовой зоне массива, которая соприкасается с его основанием. При отсыпке конусообразных техногенных насыпей в теле конуса образуется центральный обелиск - ядро, к которому относится в основном мелкая фракция горной массы, а поверхность откоса насыпи приобретает кривизну, величина которой определяется, в первую очередь, распределением горной массы по крупности в результате её сегрегации и влажностью исходных пород.

5. Установлено, что эффективное сегрегационное разделение флюсовых отходов происходит при разгрузке автосамосвала или одноковшового погрузчика на откос. Для пород естественной влажности высота отвального яруса должна составлять не менее 10 м. Для пород с влажностью, превышающей естественную на 15...20%, высота отвального яруса должна составлять 15 м. В случае применения конвейерной отсыпки эти значения равны соответственно, 5 и 10 м, а применение технологии конвейерной отсыпки тонкими слоями позволяет формировать слоистую структуру насыпи, которая эффективна для последующей разработки.

6. Подтверждено, что при формировании плоскопараллельного штабеля горной массы, изоповерхности ее распределения по крупности имеют горизонтальное расположение. Это позволяет применять для разгрузки насыпи основные типы выемочно-погрузочного оборудования, которое обеспечивает минимальное разубоживание пород различной крупности. Качество отсыпанных слоев определяется гранулометрическим составом исходного материала, технологией формирования штабеля и техническими характеристиками применяемого оборудования.

7. Разработанные технологические схемы формирования и разработки техногенных месторождений и образований флюсового сырья проверены в условиях производственно-коммерческого общества ограниченной ответственности «Видис». По результатам выполненных исследований разработаны рекомендации по разгрузке напольных складов товарной продукции на ЧАО «ДФДК» и ПК ООО «Видис». Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенных технологических решений на ЧАО «Докучаевском ФДК» составляет 5 272 тыс. грн.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Научные работы, опубликованные в профильных научных журналах и изданиях*

1. **Кустов, В.В.** О математическом моделировании процесса сегрегации горной массы при формировании конусообразного объекта / В.В. Кустов, Г.Д.

Пчёлкин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2009. – №1. – С. 96 – 101.

2. **Кустов, В.В.** Технологические схемы разработки отходов флюсодобывающих предприятий / В.В. Кустов, Г.Д. Пчелкин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2011. – №1 (266). – С. 88 – 92.

3. Пчелкин, Г.Д. Экспериментальные исследования влияния свойств рыхлых пород на характеристику откоса насыпного техногенного образования / Г.Д. Пчелкин, **В.В. Кустов**, А.В. Кустов // *Научно-технический сборник. Горный вестник*. 95 выпуск. Криворожский национальный университет. – Кривой Рог. – 2012. – С. 219 – 223.

4. **Кустов, В.В.** Влияние особенностей технологического комплекса оборудования на свойства техногенных образований / В.В. Кустов, Г.Д. Пчёлкин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2014. – №1. – С. 60 – 64.

5. **Кустов, В.В.** Управление гранулометрической характеристикой металлургических флюсов на складах товарной продукции ЧАО «Докучаевский флюсо-доломитный комбинат» / В.В. Кустов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2014. – №8. – С. 114 – 122.

6. Пономарев, А.В. Обоснование эффективности безвзрывной выемки известняков и доломитов экскаваторами непрерывного действия с режущими рабочими органами на флюсовых карьерах Украины / А.В. Пономарев, Г.Д. Пчелкин, **В.В. Кустов** // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2008. – №1. – С. 118 – 121.

7. Пчелкин, Г.Д. Прогнозирование величины смещения оползня подработанного массива горных пород / Г.Д. Пчелкин, А.В. Пономарев, В.В. Баранник, **В.В. Кустов** // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Д., 2005. – №2. – С. 49 – 52.

8. Пчелкин, Г.Д. Управление устойчивостью отвалов посредством эффективности сегрегации скальной вскрыши на откосе / Г.Д. Пчелкин, **В.В. Кустов**, А.В. Кустов // *Геотехническая механика*. – Д., 2012. – №107. – С. 179 – 187.

9. **Кустов, В.В.** Формирование техногенных месторождений на основе управления процессом сегрегации / В.В. Кустов, Г.Д. Пчелкин // *Збірник наукових праць НГУ*. – Д.: Національний гірничий університет, 2013 – №41 – С. 24 – 29.

10. **Кустов, В.В.** Формирование и разработка техногенных месторождений на основе управления процессом сегрегации сыпучих пород. / Кустов В.В., Лабинский К.Н. // *Проблемы горного давления: сборник научных трудов*. – Донецк: ДонНТУ, 2016. - Вып. 1 (28).- с. 79-88.

***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций***

11. Пчелкин, Г.Д. О влиянии природной и техногенной деятельности на проявления оползневых деформаций юго-восточного борта карьера «Доломит» ОАО Докучаевский ФДК / Г.Д. Пчелкин, **В.В. Кустов**, А.В. Пономарев // *Форум гірників 2006. Матеріали міжнародної конференції*. – Д., 2006. – С. 136 – 143.

12. **Кустов, В.В.** О математическом моделировании процесса сегрегации сыпучих горных пород / В.В. Кустов, Г.Д. Пчелкин // *Тези V Міжнародної нау-*

кової конференції студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнології», 19 – 22 березня 2008 року. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – С. 445 – 446.

13. **Кустов, В.В.** Использование сегрегации при разработке техногенных месторождений с целью повышения качества продукции / В.В. Кустов, Г.Д. Пчелкин // Форум гірників 2009. Матеріали міжнародної конференції. – Д., 2009. – С.171 – 175.

14. **Кустов, В.В.** О проблеме выбора технологий формирования и последующей разработки техногенного месторождения с учетом сегрегации горных пород / В.В. Кустов, Г.Д. Пчелкин // Форум гірників 2011. Матеріали міжнародної конференції. – Д., 2011. – С.99 – 104.

15. Пчелкин, Г.Д. Влияние технологических процессов и свойств рыхлых пород на особенности структуры и характеристику откоса насыпного техногенного формирования / Г.Д. Пчелкин, **В.В. Кустов**, А.В. Кустов // Форум гірників 2012. Матеріали міжнародної конференції. – Д., 2012. – С. 89 – 95.

**Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:**

[1, 12] – установление математических зависимостей, математического аппарата исследований явления сегрегации, графическая обработка результатов; [2] – анализ схем разработки отходов на флюсодобывающих предприятий; [7, 8, 11, 15] – анализ особенностей проявления сегрегации в горном деле и влияния сегрегационных проявлений на устойчивость массива; [3] – разработка и создание установки для проведения лабораторных исследований, математическое планирование экспериментов, проведение экспериментов, обработка результатов экспериментов; [5, 6, 13] – установление закономерностей между эффективностью разделительных процессов и качественными показателями товарной продукции флюсодобывающих предприятий; [4, 9, 10] – проведение экспериментов по определению влияния крупности исходного материала и особенностей отсыпки на качественные характеристики техногенного образования, определение параметров технологических схем обеспечивающих максимальное раскрытие горной порода по крупности на откосе отвала; [14] – выбор и обоснование технологий формирования и последующей разработки техногенного месторождения с учетом сегрегации горных пород.