

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Романов Владислав Алексеевич

**ФОРМИРОВАНИЕ РУДОПОТОКА ПРИ ТОРЦЕВОМ ВЫПУСКЕ
РУДЫ ПОД ОБРУШЕННЫМИ ПОРОДАМИ**

Специальность 2.8.7 – «Теоретические основы
проектирования горнотехнических систем»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
Савич Игорь Николаевич

Москва - 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При добыче руды подземным способом применяют разнообразные технологии, в том числе и системы разработки с принудительным обрушением руд и пород. Это объясняется тем, что они позволяют достичь высокой мощности рудников при минимальных производственных издержках за счет существенного снижения объемов подготовки к очистной выемке руды, что частично компенсирует относительно высокие потери и разубоживание, характерные для этих технологий.

Принудительное обрушение руд и вмещающих пород осуществляют как при донном, так и при торцевом выпуске руды. В настоящее время преимущественное развитие получил торцевой выпуск, поскольку донный отличается высокой трудоемкостью в связи с относительно большим объемом подготовительно-нарезных работ при подготовке днища блока, высокими потерями в гребнях воронок или траншей, сложностью управления процессом очистной выемки руды.

В то же время для повышения эффективности этих вариантов систем разработки необходимо осуществлять процесс выпуска, основываясь на знании закономерностей движения и взаимодействия частиц, слагающих рудную массу, что позволит управлять формированием рудопотока и, тем самым, повысить уровень извлечения полезных компонентов из недр при снижении разубоживания.

Таким образом, выявление закономерностей истечения слагающих рудную массу отдельностей, влияющих на ее перемещение в очистном пространстве на всех стадиях добычи, является актуальной научной задачей.

Цель работы состоит в обосновании оптимальных параметров систем разработки с принудительным обрушением руд и вмещающих пород на основе учета траекторий движения частиц, слагающих рудопоток, и их взаимодействия в процессе торцевого выпуска рудной массы.

Основная идея работы заключается в том, что при обосновании показателей извлечения полезных ископаемых из недр следует учитывать структуру формирования рудопотока, условия взаимодействия и направление движения слагающих его частиц.

Объект исследований - горнодобывающие предприятия, применяющие системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород.

Предметом исследований являются закономерности истечения сыпучих сред и методы проектирования горнотехнических систем с обрушением руды и вмещающих пород.

Методы исследований. В работе использован комплексный метод исследований, включающий в себя аналитические и опытно-экспериментальные исследования на физических и компьютерных моделях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При торцевом выпуске до 10 % из объёма руды, приходящегося на выпускную выработку, происходит опережающее развитие фигуры выпуска по вертикали, достигающее $1/3$ от её максимального значения, при этом толщина выпускаемого слоя соответствует соотношению $D_T = 0,7 \cdot D_{Ф.В.}$ (D_T – толщина выпускаемого слоя; $D_{Ф.В.}$ – диаметр фигуры выпуска), после чего параметры фигуры выпуска развиваются равномерно и пропорционально во всех направлениях;

2. При развитии очистной выемки по простиранию с нарезкой штреками, расположенными в лежачем боку на контакте руда-порода зону влияния выпускной выработки определяет угол падения залежи: так при угле падения до 20° фигура выпуска развивается равномерно в обе стороны от её оси, в диапазоне $20 \div 45^\circ$ она склоняется в сторону лежачего бока, а при углах свыше 45° - в сторону висячего бока.

3. Формирование рудопотока при торцевом выпуске руды включает три стадии: прямолинейное развитие, не превышающее по ширине параметры выпускной выработки; последующее расширение с захватом контактирующей

с центральной зоной рудной массы; затухание движения в зоне между границами фигур выпуска и разрыхления, где перемещение осуществляется в направлении выработки под углами $75\div 80^0$ с постепенным затуханием к ее внешнему контуру.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- определены структура и динамика развития рудопотока (фигуры выпуска) в процессе торцевого выпуска руды под обрушенными породами для максимального извлечения зон с богатым содержанием;
- установлены закономерности формирования рудопотока при торцевой погрузке и соотношение между его параметрами на различных стадиях выпуска рудной массы;
- определены условия формирования рудопотока при торцевой погрузке рудной массы, соотношение между фигурами выпуска и разрыхления, а также направление движения слагающих их отдельных частей на начальной и последующих стадиях выпуска;
- установлена зона влияния выработки при торцевом выпуске на параметры рудопотока при различном гранулометрическом составе рудной массы и различных углах наклона рудных тел.

Научное значение работы заключается в установлении зависимостей влияния параметров выпускной выработки, грансостава рудной массы, угла наклона рудного тела на формирование рудопотока, траектории движения и объём извлекаемой руды.

Практическая значимость исследований заключается в использовании закономерностей движения кусков руды при торцевом выпуске для повышения полноты извлечения зон с высоким содержанием полезного компонента.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- надежностью и представительностью исходных данных;

- достаточной степенью сходимости результатов физического и стохастического моделирования (более 90 %, тесная связь);
- применением компьютерного моделирования и теоретических расчетов по апробированным методикам.

Реализация выводов и рекомендаций. Результаты диссертационной работы рекомендованы к использованию при подземной разработке месторождений системами с обрушением руды и вмещающих пород, при проектировании соответствующих горнодобывающих предприятий, а также в научной и учебной деятельности.

Апробация работы. Основное содержание работы и ее отдельные положения докладывались и получили одобрение на Международных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2012-2017 гг.), на научных семинарах кафедры «Геотехнологии освоения недр» НИТУ «МИСиС» (2012-2017 гг.), на заседаниях международной молодежной научной школы «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» ИПКОН РАН (2013-2016 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 научных статей (из них 11 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России).

Автор выражает благодарность научному руководителю – проф., д.т.н. И.Н. Савичу, чл.-корр. РАН, проф., д.т.н. Д.Р. Каплунову, ст. преп. Г.В. Савич, доц., к.т.н. В.И. Мустафину за рекомендации, высказанные в ходе подготовки диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для повышения полноты и качества выпуска рудной массы при системах с обрушением руды и вмещающих пород необходимо основываться на общепринятых закономерностях истечения руды, с учетом принципов формирования рудопотока в конкретных условиях разработки месторождений. На процесс истечения руды оказывает влияние множество факторов как физико-механических, так и технологически-конструктивных. Оценить степень влияния большинства физико-механических факторов на процесс истечения руды практически невозможно, ввиду существования множества горно-геологических особенностей месторождений (участков) и условий их разработки. Как правило, конструктивные параметры системы определяют исходя из положения, при котором обеспечиваются приемлемые показатели извлечения. Однако, недостаточная изученность процесса формирования рудопотока не позволяет в полной мере спрогнозировать качественные и количественные показатели при выпуске рудной массы.

Изучением закономерностей движения сыпучих сред занимались: М.И. Агошков, В.Ф. Абрамов, Л.И. Барон, О.А. Байконуров, В.Р. Безух, В.Н. Власов, П.М. Вольфсон, Н.З. Галаев, В.Р. Глотов, В.А. Горбунов, Н.В. Дронов, Н.Г. Дубынин, В.Р. Именитов, С.Л. Иофин, Р.П. Каплунов, Е.В. Кузьмин, В.В. Куликов, И.К. Кунин, В.А. Кучкин, Г.М. Малахов, В.К. Мартынов, С.С. Минаев, Р.Г. Пепелев, В.А. Горбунов, А.Т. Рыков, И.Н. Савич, С.Б. Стажевский, З.А. Терпогосов, А.М. Фрейдин, Е.Г. Фурсов, Г.Д. Хетагуров, Л.М. Цинкер, В.А. Шестаков, В.С. Шеховцов, В.В. Шкарпетин, В.Л. Щербаков и другие ученые.

В процессе исследований ими экспериментально установлены общие закономерности истечения сыпучего материала через выпускные отверстия. В работах указывается, что истечение сыпучих сред происходит из объемов, которые по форме ближе всего к эллипсоиду.

По мнению Н.Г. Дубынина движение частиц при выпуске руды происходит в пределах определенной зоны, расположенной над выпускным

отверстием, которая названа "зоной потока". "Зона потока" - это пространственная фигура, образующаяся при выпуске в сыпучем теле над выпускным отверстием, внутри которой частицы одновременно участвуют в движении. В.В. Куликов "зону потока" называет предельной границей, за контуром которой частицы остаются неподвижными при любых объемах выпуска.

Многие авторы указывают, что особенностью фигуры выпуска является то, что частицы, расположенные на ее поверхности, приходят к выпускному отверстию одновременно, а их движение происходит по параболическим траекториям. При этом в движении к пункту выпуска участвует только определенная часть отбитой руды находящейся внутри зоны потока, за пределами этой зоны руда разрыхляется в объеме описываемом телом вращения, также напоминающим эллипсоид. По мере выпуска рудной массы эллипсоид разрыхления достигает области влияния выпускного отверстия, имеющую форму параболоида.

Исследованием физико-механических свойств сыпучих материалов занимались Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д., Дубынин П.Г., Барон Л.И., Куликов В.В., Мартынов В.К., Батугин С.А., Бирюков А.А., Лесин Ю.В., Рыжков Ю.А. и другие. Авторы едины во мнении, что при выпуске руды наибольшее влияние на ширину зоны потока и, соответственно, параметры эллипсоида выпуска оказывает крупность отбитой руды.

Следует отметить, что большинство ученых, занимавшихся изучением выпуска руды, были весьма ограничены в своих исследованиях, ввиду невозможности наблюдения за движением частиц, находящихся внутри отбитой рудной массы напрямую; поэтому их выводы и расчеты основаны на результатах, полученных с помощью плоских или объемных физических моделей с использованием «марок» не приспособленных для детализации процесса.

Исходя из вышеизложенного, для более детального изучения процесса истечения руды при торцевом выпуске в диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ в области исследований выпуска рудной массы;
- установление вероятности выхода кусков руды в зависимости от его местоположения в отбитом рудном массиве;
- определение степени воздействия фракционного состава рудной массы при выпуске на формирование зоны рудопотока;
- определение максимальной "зоны влияния" буродоставочной выработки в зависимости от высоты выпускаемого слоя руды при выпуске под обрушенными породами;
- определение структуры и динамики развития рудопотока (фигуры выпуска) в процессе торцевого выпуска руды под обрушенными породами.

Из-за невозможности визуализации процесса выпуска в натурных условиях, были использованы два метода исследования: аналитический и опытно-экспериментальный (физическое и компьютерное моделирование). Исследования проводились на статических моделях в поле силы тяжести при соблюдении геометрического, кинематического и динамического подобия.

Для наблюдения за протеканием выпуска рудной массы была создана физическая модель, в которой располагали жетоны (рисунок 1). Каждый жетон имел свой индекс и местоположение (координаты x , y , z). Всего для модели было использовано 440 жетонов, из которых 312 располагались в руде, 128 - в пустой породе.

В таблице 1 представлены параметры, полученные при физическом моделировании. В результате анализа полученных данных установлено, что при выпуске до 10 % руды из объёма, приходящегося на выработку, происходит стремительное развитие фигуры выпуска на высоту, достигающую $1/3$ от её максимального значения; при последующей выемке

запасов, размеры фигуры выпуска увеличиваются равномерно, а её ось отклоняется на $7\div 12$ градусов от призабойной стенки.

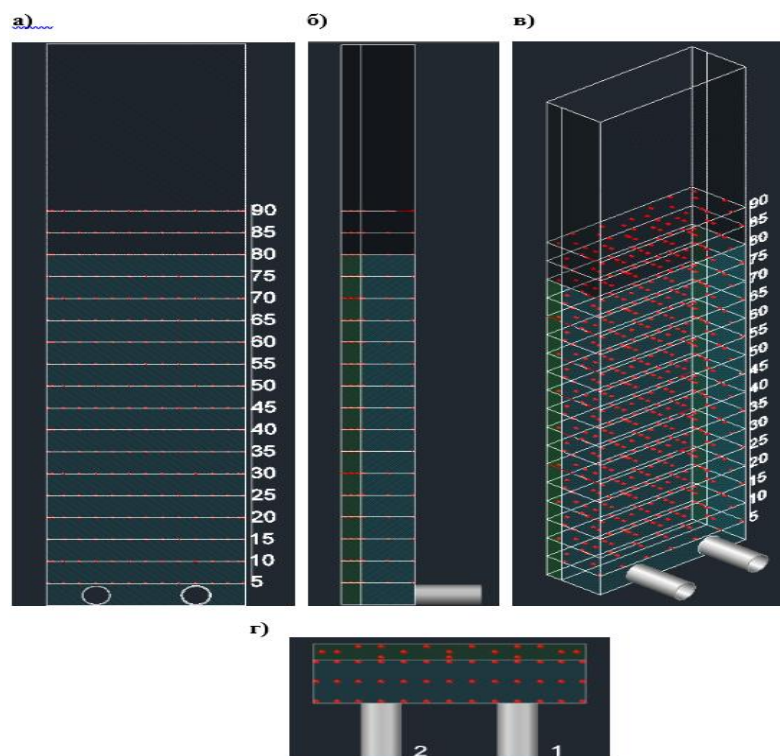


Рисунок 1 - Общий вид модели с жетонами в проекциях:

а – фронтальный; б – профильный; в – изометрический; г – горизонтальный;

1,2 – очередность выпуска из выработок; синий цвет – руда; зеленый – торцевые породы; черный – вмещающие породы; красный – марки (их размещение); 5÷90 – высотные отметки

Таблица 1 - Параметры фигуры выпуска, полученные в результате моделирования

Выработка 1					Выработка 2				
Объем выпуска	H, м; высота	D, м; диаметр	dt, м; толщина	m, м ¹ ; эксцентриситет	Объем выпуска	H, м; высота	D, м; диаметр	dt, м; толщина	m, м ¹ ; эксцентриситет
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900	25	5,7	4	0,77	900	25	5,7	4	0,77
1900	30	10,525	8	0,27	1900	30	10,525	8	0,27
2900	35	12,85	8,85	0,21	2900	35	12,85	8,85	0,21
3900	40	12,85	10,85	0,24	3900	40	12,85	10,85	0,24
4900	45	15,35	10,92	0,19	4900	45	15,35	10,92	0,19
5900	50	15,35	11	0,21	5900	50	15,35	11	0,21
6900	55	15,35	11	0,23	6900	55	15,35	11	0,23
7900	60	15,35	11	0,25	7900	60	15,35	11	0,25
8900	65	15,35	11	0,28	8900	65	15,35	11	0,28
9900	70	15,35	11	0,30	9900	75	15,35	11	0,32
10900	75	15,35	11	0,32	10900	75	15,35	11	0,32
11900	85	15,35	11	0,36	11900	85	15,35	11	0,36
12900	90	15,35	11	0,38	12900	88	15,35	11	0,36
13900	-	-	-	-	13900	90	15,35	11	0,38

На рисунке 2 представлены этапы формирования фигуры выпуска при определенных объемах добычи.

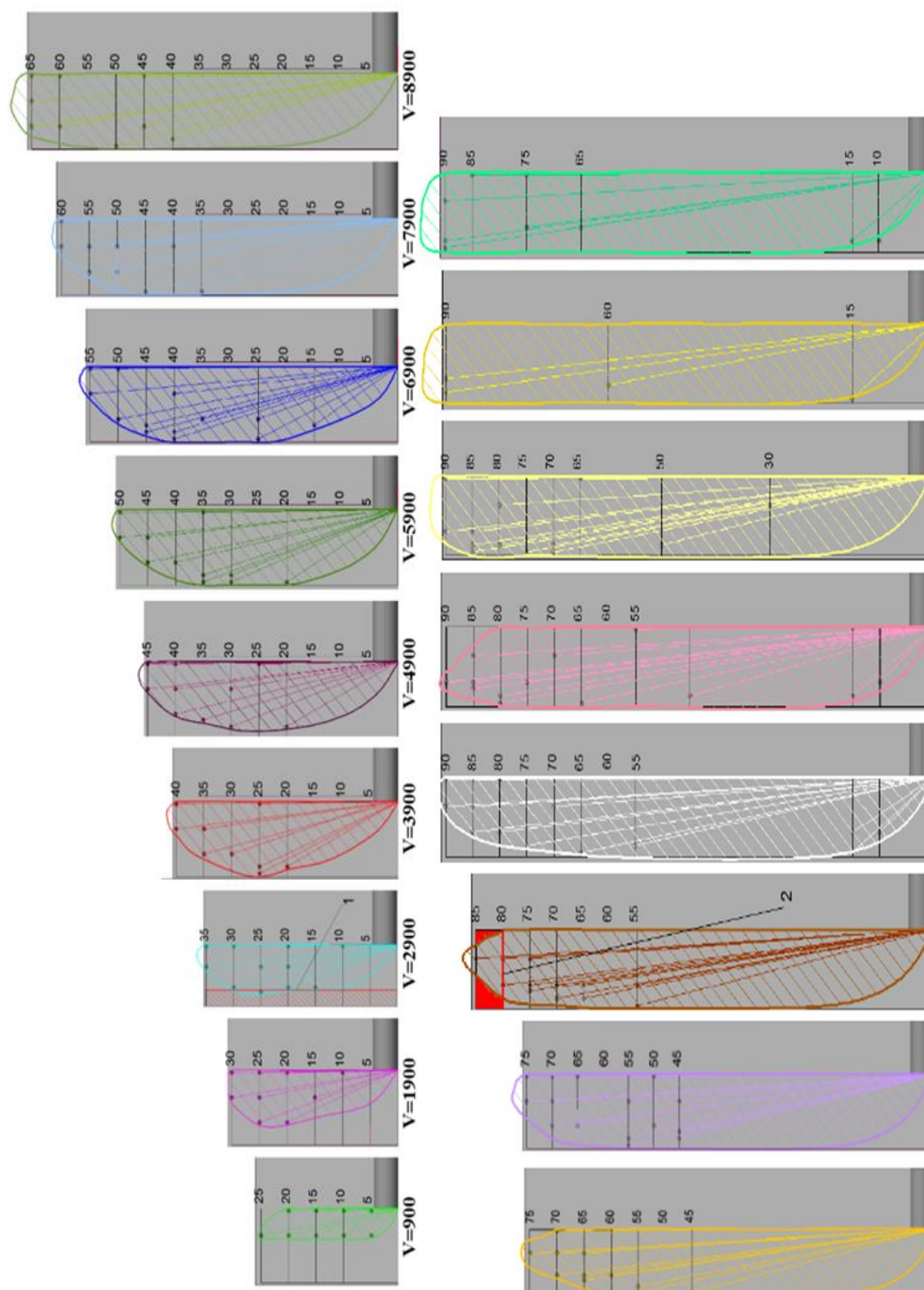


Рисунок 2 - Формирование фигуры выпуска на различных стадиях: 1 – начало торцевого разубоживания; 2 – начало разубоживания налегающих пород

На основании полученных результатов сформулировано первое научное положение - при торцевом выпуске до 10 % из объёма руды, приходящегося на выпускную выработку, происходит опережающее развитие фигуры выпуска по вертикали, достигающее 1/3 от её максимального значения, при этом толщина выпускаемого слоя соответствует соотношению $DT = 0,7 \cdot DФ.В.$ (DT – толщина выпускаемого слоя; DФ.В. – диаметр фигуры выпуска), после чего параметры фигуры выпуска развиваются равномерно и пропорционально во всех направлениях.

На рисунках 3, 4 представлены диаграммы выхода кусков из разных частей выпускаемого слоя из выпускных выработок.

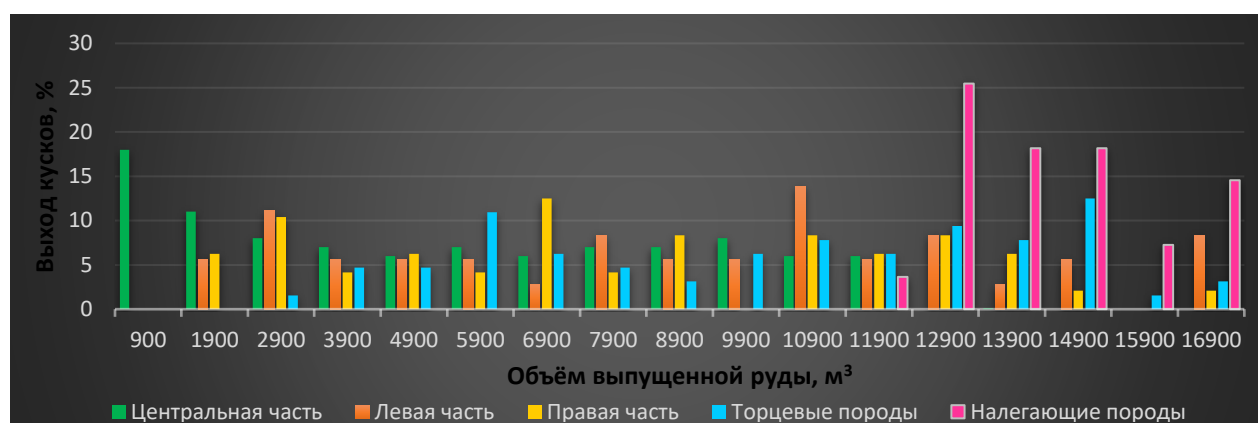


Рисунок 3 - Выход кусков из разных частей фигуры выпуска (выработка 1)

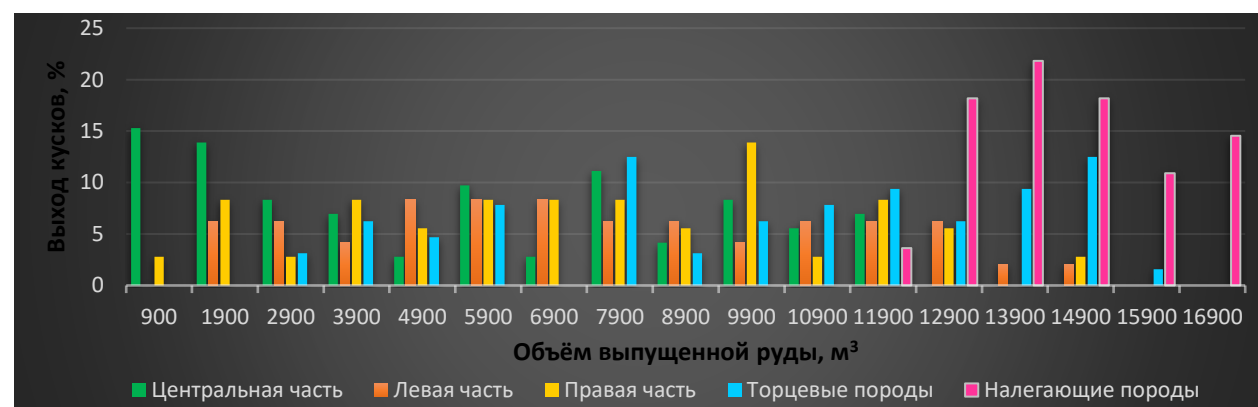


Рисунок 4 - Выход кусков из разных частей фигуры выпуска (выработка 2)

Анализ диаграмм показывает, что при выпуске 900 м³ руды приход жетонов осуществляется предпочтительно из центральной части, что подтверждает преимущественное развитие фигуры выпуска на первом этапе

в высоту. В дальнейшем при выпуске последующих объемов практически одновременно подключаются левая и правая часть блока. Кроме того, следует отметить, что центральная часть фигуры выпуска вышла практически вся до прихода верхнего разубоживания, после этого выпуск руды протекал только из левой и правой частей.

На рисунке 5 показана динамика истечения кусков из всего блока. Из графиков видно, что из первой выработки выход кусков правой части составил 27,5 %, левой 23 %, при выпуске из второй выработки выход из левой части составил 25%, правой 21,3 %.

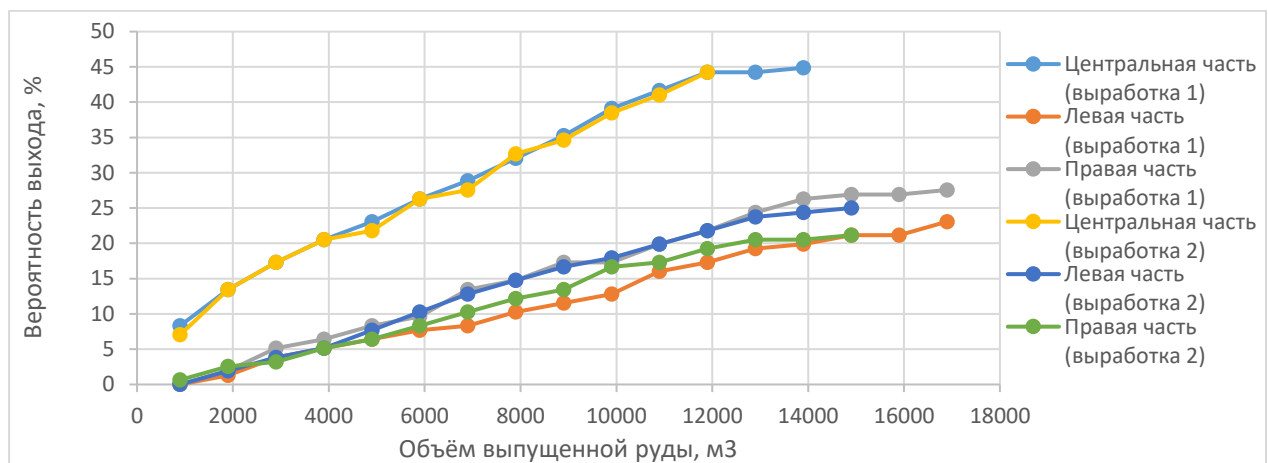


Рисунок 5 - Динамика истечения рудной массы из блока

Это обосновывается тем что, при выпуске $\approx 6000 \text{ м}^3$ левая часть первой выработки и правая часть второй выработки начинают оказывать влияние друг на друга, причем из первой выработки количество вышедших жетонов оказалось больше, чем из второй, что объясняется началом выпуска из первой выработки. В результате эксперимента установлено, что расстояние между смежными выработками расположенными в одной горизонтальной плоскости, должно обеспечивать взаимодействие фигур выпуска посредством их пересечения, с учетом коэффициента максимального разрыхления $D = \sqrt{\frac{H}{m}}$.

$K_{p.\text{макс}}$, где D и H - соответственно, диаметр и высота фигуры выпуска; m –

коэффициент эксцентриситета; $K_{p, \text{макс}}$ – максимальное значение коэффициента разрыхления.

Для определения формы фигур выпуска и разрыхления был проведен ряд экспериментов на опытно-экспериментальной модели. Контур фигуры выпуска определяли по выходу жетонов в определенном объеме, а фигуры разрыхления строили по видимой границе подвижных и неподвижных частиц сыпучего материала.

На рисунке 6 представлены стадии формирования фигур выпуска и разрыхления при различных объемах. На последней стадии контур фигуры выпуска окончательно сформирован, а границы фигуры разрыхления установить не удалось из-за небольших масштабов модели. Из рисунка 6 следует, что в стадии формирования фигуры выпуска и разрыхления являются подобными.

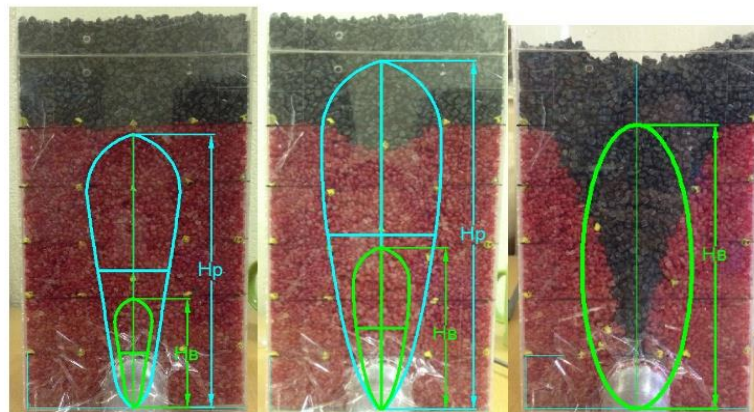


Рисунок 6 - Стадии формирования фигуры выпуска и разрыхления: зеленый цвет - *фигура выпуска*; голубой - *фигура разрыхления*; H_b, H_p – высота фигур выпуска и разрыхления.

Коэффициент подобия находится в пределах $2,3 \div 2,5$. При определении гранулометрического состава рудной массы использовался прямой метод измерения по фотоматериалам, предоставленными действующими горнорудными предприятиями. На рисунке 7 представлен средневзвешенный размер куска по предприятиям.

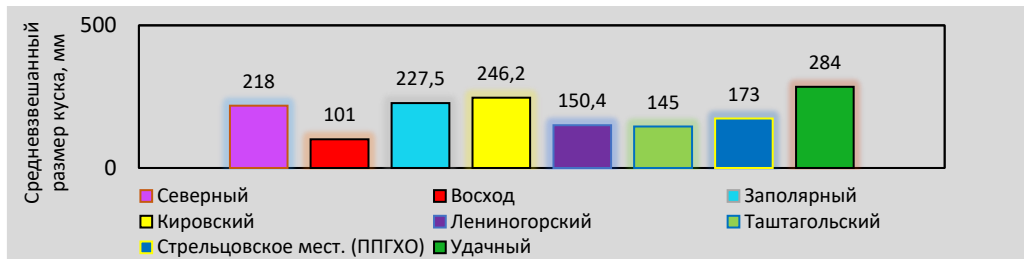


Рисунок 7 - Гистограмма средневзвешенного грансостава рудной массы на рудниках

Проведенный анализ фракционного состава на ряде рудников показывает, что средневзвешенный размер куска в натуральных условиях находится в диапазоне $0,15 \div 0,25$ м.

В связи с большими временными затратами на исследование физических моделей, дальнейшее изучение закономерностей движения потоков руды рассматривалось с помощью программного обеспечения ORECAD построенного на основах стохастического моделирования, доказанных рядом ученых: В.В. Куликовым, В.А. Горбуновым, Е.В. Кузьминым, С.М. Чурсиным, Т.А. Гагиевым., Р.Г. Пепелевым. Для определения сходимости результатов использовался корреляционный анализ, суть которого заключается в определении тесноты связей между двумя или более переменными. За основу сходимости брали параметры формируемой фигуры выпуска (высота, ширина, толщина), полученные на физической и компьютерной модели. В результате анализа определено, что расхождение результатов на физической и компьютерной моделях не превышает $8 \div 9$ %; такая сходимость классифицируется как тесная, что позволяет дальнейшие исследования проводить на компьютерной модели.

Для управления потоками и оценки выхода кусков из определенной выработки, а также для извлечения запасов с наибольшим содержанием полезного компонента, в начале или в последующие очереди выпуска при системах с обрушением руды и вмещающих пород с торцевым выпуском определяли зону влияния выпускного отверстия или «зону потока», которую находили графическим способом. Для этого на компьютерной модели строили

блок с различными параметрами. Ширину блока задавали, исходя из того, чтобы зона потока была полностью изолирована для более точного её определения. Выпуск останавливали при общем разубоживании 20 %. На рисунке 8 показаны зоны влияния выпускного отверстия при различных высотах и грансоставах.

При определении зоны влияния выработки для различных высот и грансоставов, установлено, что движение частиц к выпускающей выработке носит хаотичный характер, заданный перемещением частицы из начального положения «на контакте руда-порода» в конечное «в выпускную выработку».

Заштрихованные области на рисунке 8 (обозначенные черным цветом) характеризуют незначительное движение частиц, и их траектория не пересекает зону потока.

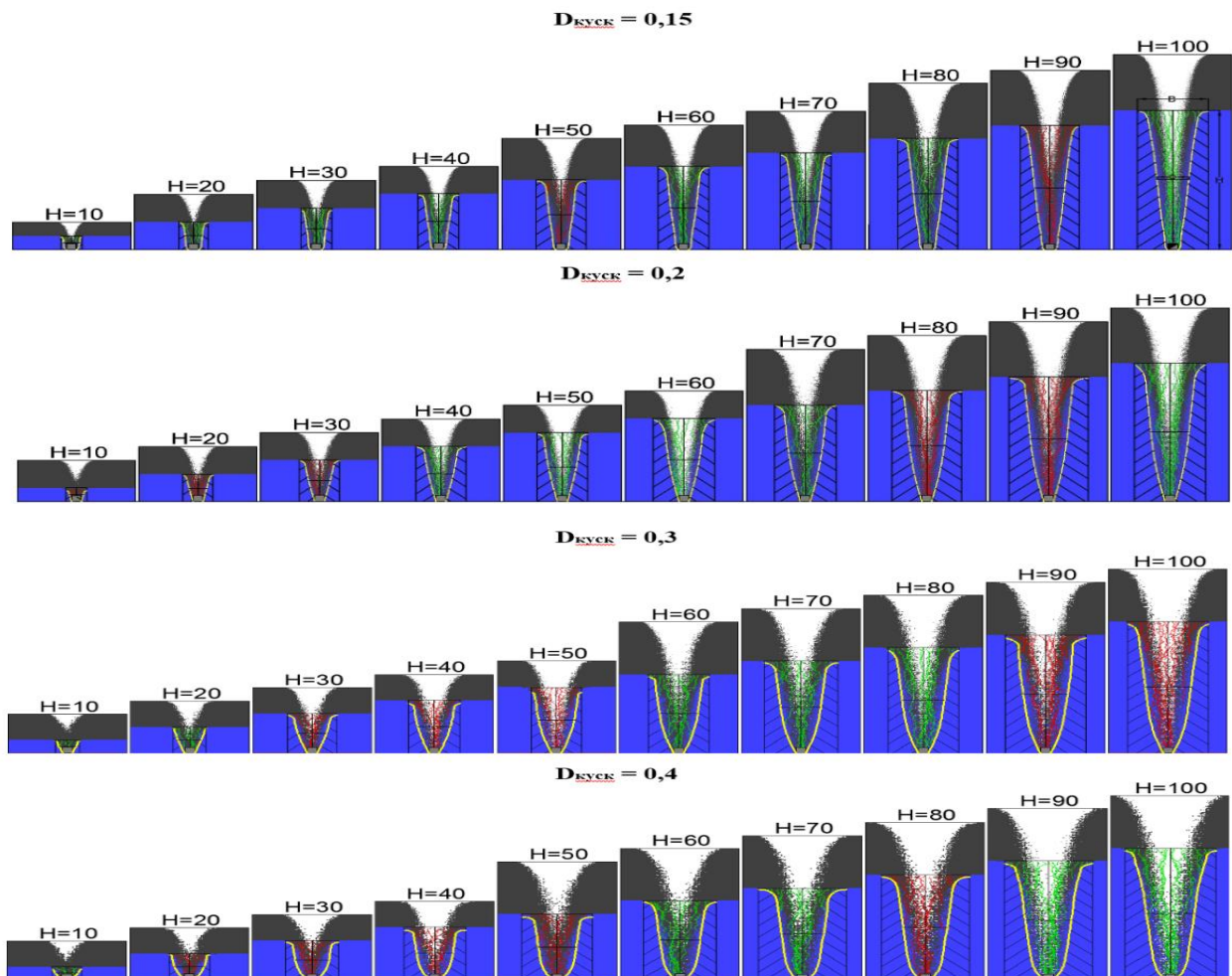


Рисунок 8 - Зона влияния выпускного отверстия при различном грансоставе (D_{kysk}):
желтый цвет – зона потока

При увеличении высоты отбиваемого слоя увеличивается и ширина зоны потока (рисунок 9). На основании полученных данных находили вероятность выхода кусков при различных высотах отбиваемого слоя и грансоставе в диапазоне $0,15 \div 0,4$ м. (рисунок 10). Из полученных зависимостей определено, что наилучший приход жетонов к выпускаемой выработке осуществляется тогда, когда зона потока развивается в её пределах.

Для определения влияния ширины выпускающей выработки на зону потока в компьютерной программе задавали определенный блок (константа), в котором размещали выработку различной ширины. На рисунке 11 представлен график изменения зоны влияния выпускающей выработки в зависимости от её ширины.

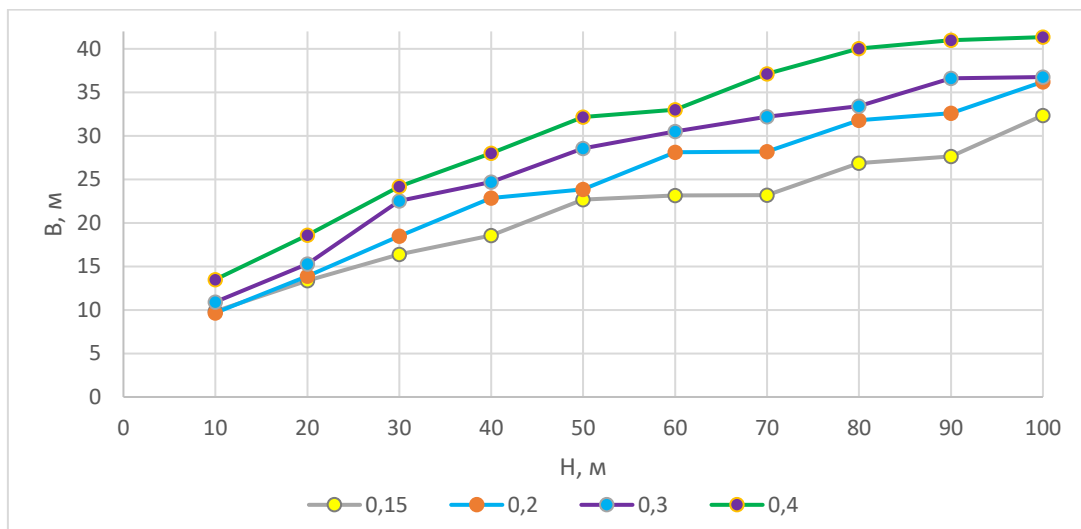


Рисунок 9 - Развитие зоны влияния выработок при нарастании высоты отбиваемого слоя

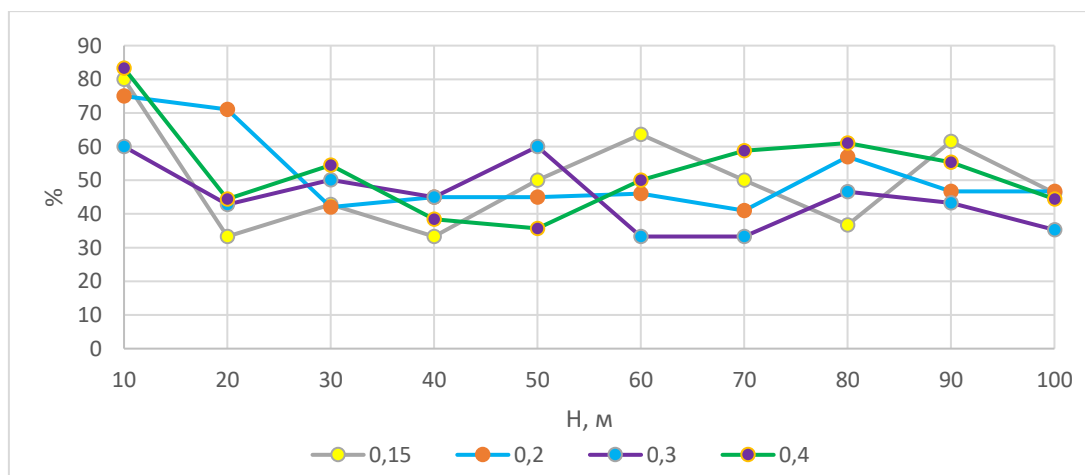


Рисунок 10 - Зависимость вероятности выхода жетонов от высоты отбиваемого слоя при различном гранулометрическом составе

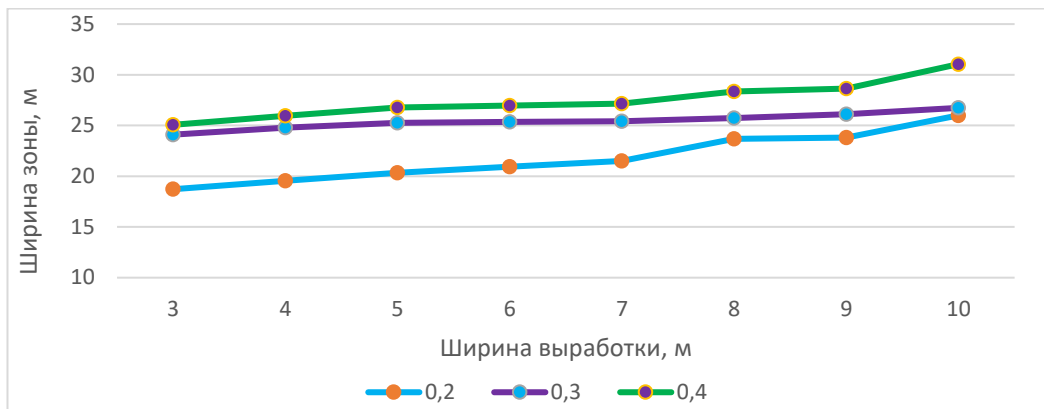


Рисунок 11 – Изменение зоны влияния выпускающей выработки в зависимости от её ширины

Из графиков видно, что чем шире выработка, тем шире зона потока, при этом, при ширине выработки более 4,5 м зона влияния увеличивается не существенно.

При определении границ зоны потока в наклонных месторождениях, мощность, толщина и длина рудного тела были постоянными. В процессе моделирования, изменению подвергался угол залегания месторождения, который варьировался в диапазоне 10° – 60° и гранулометрический состав - в диапазоне 0,2–0,4 м. Размер выработки был принят равным 4х4,5 м. На рисунке 12 представлены наклонные рудные тела при различном гранулометрическом составе ($D = 0,2; 0,3; 0,4$).

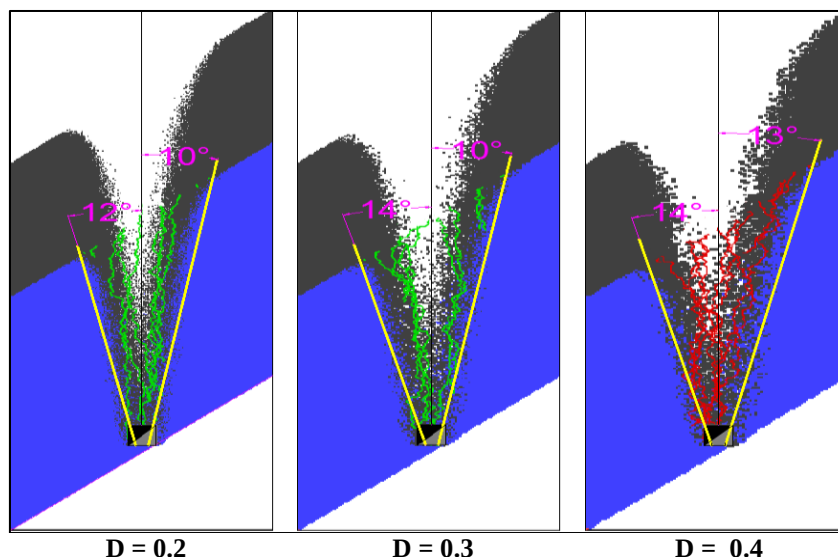


Рисунок 12 - Определение границ зоны потока в наклонных месторождениях.

В таблице 2 представлены результаты, полученные во время эксперимента, где **Вис.** и **Леж.** – это висячий и лежащий бока рудного тела .

Таблица 2 - Полученные результаты в ходе моделирования выпуска рудной массы

Угол залегания, град. °	Гранулометрический состав рудной массы, D					
	0.2 м.		0.3 м.		0.4 м.	
	Вис., град. °	Леж., град. °	Вис., град. °	Леж., град. °	Вис., град. °	Леж., град. °
10	12	12	16	16	17	17
20	13	13	15	15	17	17
30	12	13	12	14	15	17
40	10	11	11	13	14	16
50	15	7	16	8	16	9
60	12	5	13	6	18	8

На основании полученных данных был построен график зависимости угла залегания залежи от угла распространения движения частиц (зона потока) при различном гранулометрическом составе рудной массы (рисунок 13). Анализ показывает, что наибольший угол распространения движения частиц образуется при гранулометрическом составе $\geq 0,4$ м. При этом, зона потока при увеличении угла залегания рудного тела до 20° развивается равномерно в обе стороны.

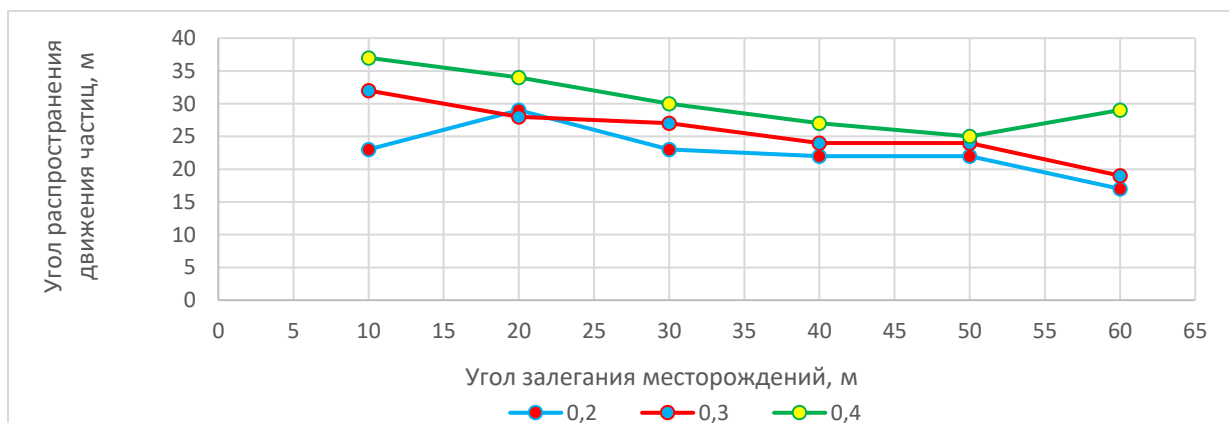


Рисунок 13 - Зависимость угла залегания от угла распространения движения частиц при $D_{\text{куск}} = 0,2; 0,3; 0,4$.

Это позволило сформулировать второе научное положение – при развитии очистной выемки по простиранию с нарезкой штреками,

расположенными в лежащем боку на контакте руда-порода зону влияния выпускной выработки определяет угол падения залежи: так при угле падения до 200 фигура выпуска развивается равномерно в обе стороны от ее оси, в диапазоне 20÷450 она склоняется в сторону лежащего бока, а при углах свыше 450 - в сторону висячего бока.

Для определения максимального значения границы зоны потока, при котором происходит перемещение частиц к выпускному отверстию, пользовались объемной компьютерной моделью. Высоту блока изменяли в диапазоне 10÷100 м., ширину задавали исходя из расчета, чтобы развитие рудопотока протекало без пространственных ограничений. По жетонам, которые совершили движение к выпускному отверстию, устанавливали верхнюю границу зоны потока графическим методом.

На рисунке 14 представлены результаты, полученные во время эксперимента. Из полученных графических зависимостей видно, что при небольших высотах блока 10-20 м., при различном грансоставе, отношение высоты отбиваемого слоя к максимальному радиусу границы зоны потока приблизительно равняется 0,75÷1. Дальнейшее увеличение высоты блока от 30 до 100 м., приводит к тому, что отношение высоты отбиваемого слоя к радиусу границ зона потока изменяется в диапазоне 1,1÷3,3.

Результаты всех исследований позволили построить общую модель, в которой присутствуют фигуры выпуска и разрыхления, зона потока, а также траектории движения кусков руды (рисунок 15).

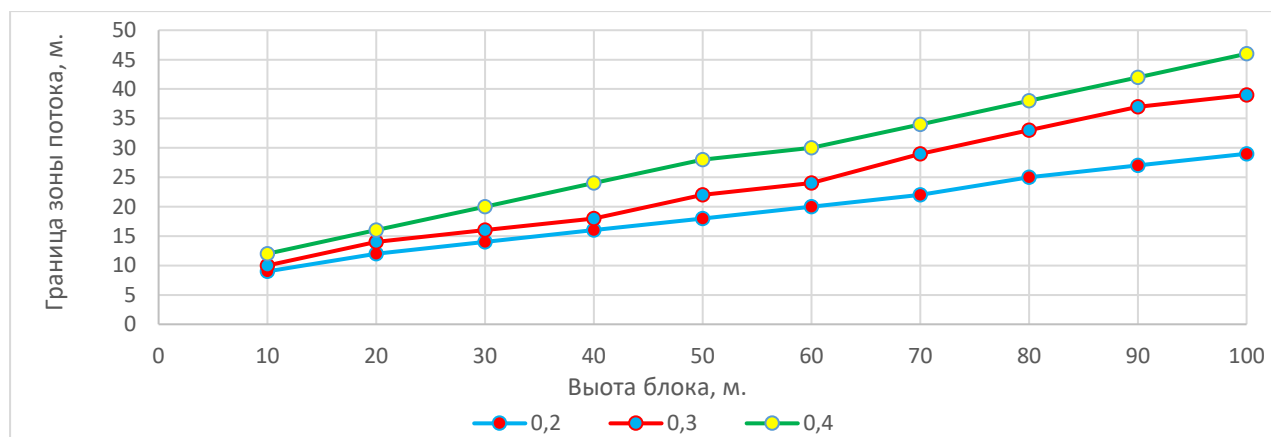


Рисунок 14 - Графики зависимости высоты блока от максимальной границы зоны потока развивающиеся в толщину отбиваемого слоя при $D_{\text{куск}} = 0,2; 0,3; 0,4$

Из рисунка видно, что движение частиц происходит не только в фигуре выпуска, но и в фигуре разрыхления, при том что их соотношение, как сказано ранее, находится в пределах $2,3 \div 2,5$. Это позволило сформулировать третье научное положение – формирование рудопотока при торцевом выпуске руды включает три стадии: прямолинейное развитие, не превышающее по ширине параметры выпускной выработки; последующее расширение с захватом контактирующей с центральной зоной рудной массы; затухание движения в зоне между границами фигур выпуска и разрыхления, где перемещение осуществляется в направлении выработки под углами $75 \div 80^\circ$ с постепенным затуханием к ее внешнему контуру.

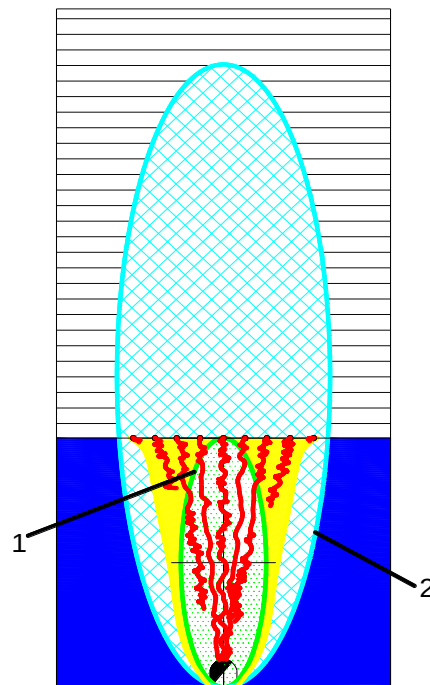


Рисунок 15 - Общая схема потока при торцевом выпуске руды:
1 - фигура выпуска; 2 - фигура разрыхления; *желтый цвет*-зона потока; *красный*-траектории кусков.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке месторождений с неравномерным распределением полезного компонента, включающем зоны с повышенным содержанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены и научно обоснованы оптимальные параметры системы разработки с принудительным обрушением руды и вмещающих пород на основе учета траекторий движения частиц, слагающих рудопоток.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Установлено что, при выпуске до 10 % руды из объёма, приходящегося на выработку, происходит стремительное развитие фигуры выпуска на высоту, достигающую $1/3$ от её максимального значения, при этом толщина выпускаемого слоя соответствует соотношению $D_T = 0,7 \cdot D_{ф.в.}$, после чего параметры фигуры выпуска развиваются равномерно и пропорционально во всех направлениях.
2. Определен коэффициент подобия фигур выпуска и разрыхления графическим способом по жетонам находящихся в видимой и в невидимой зоне, который изменяется в диапазоне $2,3 \div 2,5$.
3. Проведенный анализ гранулометрического состава на различных горных предприятиях, осуществляющих добычу руды системами с массовым обрушением, показывает, что средневзвешенный размер куска в натуре находится в диапазоне $0,15 \div 0,25$ м.
4. Установлено, что формирование рудопотока при торцевом выпуске руды включает стадии прямолинейного развития по ширине, не превышающей параметры выпускной выработки, последующее расширение с захватом контактирующей с центральной зоной рудной массы при этом в зоне фигуры разрыхления, перемещение осуществляется в направлении выработки под углами $75 \div 80^\circ$ с постепенным затуханием к ее внешнему контуру.
5. Определено что, расстояние между смежными выработками расположенными в одной горизонтальной плоскости, должно обеспечивать

взаимодействие фигур выпуска посредством их пересечения, которое описывает уравнение $D = \sqrt{\frac{H}{m}} \cdot K_{p.макс}$.

6. Установлено, что при формировании фигуры выпуска её большая ось отклоняется от призабойной стенки в сторону разрыхлённой среды на 7 – 12 градусов.

7. Установлено, что «зона потока» является пространственной фигурой, по форме напоминающей параболоид вращения с усечённой вершиной в виде выпускного отверстия, образующейся при выпуске в сыпучем теле.

8. Определено, что зона влияния выпускной выработки, располагающейся на контакте руда-поорода при штрековой подготовке, зависит от угла наклона рудного тела, так при угле падения до 20^0 фигура выпуска развивается равномерно в обе стороны, в диапазоне $20 \div 45^0$ она получает преимущественное развитие в сторону лежащего бока, а при углах свыше 45^0 в сторону висячего бока при увеличении угла залегания рудного тела при штрековой подготовке изменяется и зона влияния выпускного отверстия.

Основные положения диссертации отражены в следующих опубликованных работах автора:

1. Романов В.А., Павлов А.А., Сухов Д.И. Обоснование толщины отбиваемого слоя при применении систем с обрушением руды и вмещающих пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 7. С. 61-63.

2. Романов В.А., Савич И.Н., Павлов А.А., Сухов Д.И. Подэтажный торцевой выпуск при подземной разработке наклонных рудных тел с неравномерным оруденением // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 8. С. 57-60.

3. Романов В.А., Сухов Д.И., Мустафин В. И., Зенько Д. К. Влияние крупнофракционной зоны дробления на параметры фигуры выпуска // Научный вестник МГГУ. - 2013. - № 7 (40). - С. 29-32.

4. Романов В.А., Савич И.Н., Сухов Д.И. Особенности подэтажного торцевого выпуска из выработок расположенных на разных уровнях // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 213. С. 3-6.

5. Романов В.А., Павлов А.А., Мустафин В.И., Сухов Д.И. Влияние гранулометрического состава рудной массы на параметры торцевого выпуска при изменяющейся высоте подэтажа // Геотехнологии при разработке рудных месторождений, ГИАБ. Отдельные статьи (специальный выпуск). -2013. -№04. -28с.- М.: изд. «Горная книга».

6. Романов В.А., Зенько Д.К., Мустафин В.И., Сухов Д.И., Смирнов И.А. Закономерности движения руды при выпуске под обрушенными породами // 10 международная научная школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Изд. ИПКОН РАН. -2013. № 1.- С. 237-240.

7. Романов В.А. Обоснование параметров торцевого выпуска при применении системы подэтажного обрушения руды // Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» сборник научных трудов. Изд. Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" -2012. Ч. 2. - С. 128-129.

8. Романов В.А., Савич И.Н., Мустафин В. И., Сухов Д.И. Мониторинг состояния и направление совершенствования технологических процессов для улучшения среды обитания человека в регионах КМА // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. Выпуск 2: ГИАБ. Отдельные статьи (специальный выпуск). -2014.-№12.-С.62-69.- М.: изд. «Горная книга»

9. Романов В.А., Савич И.Н., Мустафин В. И., Сухов Д.И. Торцевой выпуск из выработок, расположенных на разных уровнях // VIII Международная конференция «Комбинированная геотехнология: устойчивое и экологически сбалансированное освоение недр». - Сборник тезисов-2015. С. 90-91. - Магнитогорск

10. Романов В.А., Савич И.Н., Мустафин В. И., Сухов Д.И. Рациональный режим выпуска руды // VIII Международная конференция «Комбинированная геотехнология: устойчивое и экологически сбалансированное освоение недр». - Сборник тезисов-2015. С. 91-93. - Магнитогорск

11. Романов В.А., Савич И.Н., Мустафин В. И., Сухов Д.И. Параметры этажного торцевого выпуска руды при двухъярусном расположении буродоставочных выработок // Международная конференция «Miningworld». - Сборник тезисов «Технология подземной разработки месторождений полезных ископаемых» -2016.- С. 33-36.

12. Романов В.А., Савич И.Н., Мустафин В. И., Сухов Д.И., Нестеров Ю.И. Особенности торцевого выпуска и его формирование при разработке месторождений с принудительным обрушением руд и вмещающих пород // IX Международная конференция «Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность». - Сборник трудов- 2017. С.71-72. - Магнитогорск.

13. Романов В.А., Мустафин В.И., Сухов Д.И., Сальникова А.О. Оценка эффективности буровзрывных работ при очистной выемке руды // Маркшейдерия и недропользование. 2018. № 6 (98). С. 18-20.

14. Романов В.А., Сухов Д.И., Савич А.О. Подходы к проектированию горнотехнических систем при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 7 (специальный выпуск 6) - 2022. С. 21-29.

15. Романов В.А., Сухов Д.И., Савич А.О. Потери и разубоживание руды при подэтажном торцевом выпуске хромовых руд донского ГОКа// Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 7 (специальный выпуск 6) - 2022. С. 30-39.

16. Романов В.А., Мустафин В.И., Сухов Д.И., Савич А.О. Применение компьютерного моделирования для оценки количественных и качественных показателей извлечения рудной массы при подземной разработке месторождений системами с обрушением // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 12 (специальный выпуск 20) - 2021. С. 20-29.,

17. Романов В.А., Савич О.И., Савич А.О. Разработка россыпных месторождений Якутии методом скважинной гидродобычи // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 12 (специальный выпуск 20) - 2021. С. 31-37.

18. Romanov V.A., Savich I.N., Gagiev T.A., Mustafin V.I., Sukhov D.I. Caving systems parameters in the development of ore deposits // Miner's week – 2015 reports of the XXIII international scientific symposium. 2015. С. 410-412.

19. Romanov V.A., Mustafin V.I, Biessikirski A., Terpak D., Sukhov D.I. Application of photogrammetry analysis and hazen's index evaluation of muck pile fragmentation obtained in Russian ore mines // Inzynieria Mineralna 2(40) – LIPIEC-GRUNZIEN.- JULY-DESEMBER 2017-Journal of the Polish Mineral Engineering Society.- P. 293-301.-Poland.

20. Romanov V.A., Savich I.N., Mustafin V.I., Sukhov D.I. Development of Design and Technological Parameters of Ore Extraction for Underground Mining // E3S Web of Conferences, 41. 2018.

21. Romanov V.A., Biessikirski A., Terpak D., Mustafin V.I., Sukhov D.I. Complex photogrammetry analysis of the muck pile fragmentation obtained in Russian ore mines // Acta Montanistica Slovaca, Volume 23 (2018), Number 4, pp. 402-411.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1], [2], [3], [9], [12], [16] - определена динамика развития фигуры выпуска в процессе торцевого выпуска руды под обрушенными породами для максимального извлечения зон с богатым содержанием;
[4], [6], [7], [8], [13], [14] - установлены закономерности формирования рудопотока при торцевой погрузке;
[3], [4], [5], [14], [15] - установлена зона влияния выработки при торцевом выпуске на его параметры при различном гранулометрическом составе рудной массы.