

На правах рукописи

СОЗОНОВ Кирилл Владиславович



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ВЫРАБОТОК ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НЕУСТОЙЧИВЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

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

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский Горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Трушко Владимир Леонидович

Официальные оппоненты:

Сергеев Сергей Валентинович,
доктор технических наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу (ОАО «ВИОГЕМ»), Заведующий лабораторией горного давления и сдвижения горных пород

Лебедев Михаил Олегович,
кандидат технических наук, ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе

Ведущая организация – ООО «Институт Гипроникель»

Защита диссертации состоится 27 сентября 2019 г. в 11 час. 00 мин на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 26 июля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ДЕМЕНКОВ
Петр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие черной металлургии при высоком уровне конкуренции на рынке возможно за счет выпуска высокосортной металлургической продукции, которая определяется качеством добываемого железорудного сырья.

На сегодняшний день основные объемы добычи железорудного сырья в Российской Федерации приходится на разработку открытым способом месторождений со средним содержанием полезного компонента в руде, не превышающим 40%. Месторождения высококачественных богатых железных руд (более 55% Fe), составляющие 12,4% от российских запасов, в основном имеют глубокое залегание и разрабатываются подземным способом. Применение классической слоевой системы с закладкой выработанного пространства на первоначальном этапе их отработки обусловлено сложностью и недостаточной изученностью геомеханических процессов при освоении месторождений богатых железных руд.

Переход на более производительные технологии добычи богатых железных руд с увеличенными геометрическими параметрами очистных выработок сдерживается недостаточной изученностью геомеханических процессов и потенциальным риском потери устойчивости рудного массива при ведении горных работ.

Большой вклад в исследование геомеханических процессов при разработке рудных месторождений внесли отечественные и зарубежные ученые: К.А. Ардашев, Ю.Н. Антонов, И.В. Баклашов, В.П. Зубов, В.Р. Именитов, Д.Р. Каплунов, О.В. Ковалев, А.А. Козырев, М.О. Лебедев, Ю.Н. Огородников, А.Г. Протосеня, Д.А. Потемкин, К.В. Руппенейт, С.В. Сергеев, О.В. Тимофеев, В.Л. Трушко, П.М. Цимбаревич, В.Н. Brady, E. Brown, W. Kamp, E. Hoek, A. Гейм, К. Терцаги, О. Якоби и другие. Однако системы разработки с очистными выработками полигональной формы сечения рассмотрены недостаточно в отечественной и зарубежной литературе.

Накопленный опыт геомеханического обоснования устойчивости очистных выработок не охватывает вопросы формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) рудного массива вокруг выработок полигональной формы. Не выявлены закономерности изменения НДС во времени и не установлены рациональные геометрические параметры очистных выработок, обеспечивающие их устойчивость и безопасность ведения горных работ. Таким образом, разработка геомеханического обоснования рациональных гео-

метрических параметров очистных выработок полигональной формы является актуальной научной задачей, решение которой обеспечит повышение эффективности и безопасности ведения горных работ.

Цель работы. Обеспечение устойчивости очистных и подготовительных выработок с увеличенными геометрическими параметрами для повышения эффективности разработки месторождений неустойчивых богатых железных руд.

Идея работы. Поставленная цель достигается геомеханическим обоснованием рациональных геометрических параметров очистных выработок полигональной формы сечения с шахматным порядком отработки запасов, обеспечивающих эффективное и безопасное ведение горных работ.

Основные задачи исследований:

1. Обобщение опыта разработки железорудных месторождений в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях.

2. Исследование проявлений горного давления при проведении очистных и подготовительных выработок в натуральных условиях.

3. Оценка результатов натуральных и аналитических исследований формирования и изменения напряженного-деформированного состояния рудного, породного и закладочного массивов при разработке месторождений богатых железных руд подземным способом.

4. Выбор и обоснование численной геомеханической модели и последующее моделирование НДС массива, вмещающего очистные выработки, и учитывающее изменение их геометрических параметров.

5. Установление зависимостей изменения НДС вмещающего рудного и закладочного массивов при отработке запасов неустойчивых железных руд выработками полигональной формы, расположенными в шахматном порядке.

6. Расчетное обоснование геометрических параметров очистных выработок полигональной формы и разработка рекомендаций по креплению рудных обнажений.

Методы исследования. Работа выполнена с применением комплексных методик, включающих поиск и исследование ранее опубликованных работ по теме диссертации, исследования геомеханических процессов, протекающих в очистных и подготовительных выработках в условиях Яковлевского месторождения, построе-

ние геомеханических моделей и расчет НДС рудного и породного массивов, проведение лабораторных исследований и экспериментальную проверку полученных результатов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности изменения НДС рудного и залежачного массивов при выемке запасов богатых железных руд выработками полигональной формы с закладкой очистного пространства.

2. Установлены зависимости изменения формы и размеров зон предельного состояния массива вокруг очистных выработок от прочностных и деформационных свойств руд и закладки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Напряженно-деформированное состояние рудного массива вокруг подготовительных и очистных выработок описывается моделью упругопластического тела, учитывающей изменение полей вертикальных и горизонтальных напряжений при ведении горных работ.

2. Потеря устойчивости происходит по поверхностям сдвига в боках очистных и подготовительных выработок, параметры которых зависят от геометрических размеров выработок и деформационно-прочностных характеристик рудного массива.

3. Геомеханически безопасная разработка неустойчивых железных руд обеспечивается полигональной формой сечения очистных выработок и установкой упрочняющей анкерной крепи в зонах предельного равновесия приконтурного массива в боках выработок.

Практическая значимость работы:

1. Построена численная геомеханическая модель массива, дающая возможность изучать изменения НДС на различных этапах отработки богатых железных руд выработками полигональной формы.

2. Обоснованы рациональные геометрические параметры и сечения очистных выработок полигональной формы при нисходящем порядке отработки.

3. Разработан способ разработки мощных крутопадающих месторождений неустойчивых руд (патент 2648371 опублик. 26.03.2018, Бюл. №9).

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением сертифици-

цированного программного комплекса Abaqus для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива с использованием метода конечных элементов, представительными объемами выполненных натурных измерений смещений на глубинных реперных станциях и их хорошей сходимостью с величинами смещений рудного предохранительного целика и искусственной потолочины, полученных по результатам геомеханического моделирования очистных работ, и учитывающего различный порядок проведения очистных выработок и нелинейность физико-механических свойств массива.

Апробация работы. Результаты исследований и основные научные положения докладывались на международном европейском симпозиуме Eurock 2018 (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2018 г.), международной научно-практической конференции «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), 12 Freiberg – St. Petersburg Colloquium of young scientists (Фрайбергская Горная Академия, г. Фрайберг, Германия, 2017 г.), XXI международной научно-практической конференции «Молодой ученый: вызовы и перспективы» (Издательство «Интернаука», г. Москва, 2016 г.), LVIII международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (АНС «СибАК», г. Новосибирск, 2016 г.).

Реализация результатов работы. Полученные результаты оценки формирования и изменения НДС массива богатых железных руд позволили разработать рекомендации по определению геометрических размеров обнажений очистных выработок полигональной формы и определению их упрочняющего крепления при разработке проекта второй очереди отработки запасов богатых железных руд Яковлевского месторождения, ПАО «Северсталь», а также в учебных дисциплинах «Механика подземных сооружений», «Системы разработки рудных месторождений» и «Моделирование физических процессов в горном деле» и др. Санкт-петербургского горного университета.

Личный вклад соискателя заключается в постановке целей и задач исследований; участии в проведении натуральных исследований НДС массива горных пород; в изучении и анализе научной литературы; в разработке математических моделей массива неустойчивых руд и численной их реализации; выполнении численных экспериментов и анализе полученных результатов; в разработке практических рекомендаций по обеспечению устойчивости подготовительных и очистных выработок.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 8 печатных работах, в том числе в изданиях, входящих в Перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 3 работы. Получен патент на изобретение № 2648371 «Способ разработки мощных крутопадающих месторождений неустойчивых руд» от 27.12.2016 г (опубликован 26.03.2018).

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение и заключение, список использованной литературы из 100 наименований, 87 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполняется анализ и описание объекта исследования, приводится характеристика и анализ геомеханических процессов при подземной разработке железорудных месторождений, обосновывается актуальность дальнейших исследований. Формулируются основные задачи и цели исследования.

Во второй главе изложены методики и результаты натуральных исследований напряжено-деформированного состояния рудного и породного массивов при ведении горных работ (установление зон отслоения, измерение линейных переборов, оценка устойчивости горных выработок, определение сдвижений и деформаций покрывающей рудной толщи).

В третьей главе обоснована геомеханическая модель и выполнено численное моделирование влияния геометрических параметров очистных выработок полигональной формы сечения на изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива с учетом прочностных и деформационных свойств различных типов руд.

В четвертой главе изучено влияние порядка обработки очистных выработок полигональной формы сечения на формирование зон предельного равновесия. Разработаны рекомендации по креплению подготовительных и очистных выработок.

1. Напряженно-деформированное состояние рудного массива вокруг подготовительных и очистных выработок описывается моделью упругопластического тела, учитывающей изменение полей вертикальных и горизонтальных напряжений при ведении горных работ.

Поставленная задача решена с применением численного моделирования методом конечных элементов. Исследовано формирование и изменение напряженно-деформированного состояния массива при нисходящей обработке рудного тела выработками полигональной формы с полной закладкой выработанного пространства с учетом изменения полей вертикальных и горизонтальных напряжений.

Модель представлена весоной конечной областью размером 750×250 м (рисунок 1).

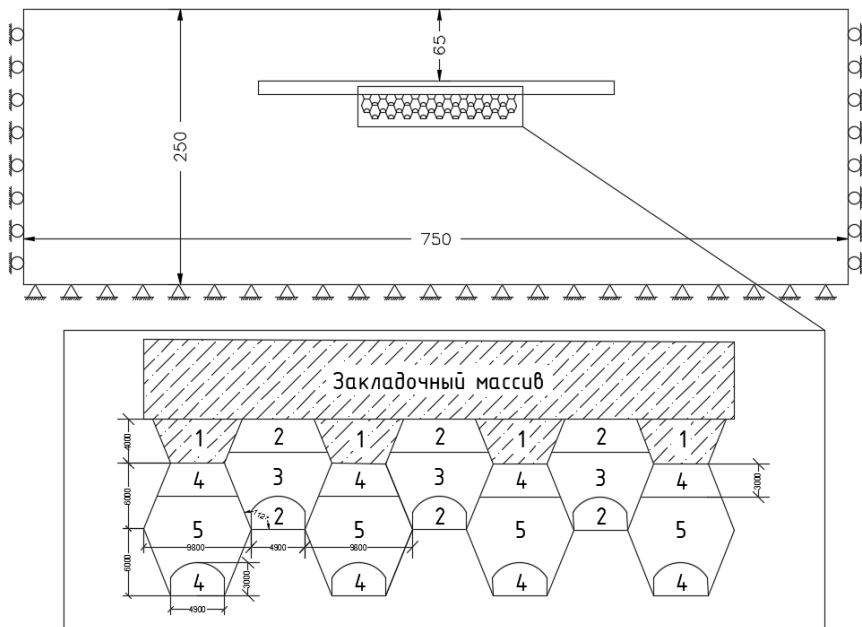


Рисунок 1 – Принципиальная схема конечно-элементной модели:
1-5 – этапы ведения горных работ

Для реконструкции естественного напряженно-деформированного состояния грани модели закреплялись от смещений и к ним прикладывались вертикальные и горизонтальные равномерно-распределенные нагрузки величиной 7 МПа и 4 МПа на отметке «известняки карбона – рудное тело».

Кровля искусственной защитной потолочины мощностью 12,5 м расположена от верхней грани модели на глубине 65 м, что соответствует мощности рудной толщи над верхним слоем (предохранительный рудный целик), переход на систему разработки полигональными выработками с шахматным расположением предполагается осуществить с третьего очистного слоя.

Рудный массив, вмещающий очистные и подготовительные выработки, является нелинейно деформируемым и представлен тремя типами руд с различными физико-механическими свойствами (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-механические свойства рудного и закладочного массивов

Название материала	Модуль деформации E, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Коэффициент Пуассона	Удельный вес ρ , МН/м ³	Сцепление C, МПа	Угол внутреннего трения φ , град
	Руда железнослюдково-мартитовая (ЖСМ)					
Рыхлая	1300	1,2	0,26	0,034	0,4	28
Средней плотности	1920	5,1	0,26	0,035	1,4	36
Плотная	2230	16,7	0,24	0,036	4,3	38
	Руда гидрогематит-мартитовая (ГГМ)					
Средней плотности	1920	6,9	0,25	0,033	1,8	35
Плотная	2420	19,4	0,24	0,035	5,8	38
	Закладочный материал					
Закладка	6000	8,3	0,26	0,019	2,84	28

Дискретизация расчетной области модели была реализована таким образом, что минимальный геометрический размер конечно-

го элемента составил 0,25 метра на контуре выработок, а максимальный по мере удаления – 30 метров (границы модели). Предельное равновесие массива оценивается критерием прочности Кулона-Мора.

Получены закономерности изменения величины вертикальных и горизонтальных напряжений приконтурного массива в боках подготовительной выработки, пройденной в рыхлых рудах, от понижения уровня ведения горных работ (рисунок 2). В подготовительных выработках наибольшие значения коэффициента концентрации напряжений локализованы в борту выработки на удалении 1-2 м от контура.



Рисунок 2 – Зависимость изменения напряжений и коэффициента концентрации напряжений приконтурного массива от понижения горных работ

Максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений составило 2,74 вокруг подготовительной выработки второго слоя. Наибольшая концентрация горизонтальных напряжений 1,4 отмечена вокруг выработки 1 слоя.

Понижение уровня горных работ и рост мощности искусственной защитной потолочины приводят к увеличению размеров зоны разгрузки, в которой располагаются подготовительные выработки. Результатом является уменьшение вертикальных и горизонтальных напряжений и размеров зон предельного равновесия вокруг подготовительных выработок (рисунки 3-4).

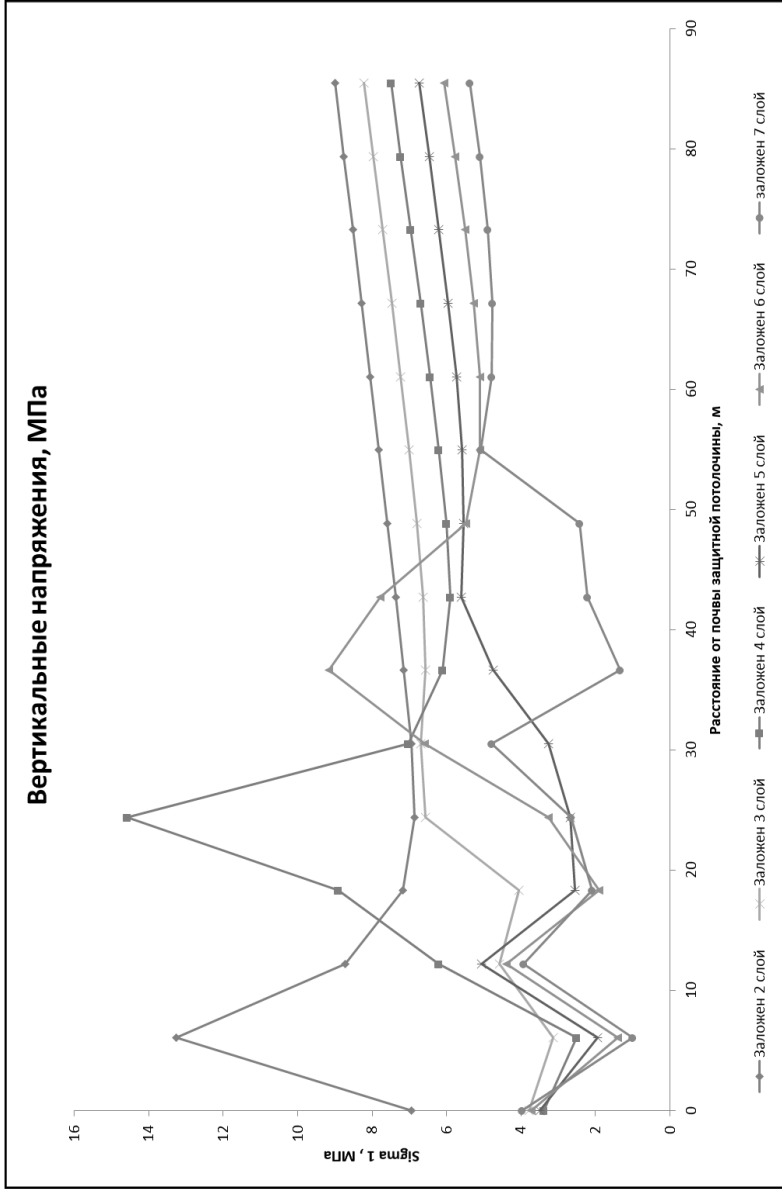


Рисунок 3 – Зависимость изменения вертикальных напряжений от глубины (по стадиям ведения горных работ)

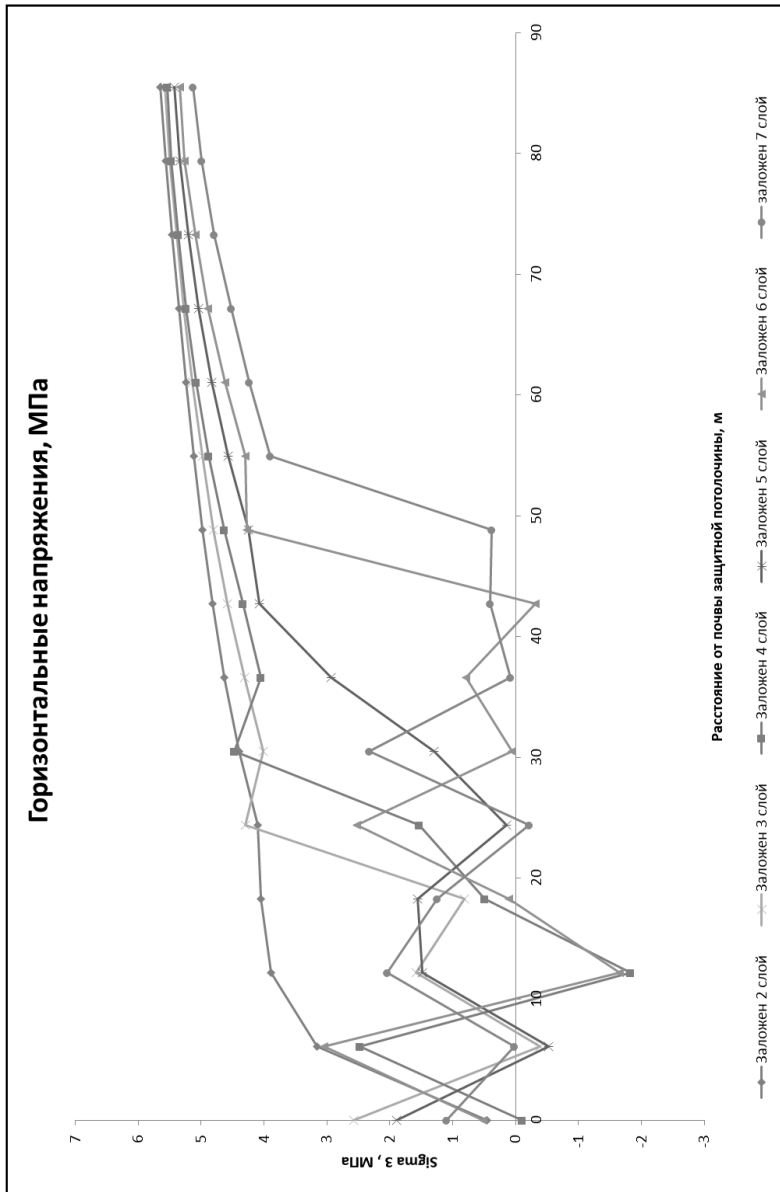


Рисунок 4 – Зависимость изменения горизонтальных напряжений от глубины (по стадиям ведения горных работ)

2. Потеря устойчивости происходит по поверхностям сдвига в боках очистных и подготовительных выработок, параметры которых зависят от геометрических размеров выработок и деформационно-прочностных характеристик рудного массива.

Напряженно-деформированное состояние массива зависит от множества факторов. Наиболее значимыми факторами, ввиду своей сильной изменчивости в условиях Яковлевского месторождения, являются физико-механические свойства рудного массива, вмещающего очистные выработки.

На основании исследований физико-механических свойств вмещающего рудного массива Яковлевского месторождения наибольшее распространение получили рыхлые руды, доля которых составила порядка 60% от всех запасов, при этом рыхлые руды обладают малым сопротивлением одноосному сжатию (~1,0 МПа). Оставшиеся объемы запасов приходятся на руды средней плотности и плотные руды со средними пределами прочности на одноосное сжатие 6,3 МПа и 18,5 МПа соответственно.

Тенденция увеличения производительности очистной добычи ведет к увеличению размеров обнажений выемочных единиц. Геометрические параметры систем разработки оказывают значительное влияние на развитие геомеханических процессов.

Для изучения напряженно-деформированного состояния массива произведено численное моделирование нисходящей отработки рудного тела полигональными выработками различной высоты: 12 м и 16 м (рисунок 5).

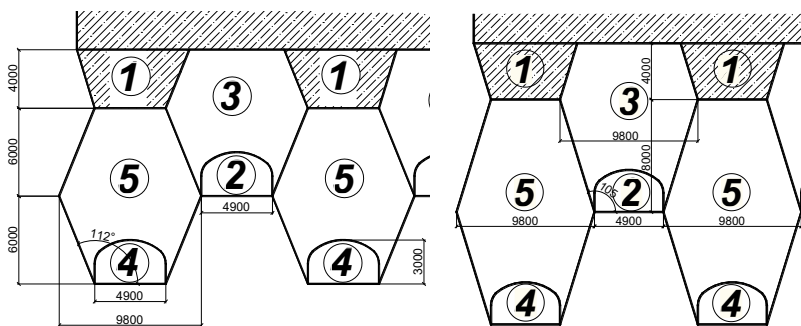


Рисунок 5 – Схема с указанием геометрических размеров полигональных выработок при высоте 12 м (слева) и 16 м (справа):
1-5 - этапы ведения горных работ

На этапе проведения подготовительных выработок сводчатой формы сечения в рыхлых железослюдково-мартитовых рудах наблюдается интенсивный рост и последующее смыкание зон предельного равновесия, из чего можно сделать вывод о потере несущей способности горной выработки в виде вывала из кровли на высоту обрабатываемой выработки.

В железослюдково-мартитовых рудах средней плотности при высоте очистных выработок 12 м и 16 м в кровле подготовительных выработок отмечены локальные зоны предельного равновесия с наибольшим линейным размером 1,5 м и 0,2-0,3 м соответственно.

В плотных железослюдково-мартитовых рудах при высоте очистных выработок 12 м и 16 м в кровле подготовительных выработок отмечены локальные зоны предельного равновесия с наибольшим линейным размером 0,35 м и 0,2 м соответственно.

На этапе обработки выработок второго слоя в массиве рыхлых железослюдково-мартитовых руд площадь зоны предельного равновесия на 42% больше для очистных выработок высотой 16 м ($S_{\text{пред}}=158,18 \text{ м}^2$) в сравнении с выработками высотой 12 м ($S_{\text{пред}}=111,28 \text{ м}^2$). На рисунке 6 представлены расчетные контуры зон предельного равновесия выработок второго слоя, пройденных в рыхлых рудах.

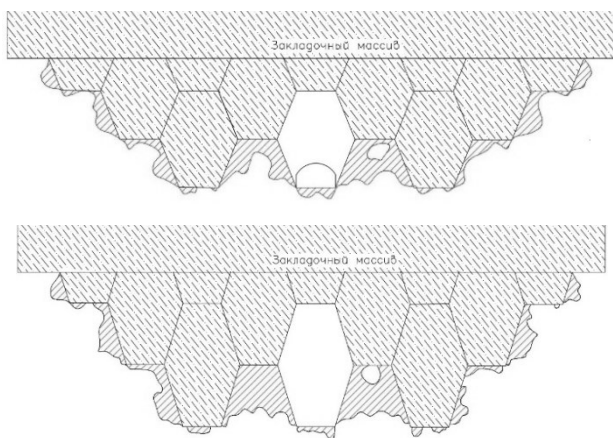


Рисунок 6 – Формирование зон предельного равновесия вокруг очистной выработки в рыхлой ЖСМ руде при высоте выработанного пространства 12м (сверху) и 16 м (снизу)

В железнослюдяково-мартитовых рудах и гидрогематит-мартитовых рудах средней плотности наблюдается аналогичное распределение зон предельного равновесия вокруг очистных выработок полигональной формы (рисунок 7).

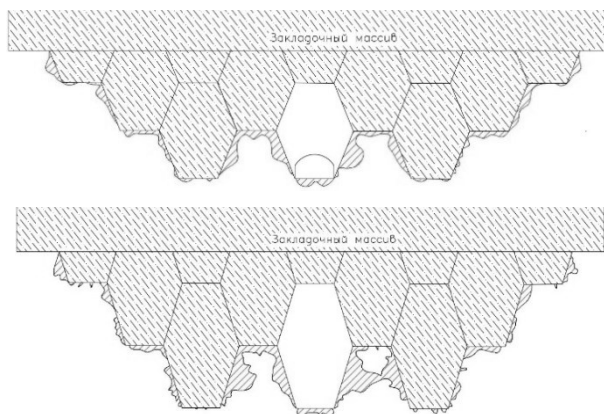


Рисунок 7 – Формирование зон предельного равновесия вокруг очистной выработки в ЖСМ и ГГМ руде средней плотности при высоте выработанного пространства 12 м (сверху) и 16 м (снизу)

Площадь зоны предельного равновесия вокруг выработок высотой 16 м составила $78,78 \text{ м}^2$, что на 48,9% больше чем для выработок высотой 12 м ($S_{\text{пред}}=52,91 \text{ м}^2$).

В гидрогематит-мартитовых и плотных железнослюдяково-мартитовых рудах в приконтурном массиве очистных выработок отмечены локальные зоны предельного равновесия с наибольшим линейным размером 0,55- 0,45 м (рисунок 8).

Размеры зоны предельного равновесия значительно зависят от плотности рудного массива. В рыхлых ЖСМ рудах, ожидаемо, зона предельного равновесия имеет наибольшие размеры, которые в 2 раза больше чем при ведении очистных работ в рудах средней плотности и в 3,6 раз больше чем в плотных рудах.

Высота очистных выработок не значительно сказывается на увеличении зоны предельного равновесия. Так при увеличении площади поперечного сечения очистной выработки на 34%, размер зоны предельного равновесия возрастает на 42% для выработок высотой 16 м.

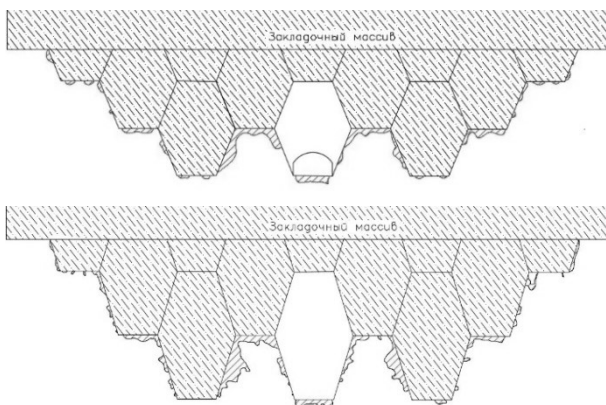


Рисунок 8 – Формирование зон предельного состояния вокруг очистной выработки в плотной ЖСМ и ГГМ руде при высоте выработанного пространства 12 м (сверху) и 16 м (снизу)

На основании результатов моделирования можно сделать вывод о том, что потеря устойчивости приконтурного массива происходит по поверхностям сдвига на контуре обнажений. Их параметры зависят от деформационно-прочностных свойств руд и геометрических параметров выемочных единиц.

3. Геомеханически безопасная разработка неустойчивых железных руд обеспечивается полигональной формой сечения очистных выработок и установкой упрочняющей анкерной крепи в зонах предельного равновесия приконтурного массива в боках выработок.

Результаты натуральных наблюдений и численного моделирования устойчивости горного массива показывают, что вокруг незакрепленной выработки, пройденной в рыхлых железнослудковомартитовых рудах, наблюдается интенсивный рост и последующее смыкание зон предельного равновесия. В результате возможна потеря устойчивости горной выработки в виде вывала из кровли на высоту обрабатываемой выработки.

С технологической и экономической точки зрения устойчивость выработок, закладка которых происходит в течение 2-3 месяцев, наиболее эффективно может быть обеспечена с использованием стеклопластиковой анкерной крепи.

Оценка эффективности крепления подготовительных горных выработок производилась на основании результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива.

Учет стеклопластикового анкерного крепления в модели осуществлялся в виде жестко закрепленных по всей длине стержней. Длина анкера составила 2,2 м, при диаметре 0,23 м. Модуль упругости материала анкеров принимался равным 40 ГПа, а коэффициент Пуассона - 0,26. Преимуществом данного типа крепления является возможность разрушения анкера при производстве взрывных работ или комбайновой проходке.

На рисунке 9 показана конфигурация зон предельного равновесия вокруг подготовительной выработки, пройденной в массиве железносланцевато-мармитовых рыхлых руд, без крепления и закрепленной стеклопластиковой анкерной крепью.

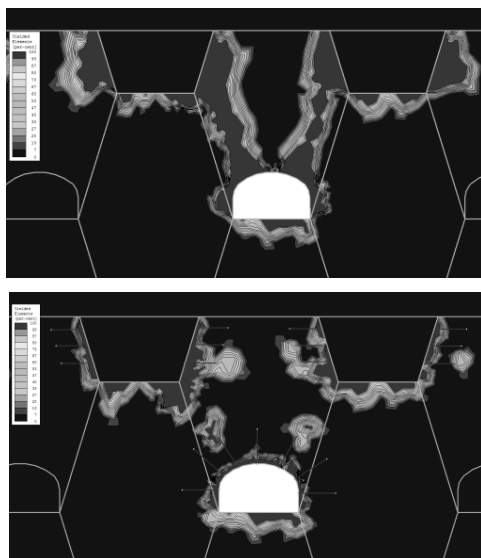


Рисунок 9 – Формирование зон предельного равновесия вокруг подготовительной выработки в рыхлой ЖСМ руде

В приконтурном массиве выработки, упрочненном стеклопластиковыми анкерами, наблюдается значительное уменьшение размеров зон предельного равновесия. Отмечены локальные зоны предельного равновесия с наибольшим линейным размером в кровле и боках выработки до 0,35 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи геомеханического обоснования параметров полигональных выработок при разработке месторождений неустойчивых железных руд.

Основные результаты выполненных исследований:

1. На базе анализа результатов исследований физико-механических свойств рудного массива и натуральных инструментальных наблюдений на станциях глубинных реперов выполнена оценка формирования напряженно-деформированного состояния железорудного массива и установлены формы потери устойчивости очистных и подготовительных выработок в виде отслоений и локальных вывалов по поверхностям сдвига.

2. Обосновано применение упругопластической геомеханической модели рудного массива и построены конечно-элементные модели для расчета напряженно-деформированного состояния рудного массива с применением программного комплекса Abaqus с учетом формы и геометрических размеров очистных выработок, физико-механических и прочностных свойств рудного и закладочного массивов.

3. Выявлены закономерности формирования зон предельного равновесия вокруг выработок полигональной формы сечения с учетом изменения полей напряжений при ведении горных работ.

4. Установлены зависимости изменения размеров зон предельного равновесия вокруг выработок полигональной формы поперечного сечения от их геометрических параметров и прочностных свойств рудного массива. В рыхлых железнослудково-мартитовых рудах наблюдается интенсивный рост и последующее смыкание зон предельного равновесия на всю ширину очистной выработки. В гидрогематит-мартитовых рудах при высоте выработок 16 м и 12 м локальные зоны предельного равновесия имеют наибольшие линейные размеры соответственно $0,7 \pm 0,5$ м и $0,3 \pm 0,2$ м.

5. Обоснованы геометрические параметры очистных выработок полигональной формы поперечного сечения, обеспечивающие безопасную разработку богатых железных руд, и составлены рекомендации по повышению устойчивости приконтурной зоны массива с применением стеклопластиковой анкерной крепи.

6. Предложен способ разработки мощных крутопадающих месторождений неустойчивых железных руд на основе выполненного геомеханического обоснования (патент 2648371 опубл. 26.03.2018, Бюл. №9).

7. Составлены предложения по использованию результатов исследований проектными и производственными организациями при обосновании конструктивных параметров систем разработки с закладкой выработанного пространства и в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Горное дело».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Созонов К.В. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок при разработке Яковлевского месторождения / В.Л. Трушко, К.В. Созонов // Естественные и технические науки, М, 2016 г., №6, с. 63-67.

2. Созонов К.В. Оценка напряженно-деформированного состояния очистных камер при разработке Яковлевского месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, Тула, 2016, №4, с. 229-234.

3. Созонов К.В. Повышение эффективности разработки богатых железных руд Яковлевского месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, Тула, 2017, №1, с. 153-159.

В прочих изданиях:

4. Созонов К.В. Технология перехода от слоевой к камерным системам разработки с закладкой выработанного пространства // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. LVIII междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2016 г., №5(53). с. 29-36.

5. Созонов К.В. Повышение устойчивости подготовительных горных выработок / К.В. Созонов, А.В. Мысин // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам XXII международной научно-практической конференции, М, 2016 г., №20(22), с. 209-212.

6. Пат. 2648371 Российская Федерация, МПК E21C 41/22, E21F 15/00, E21F 1/00. Способ разработки мощных крутопадающих месторождений неустойчивых руд / Трушко В. Л., Протосеня А.Г., Трушко О.В., Созонов К.В; заявитель и патентообладатель феде-

ральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". — № 2016151923; заявл. 27.12.16; опубл. 26.03.18, Бюл. № 9.— 1 с.

В иностранных изданиях:

7. K. Sozonov. Stress-strain state assessment of stopes during development of the Yakovlevsky deposit. Scientific Reports on Resource Issues 2017: Proc. of Freiberg – St. Petersburg Colloquium of young scientists, №12, 2017. pp. 95-100.

8. K. Sozonov. Stableness improvement of the excavations during the chamber-and-pillar development of Yakovlevsky Deposit reserves. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. Volume 1. pp. 1653-1657.