

На правах рукописи



Котенков Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ МАЛОУСТОЙЧИВЫХ
РУД КАМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ РАЗРАБОТКИ
С ЗАКЛАДКОЙ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на кафедре разработки месторождений полезных ископаемых

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Калмыков Вячеслав Николаевич

Официальные оппоненты: **Айнбиндер Игорь Израилевич**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФГБУН
«Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук»

Авдеев Аркадий Николаевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»), г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «27» декабря 2023 г. в 13³⁰ час. на заседании диссертационного совета 24.2.324.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»: <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Корнилов Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Современное состояние подземных горных работ характеризуется увеличением глубины, вовлечением в разработку месторождений с низкими прочностными свойствами руд и пород, их высокой нарушенностью, следовательно, низкой устойчивостью, что ведет к вынужденному использованию высокочрезвычайных технологий добычи подземным способом - слоевых систем разработки с закладкой и нисходящим порядком отработки, отличающихся высокой стоимостью и низкой производительностью блока.

Как известно, эффективность ведения подземных работ напрямую зависит от размеров выемочных единиц (высота, ширина камер, рудных целиков). Чем больше размеры выемочных единиц, тем меньше затраты требуются для добычи руды, поэтому применение камерных систем разработки существенно улучшает технико-экономические показатели освоения недр.

В условиях увеличения глубины ведения подземных горных работ при освоении запасов ценных малоустойчивых руд одним из основных способов повышения эффективности является применение систем разработки с максимально возможными параметрами очистных выработок. Однако использование менее затратных вариантов систем разработки сдерживается отсутствием опыта эксплуатации месторождений в сложных горно-геологических условиях камерными системами разработки, методик по обоснованию конструктивных параметров, порядка отработки месторождений.

Несмотря на большой объем исследований по совершенствованию и развитию технологий освоения запасов в сложных горно-геологических условиях, по-прежнему остаются актуальными задачи, связанные с повышением эффективности освоения месторождений ценных неустойчивых руд и обеспечением безопасности горных работ. В данной работе они являются предметом исследований.

Цель работы – разработка технологии и обоснование параметров высокопроизводительных камерных систем разработки, обеспечивающих безопасное и эффективное освоение месторождений ценных малоустойчивых руд.

Идея работы – эффективность и безопасность освоения месторождений ценных малоустойчивых руд достигается за счет использования устойчивых камерных очистных выработок полигональной формы и шахматного порядка отработки запасов шахтных полей.

Основные задачи исследований:

- анализ и обобщение существующих способов ведения горных работ при освоении месторождений, представленными малоустойчивыми рудами
- анализ существующих методов расчета параметров систем разработки с закладкой;

- оценка факторов, влияющих на рациональные формы и размеры очистных выработок;
- формирование технологических схем выемки запасов ценных малоустойчивых руд с использованием камер полигональной (ромбовидной) формы;
- исследование напряженно-деформированного состояния несущих элементов систем разработки при использовании камер полигональной (ромбовидной) формы;
- разработка методики расчета параметров камерной системы разработки при отработке запасов малоустойчивых руд;
- промышленная апробация рекомендаций и их технико-экономическая оценка.

Объект исследований: подземная технология освоения месторождений ценных малоустойчивых руд.

Предмет исследований: параметры камерных систем подземной разработки при освоении запасов ценных малоустойчивых руд.

Защищаемые положения:

1. Использование камерных выработок полигональной (ромбовидной) формы в сочетании с нисходящим порядком отработки запасов, предусматривающим смещение камер как по горизонтали, так по вертикали (шахматный порядок), обеспечивает повышение производительности блоков, эффективности использования недр и безопасность горных работ.

2. Придание камерам полигональной формы с соотношением малой и большой полуосей 1:2, с углом стенок в нижней части камеры, равным 75° , а в верхней-- 105° , обеспечивает равномерный характер распределения напряжений на контуре камеры, снижают величину растягивающих напряжений, что позволяет повысить устойчивость очистных выработок, уменьшить требуемую прочность закладки.

3. Наименьшие значения нормативной прочности, а также нагрузок на рудные целики при использовании камер полигональной (ромбовидной) формы достигаются при шахматном порядке стадийной выемки запасов по схеме 1-2-1-2 и определяются высотой формируемого искусственного массива с учетом влияния размеров выемочной единицы.

Научная новизна состоит в:

- выявлении закономерностей распределения напряжений на контуре очистных камер полигональной (ромбовидной) формы учитывающих влияние геометрических размеров, параметров силового поля, стадийности выемки;
- разработке и научном обосновании эффективной подземной технологии освоения месторождений ценных малоустойчивых руд с использованием очистных выработок полигональной формы;

- создании научно обоснованной методики расчета параметров технологии разработки с использованием камер полигональной (ромбовидной) формы: размеров и углов наклона стенок, соотношения осей, нормативной прочности закладки, порядка отработки запасов.

Методы исследований включают анализ и оценку существующего положения горных работ на предприятиях, ведущих разработку ценных малоустойчивых руд системами с камерной выемкой; аналитические расчеты параметров технологических схем; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массивов руды и твердеющей закладки при использовании камерных систем разработки с полигональной формой камер и шахматном порядке выемки запасов; научное сопровождение опытно-промышленных испытаний, натурные наблюдения при отработке; статистическая обработка результатов, выявление зависимостей.

Достоверность научных результатов обеспечивается сопоставимостью с результатами предшествующих научных достижений; проведенным объемом лабораторных, шахтных, модельных экспериментов с достаточной сходимостью результатов; использованием признанных методов исследований и сертифицированных программных продуктов; положительными результатами опытно-промышленной апробации эффективных технологий с использованием камерных систем разработки для освоения запасов ценных руд в сложных горно-геологических условиях; корректностью постановки задач и граничных условий; надежным и достаточным объемом исходных данных, принятых на основе натуральных испытаний камерных систем разработки с использованием очистных выработок ромбовидной формы при шахматном порядке отработки запасов кимберлитовых руд на руднике «Айхал».

Практическая значимость диссертации состоит в разработке и обосновании параметров технологических схем отработки месторождений ценных малоустойчивых руд камерными системами разработки с закладкой и использованием очистных выработок полигональной формы при шахматном порядке освоения запасов, обеспечивающих безопасность и повышение эффективности горных работ.

Личный вклад автора заключается в: постановке цели и задач исследования, формулировании основной идеи достижения цели; разработке методики проведения аналитических расчетов, лабораторных и шахтных экспериментов, математического моделирования геомеханического состояния природного и искусственного массивов, позволивших выявить механизм передачи нагрузок на массив закладки, закономерности напряженного состояния массива камер полигональной (ромбовидной) формы; разработке алгоритма и методики обоснования параметров систем разработки в сложных горно-геологических условиях; апробации и внедрении предложенной технологии в промышленных условиях.

Реализация выводов и рекомендации. Основные положения диссертационной работы использованы при составлении проектной документации: технических проектов, технологических регламентов отработки запасов месторождений «Айхальское», «Яковлевское», «Корбалихинское»; эксплуатационной документации: паспортов на отбойку, закладку, проведение выработка. Основные научные положения и практические решения диссертации использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при подготовке горных инженеров по специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Подземная разработка рудных месторождений».

Апробация результатов. Основные положения диссертации докладывались на: Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2014); VIII, IX, X, XI, XII Международных научно-технических конференциях «Комбинированная геотехнология» (г. Магнитогорск, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023); научных семинарах и научно-технических советах предприятий АК «Алроса», института «Якутнипроалмаз» (г. Мирный, 2013-2022); АО «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург, 2014-2022), АО «Русская медная компания» (г. Екатеринбург).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ и индексируемых в базах Web of Science и Scopus; 5 – прочих изданиях; 3 монографии, а также получен 1 патент.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 143 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 64 рисунков, список использованной литературы из 99 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ и обобщение опыта освоения месторождений ценных руд в сложных горно-геологических условиях.

В настоящее время при подземной разработке малоустойчивых ценных руд для снижения потерь применяют системы разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Наибольшее распространение получили слоевые системы с нисходящим порядком выемки, которые характеризуются большим объемом подготовительно - нарезных работ, высокими затратами на выемку руды и низкой производительностью горных работ, поэтому на рудниках для увеличения производительности формируют несколько уровней выемки руды (ярусов), либо работы ведутся в нескольких панелях, что существенно осложняет организацию работ.

Перспективным решением, применительно к освоению месторождений с малоустойчивыми рудами, является использование камер полигональной (ромбовидной) формы и шахматного порядка отработки, что позволяет рас-

ширить область применения камерных систем разработки и существенно повысить эффективность подземной добычи.

Вопросам разработки методов расчета параметров системы разработки с закладкой посвящены работы известных ученых: М.И. Агошкова, И.А. Айнбиндера, Д.М. Бронникова, М.И. Вескова, Ю.В. Волкова, О.З. Габараева, В.И. Голика, Ю.И. Чабдаровой, Н.Ф. Замесова, О.В. Зотеева, Д.Р. Каплунова, В.Н. Калмыкова, В.П. Кравченко, Е.В. Кузьмина, А.Г. Протосеня, В.Д. Паляя, М.В. Рыльниковой, И.Н. Савича, И.В. Соколова, К.Н. Трубецкого, В.Л. Трушко, М.Н. Цыгалова и др.

Анализ существующих методик расчета параметров систем разработки с закладкой показал, что в настоящее время созданы, апробированы и применяются надежные расчетные методы определения требуемой прочности закладки, размеров рудных и искусственных целиков.

Как известно, эффективность подземных горных работ напрямую зависит от размеров очистных выработок, поэтому при подземной выемке руд там, где это возможно по горнотехническим условиям, применяются камерные системы разработки.

В условиях отработки малоустойчивых руд, когда использование прямоугольной формы не обеспечивает сохранности контура, целесообразно рассмотреть вариант перехода на полигональные (эллиптические) формы очистных выработок, но изменение формы сечений выработок существенно отражается на порядке извлечения запасов этажей, в пределах выемочной единицы. Внедрение данных технологий сдерживается отсутствием методик расчета параметров, учитывающих форму камер, порядок отработки со смещением камер и смежных горизонтов.

По результатам анализа опыта освоения месторождений в сложных горно-геологических условиях сформулированы цель, задачи и методы исследований.

Во второй главе диссертации изложены исходные данные и основные положения разработанной методики исследований по обоснованию параметров камерных систем разработки на примере алмазонасного месторождения «Айхальское», которое характеризуется сложностью горно-геологических условий, что предопределило применение высокочрезвычайных технологий добычи с использованием слоевых систем разработки с закладкой.

При низкой прочности, высокой нарушенности руд месторождения, когда создание значительных по размерам как вертикальных, так и горизонтальных обнажений рудного массива не представляется возможным, предложено переходить к использованию камерных выработок, имеющих устойчивую форму сечения – эллиптическую (ромбовидную). При этом обеспечивается устойчивость рудных стенок камер. Устойчивость верхней части камеры достигается за счет применения твердеющей закладки соответствующей прочности.

На основе имеющихся данных по месторождению, разработаны технологические схемы, основанные на применении камерных систем разработки, отличающихся от традиционных формой поперечного сечения и порядком отработки запасов (рис.1).

Учитывая известные закономерности формирования контуров выработанного пространства и приведенный выше имеющийся опыт, предложено формирование камер с наклоном рудных бортов под углами сдвига, определяемыми натурными замерами. Использование очистных выработок полигональной (ромбовидной) формы предполагает применение нисходящего порядка отработки запасов этажей, приводит к смещению контуров камер относительно соседних как по горизонтали, так и по вертикали, формированию каркасной (замковой) конструкции с несущими опорами из разнопрочного материала – закладки и руды.

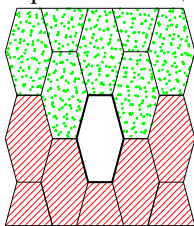


Рис.1 – Схема выемки запасов ромбовидными камерами в шахматном порядке

Переход на полигональные по форме (ромбовидные) камеры, соответственно и на так называемый шахматный порядок отработки, изменяет механизм передачи нагрузок с рудного массива на искусственный, который в настоящее время недостаточно изучен, а методики расчета параметров при использовании выработок ромбовидной формы и шахматного порядка выемки отсутствуют.

Объектами геомеханического обоснования являются: пролеты обнажений пород и закладки в кровле трапецевидных (переходная зона) и ромбовидных камер, высота и ширина камеры, то есть размеры большой и малой полуосей, углы наклона и высота стенок в верхней и нижней частях камер, прочность закладки в своде и стенках камеры, устойчивые размеры рудных целиков, рациональный порядок освоения запасов.

Предложено оптимальное соотношение осей камеры (b/h) находить из условия равенства тангенциальных напряжений на контуре эллиптической полости, где размещается камера полигональной формы, используя решение Н.Н. Фотиевой.

Геомеханическое состояние рудных и закладочных массивов вокруг камеры полигональной (ромбовидной) формы характеризуется специфичным распределением напряжений, вызываемым особенностью горной конструкции, которая состоит в том, что по высоте они неоднородные и выполнены из разномодульного материала – руды и закладки. Наиболее слабым звеном является средняя часть комбинированного целика, имеющая наименьший размер и поверхность раздела (рис.2).

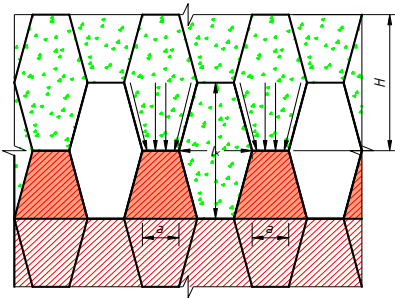


Рис.2 – Схема к расчету нагрузок на целики при использовании ромбовидных камер

В качестве базового варианта для сравнения вариантов систем разработки принята слоевая система разработки. В связи с тем, что показатели использования недр по рассматриваемым вариантам практически одинаковые, то в качестве сравнительного критерия принята стоимость добычи 1 т руды в расчете на блок, выемочную единицу.

В третьей главе, посвященной обоснованию параметров систем разработки с закладкой и использованием камер полигональной (ромбовидной) формы, приведены результаты исследования закономерностей формирования устойчивых контуров очистных выработок. Показано, что по данным 3D-сканирования контуров камер Уральских подземных рудников, фактические контуры не всегда соответствуют проектным, чаще приобретают форму, близкую к эллиптической. Средние значения углов наклона нижней части камер по рудникам находятся в интервале $73-75^\circ$, что хорошо согласуется с аналитическим решением В.В. Соколовского. Высота наклонных стенок камер составляет $0,5-0,75$ общей высоты. В ряде камер в кровле фиксируется образование поверхностей под углами $105-110^\circ$, что подтверждает известные решения К.В. Руппенейта.

Для проверки правильности выше приведенных методических положений по механизму передачи нагрузок на несущие элементы системы разработки и уточнения закономерностей формирования полей напряжений проведено математическое моделирование геомеханической ситуации при отработке запасов ромбовидными камерами на примере рудника «Айхал».

При моделировании напряженно-деформированного состояния искусственного и рудного массивов одиночной камеры, имеющей ромбовидную форму, фиксируется отсутствие растягивающих напряжений, за исключением плоских участков кровли и почвы, где создаются пониженные напряжения сжатия, а при больших пролетах возможно образование небольших растягивающих.

С целью оценки влияния порядка отработки на нагруженность несущих элементов проведены модельные исследования трех вариантов стадийной

Поскольку отработка ведется в нисходящем порядке с формированием монолитного массива, имеющего невысокие деформационные характеристики, для расчета нагрузок и устойчивых параметров применимо условие прочности Турнера-Шевякова, что позволит учесть влияние размеров подработки, стадийность работ, различие в деформационных свойствах.

выемки запасов камер: через один комбинированный целик, через три и через пять целиков (рис.3).

Как видно из полученных данных, порядок отработки камер в подэтаже оказывает влияние как на характер распределения, так и на величину возникающих напряжений (рис. 4). Наиболее высокий уровень напряжений фиксируется на контакте рудных и искусственных целиков. Оптимальной можно считать технологическую схему выемки запасов камер в подэтажах в порядке 1-2-1-2-1, обеспечивающую снижение требуемой прочности закладки и высокий коэффициент использования рудной площади.

Проведено моделирование геомеханической ситуации при использовании ромбовидных камер при изменяющейся глубине работ (рис.5). Сравнение напряжений в сходственных точках на отметках +45/+25 м и -75/-95 м показало, что роста напряжений как в рудных, так и в искусственных целиках практически не происходит.

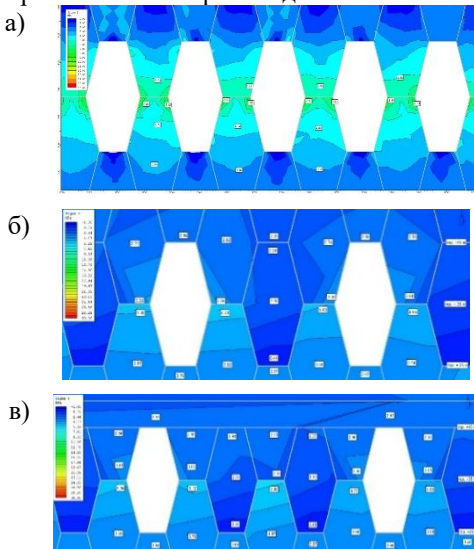


Рис.3 – Распределение напряжений в рудном и искусственном массивах при отработке запасов в подэтаже +45/+25 м: а) выемка через один комбинированный целик; б) выемка через три целика; в) через пять целиков

Определение геометрических параметров камер полигональной формы, в отличие от традиционных прямоугольных, включает расчет рационального соотношения высоты и ширины, угла наклонов верхней и нижней частей, размеров горизонтальных обнажений в кровле и почве, а также устойчивых размеров наклонных обнажений рудного и искусственного массивов. Размеры последних рекомендуется находить через значения вертикальных откосов в соответствии с заданными углами.

Рациональное соотношение осей полигональной камеры определяется с использованием зависимостей, предложенных Н.Н. Фотиевой для выработок

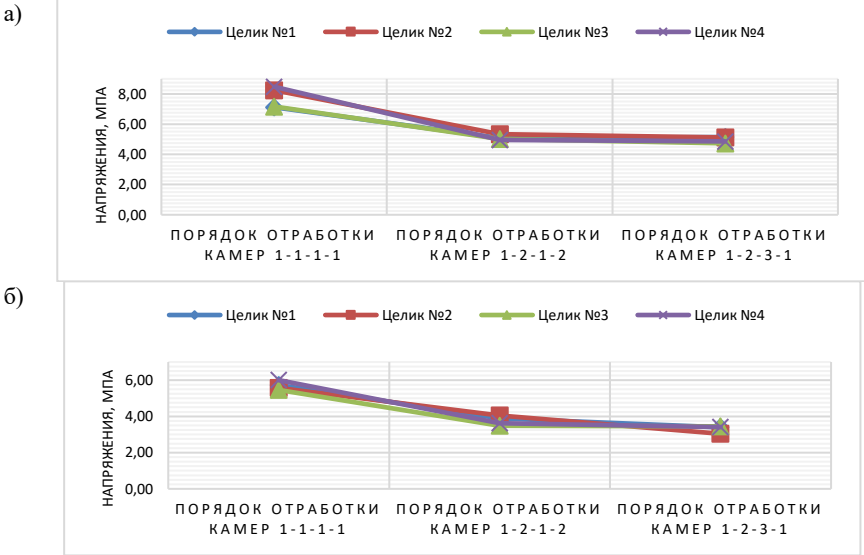


Рис.4 – Графики зависимости напряжений от порядка выемки камер в подэтаже:
 а – в рудных; б – в искусственных целиках

эллиптической формы, обеспечивающих равенство тангенциальных напряжений по контуру и отсутствие растягивающих в кровле и почве камеры.

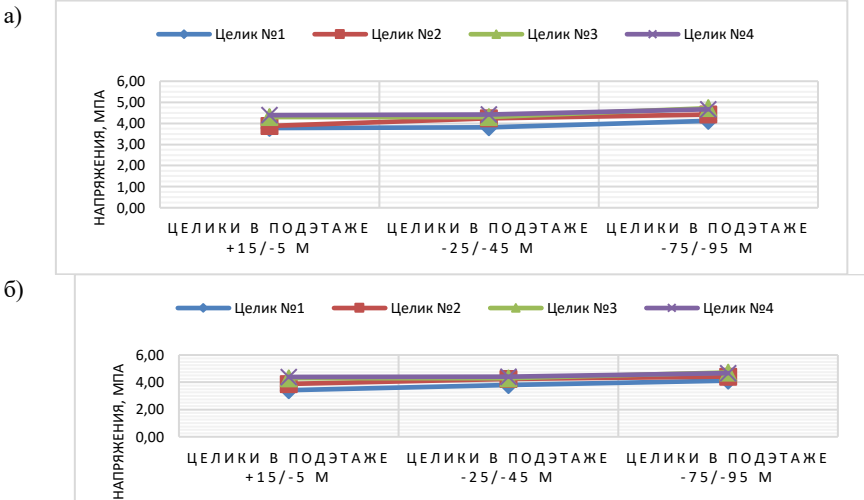


Рис.5 – Графики зависимости напряжений от глубины горных работ:
 а – в рудных целиках; б – в искусственных целиках

В связи с тем, что камеры формируются в закладочном и горном массивах, свойства которых отличаются, то расчет данного параметра (h/b) проводится отдельно для каждой среды. Результаты расчета отношения большой и малой осей эллиптической камеры приведены на рис. 6.

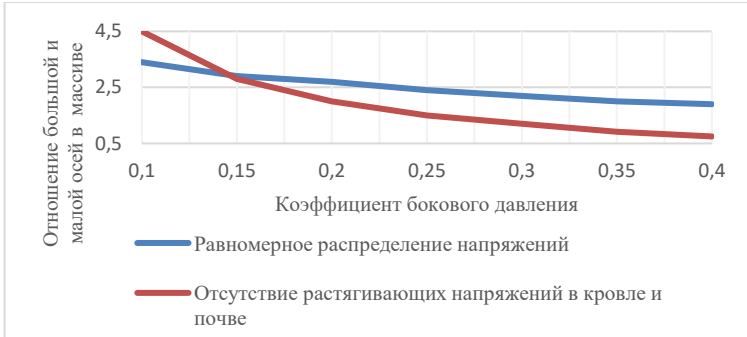


Рис.6 – Графики зависимости отношения большой и малой осей эллиптической выработки от коэффициента бокового давления

Анализ показывает, что в рудных и искусственных массивах, где коэффициент бокового давления находится в пределах $\lambda = 0,1-0,4$, целесообразно принимать отношение осей в интервале $2,5-2,0$, что обеспечивает равномерное распределение тангенциальных напряжений и отсутствие, или низкий уровень растягивающих напряжений.

Знание отношения осей горной выработки позволяет провести построение камеры путем вписывания полигонального контура в эллиптическую полость.

Устойчивость обнажений закладки обеспечивается подбором материала соответствующей прочности. Для рудных массивов их свойства являются ограничивающим фактором при выборе допустимой высоты камеры, которая конструктивно будет равна двойной высоте устойчивого рудного откоса.

По методике, учитывающей слоистость закладки, проведено обоснование размеров обнажений искусственного массива для камер ромбовидной формы (табл.1). Результаты расчетов показывают, что высота рудной стенки камеры, сформированной под углом 75° , с достаточной надежностью может быть принята равной 10 м. Общая высота ромбовидной камеры с учетом шахматного расположения камер составит 20 м. Для обеспечения устойчивости нависающих закладочных стенок камер высотой 10 м с обратным наклоном 75° , необходимо создавать закладочный массив с прочностью не менее 2 МПа.

Таблица 1 – Высота устойчивых наклонных обнажений закладки

Прочность закладочного массива, МПа	Высота устойчивого вертикального обнажения закладки, м	Высота устойчивого наклонного обнажения закладки, м
1	15,2	9,1
2	22,1	13,2
3	27,3	16,3
4	30,9	18,5
5	35,2	21,1

Расчет искусственных целиков имеет ряд особенностей, вызванных конфигурацией очистных камер и порядком их отработки. Смещение камер по высоте приводит к тому, что целики имеют уменьшенное сечение в средней части и состоят из двух частей – закладки и руды, сопряженных в среднем по высоте сечении.

Требуемая прочность закладки находится решением условия прочности Турнера-Шевякова, которое, после преобразований для вариантов отработки, запишется в виде:

$$\text{через один целик} \quad [\sigma_3] = \frac{K_y \cdot K_n \cdot K_3 \cdot \gamma_3 \cdot h_n \cdot (2a + h_k \cdot ctg\alpha)}{0,5a + 0,05 \cdot h_k}, \quad (1)$$

$$\text{через три целика} \quad [\sigma_3] = \frac{K_y \cdot K_n \cdot K_3 \cdot \gamma_3 \cdot h_n \cdot (4a + 2h_k \cdot ctg\alpha)}{0,5 \cdot (3a + h_k \cdot ctg\alpha) + 0,05 \cdot h_k}, \quad (2)$$

$$\text{через пять целиков} \quad [\sigma_3] = \frac{K_y \cdot K_n \cdot K_3 \cdot \gamma_3 \cdot h_n \cdot (6a + 3h_k \cdot ctg\alpha)}{0,5 \cdot (5a + 2h_k \cdot ctg\alpha) + 0,05 \cdot h_k}, \quad (3)$$

где a – ширина целика; α – угол наклона стенки камеры; h_k – высота камеры; K_n – коэффициент нагрузки, находится через соотношение h_n / ℓ_n , где ℓ_n – ширина панели; h_n – высота слоя приведенной нагрузки.

Результаты определения прочности закладки по вариантам порядка выемки представлены в табл. 2. Расчеты проводились для следующих исходных данных: $a = 5$ м; $\gamma_3 = 2$ т/м³; $h_n = 75$ м; $h_k = 20$ м; $\alpha = 75^\circ$; $K_3 = 2,0$; $K_n = \ell_n / h_n$; $\ell_n = 50$ м.

Таблица 2 – Прочность закладки по условию устойчивости искусственных целиков

Требуемая прочность закладки, МПа	Порядок отработки		
	через 1 целик	через 3 целика	через 5 целиков
	8,8	5,5	4,9

Расчеты прочности закладки, с использованием теории свода, показали хорошую сходимость результатов с вышеприведенными.

Оценка устойчивости рудных целиков, формируемых при отработке запасов камерами полигональной формы, производилась с использованием гипотезы свода. Результаты расчета запаса прочности рудных целиков при использовании ромбовидных камер для различных вариантов отработки запасов представлены в табл. 3. Исходные данные: прочность на сжатие рудного массива $\sigma_{сж} = 12$ МПа; высота целика $h_u = 10$ м; ширина камеры $b = 10$ м; высота слоя закладки $h_n = 75$ м; коэффициент структурного ослабления $K_{co} = 0,2$; $\gamma_3 = 2$ т/м³; соотношение $\varepsilon_3 / \varepsilon_p = 1:10$; K_y – коэффициент упрочнения целика из закладки соседними целиками. При порядке 1–1–1–1, $K_y = 1,0$; при порядке 1–2–1–2, $K_y = 1,3$; при порядке 1–2–3–1, $K_y = 1,6$.

Таблица 3 – Оценка устойчивости рудных целиков при использовании ромбовидных камер

Коэффициент запаса прочности	Порядок отработки		
	через 1 целик	через 3 целика	через 5 целиков
	1,05	3,4	5,9

Из расчетов следует, что целесообразно применять стадийный порядок отработки, при этом достигается постепенная передача нагрузок на несущие элементы системы разработки. Полученные в процессе моделирования значения коэффициента запаса прочности рудных целиков близки по величине к расчетным. По условиям устойчивости искусственных целиков целесообразны к применению технологические схемы стадийной выемки (1-2-1-2 и 1-2-3-1).

По результатам исследований разработана методика выбора систем разработки для месторождений ценных малоустойчивых руд, согласно которой оценка возможности применения камерных систем производится на основе решения условия прочности:

$$\frac{\sigma_{сж}^M}{K_3} \geq \gamma \cdot h_n \cdot K_n \cdot K_y \cdot K_e \left(1 + \frac{2}{\zeta} - \lambda_p \right), \quad (4)$$

где $\sigma_{сж}^M$ – прочность рудного массива, МПа; γ – средневзвешенная плотность налегающего массива, МН/м³; h_n – высота налегающей толщи, оказывающей давление на целик, м; K_n – коэффициент нагрузки, доли ед.; K_e – коэффициент, учитывающий влияние порядка выемки запасов, принимается по результатам исследований; λ – коэффициент бокового давления в рудном массиве; $\zeta = h/v$ – отношение высоты (h) к ширине (v) камеры. K_y – коэф-

коэффициент упрочнения – в зависимости от порядка отработки камер в подэтаже.

Если условие (4) выполняется, то проводится конструирование полигонального контура камеры, размещаемой в эллиптической выработке с целесообразным соотношением осей. Размеры нарезных выработок в сечении камеры задаются, исходя из технологических требований и условий совмещения поперечных сечений выработок с прямолинейными элементами кровли и почвы камер. Наклонные стенки нижней и нависающей частей камер располагаются под углами соответственно 75° и 105° . При известных ширине нарезных выработок в кровле, почве и заданном соотношении $\zeta = h/v$, определяется высота камеры по зависимости:

$$h = \frac{\zeta \cdot a}{1 - \zeta \cdot \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (5)$$

где a – пролет камеры по кровле и почве, м.; $\alpha = 75^\circ$ – угол наклона стенки, град.

Для полигонального сечения камеры производится выбор порядка выемки запасов, геомеханическое обоснование нормативной прочности закладки, проверка устойчивости рудных целиков, расчет технологических процессов проведения подготовительных и очистных работ, технико-экономических показателей.

В качестве базового варианта при сравнении принимается слоевая система разработки, технико-экономические показатели которой рассчитываются для данных горно-геологических условий.

В четвертой главе изложены результаты промышленной апробации камерной системы разработки, которая проводилась на руднике «Айхал», горно-геологические условия которого характеризуются высокой сложностью, в период 2014-2022 гг.

В 2014 г. были разработаны регламенты на технологию отработки Северо-Восточного рудного тела (СВРТ) до отм. -100 м с применением камерных систем разработки на руднике «Айхал», был составлен «Проект технического перевооружения по переходу со слоевой системы отработки запасов СВРТ на камерную...», осуществлялись инженеринговые работы по адаптации решений к условиям конкретных участков рудных тел.

Для перехода со слоевой системы разработки к системе с выемкой полигональными (ромбовидными) камерами, расположенными относительно друг друга в шахматном порядке, предусмотрена выемка руды в так называемой переходной зоне трапециевидными камерами.

Параметры системы разработки с выемкой запасов ромбовидными камерами (рис. 7): длина – равна горизонтальной мощности рудного тела и в среднем составляет 40-50 м; ширина – изменяется от 5 м в верхней и нижней частях камеры до 10 м в центре камеры; высота – равна 20 м.

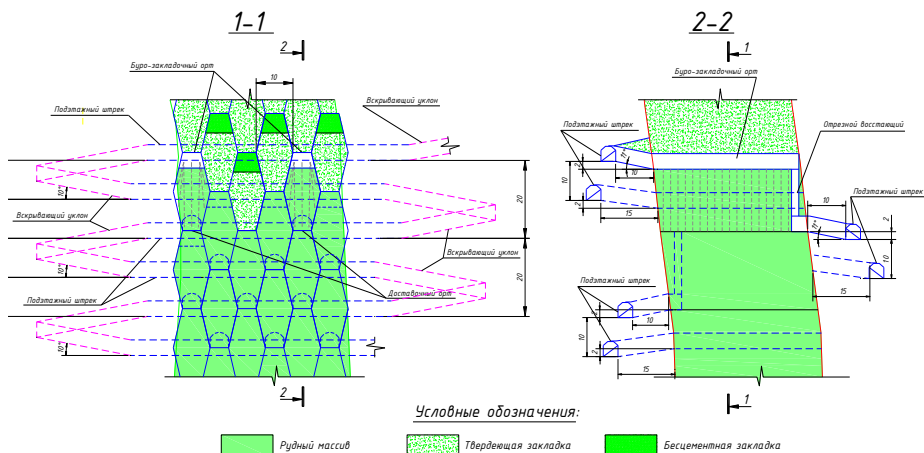


Рис.7 – Конструкция камерной системы разработки с выемкой запасов ромбовидными камерами (начальная стадия очистных работ в камере)

Была разработана и внедрена технология очистной выемки руды, которая включала оформление отрезного восстающего, отрезной щели в торце камеры между буровым и доставочным горизонтами, послонную отработку слоев руды с помощью нисходящих вееров скважинных зарядов. По окончании выемки запасов камеры осуществлялось строительство перемычек и производилась закладка выработанного пространства камеры.

С начала внедрения камерной системы разработки на СВРТ отработано около 200 выемочных камер. На ЮЗРТ отработаны более 40 ромбовидных камер.

Сравнение затрат показывает, что себестоимость добычи на руднике «Айхал» при использовании камерных систем разработки снижается на 45 %, а производительность блока возрастает по сравнению со слоевой системой разработки на 38 %, что позволило увеличить объем добычи с 500 тыс. т руды в год до 650 тыс. т.

Для практического применения результатов исследований составлен алгоритм выбора рационального варианта системы разработки и определения технологических параметров, представленный на рис. 8.

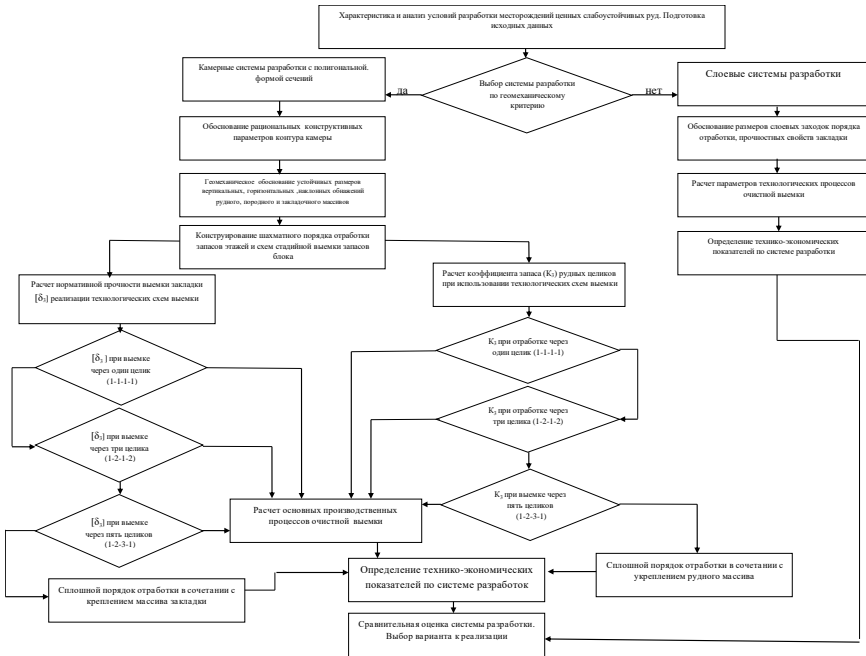


Рис.8 – Алгоритм выбора рационального варианта системы разработки при освоении месторождений ценных малоустойчивых руд

Разработанный алгоритм позволяет на этапе проектирования выбрать оптимальный вариант отработки месторождений ценных малоустойчивых руд, в том числе и с использованием камерных систем разработки, обеспечить безопасность горных работ и повысить эффективность использования недр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной научно-практической задачи по обоснованию технологии выемки запасов месторождений с малоустойчивыми рудами камерными системами разработки, основанной на использовании очистных выработок полигональной (ромбовидной) формы со смещением камер в вертикальной и горизонтальной плоскостях, что обеспечивает снижение себестоимости добычи, повышение производительности труда, безопасность работ и имеет важное значение для развития горнодобывающего комплекса России.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Анализом опыта освоения месторождений неустойчивых руд подземным способом установлено, что добыча осуществляется малопроизводительными слоевыми системами разработки с нисходящей выемкой, характеризующимися высокой себестоимостью добычи. Варианты с полигональной (ромбовидной) формой поперечного сечения камер, заходок, обеспечивающие высокую устойчивость очистных выработок, не нашли применения в связи с технологическими трудностями создания и крепления выработок такой конфигурации, не проработанностью конструктивного исполнения систем разработки, не достаточной изученностью механизма нагружения несущих элементов камер полигональной формы.

2. Установлено, что существующие методики расчета параметров систем разработки с закладкой не учитывают форму поперечных сечений очистных камер, порядок отработки со смещением горизонтов по вертикали, а камер – по горизонтали.

3. Натурными исследованиями условий формирования контуров очистных камер показано, что в процессе горных работ создается устойчивая конфигурация выработанных пространств в виде пустот эллиптической формы. Обработкой большого объема данных замеров установлены углы контуров в верхней и нижней частях камер ($73-75^\circ$), значения которых хорошо согласуются с результатами аналитических решений теории предельного равновесия.

4. Инструментальными, аналитическими, модельными исследованиями установлено, что придание горной выработке полигональной формы обеспе-

чивает равномерный характер распределения тангенциальных напряжений за исключением плоских участков кровли и почвы, где возможно появление пониженных напряжений сжатия или растяжения.

5. Численным моделированием геомеханической ситуации при использовании очистных камер полигональной (ромбовидной) формы сечения в сочетании с шахматным порядком отработки запасов показано, что при этом формируются устойчивые арочные конструкции за счет расклинивания ромбовидных блоков, наиболее нагруженными элементами которых являются зоны горизонтальных контактов рудных и искусственных целиков.

6. Установлено, что после создания искусственного перекрытия основные нагрузки на целики определяются его весом. Сравнение нагруженности конструктивных элементов по данным моделирования выявило минимальный прирост напряжений с глубиной, что свидетельствует о правомерности использования условия прочности Турнера-Шевякова и теории свода для расчета нагрузок на элементы систем разработки.

7. Исследование влияния порядка отработки показало его существенное влияние на нагруженность несущих элементов. Наиболее высокий уровень напряжений отмечается на горизонтальных контактах рудных и искусственных массивов при одностадийной выемке: 7-8 МПа – в рудных; 5,5-6,0 МПа – в закладке. Увеличение числа стадий ведет к снижению напряжений, обеспечивает плавный характер передачи нагрузок на искусственный массив (5-5,5 МПа – в рудных целиках; 3,5-4,0 МПа – в целиках из закладки).

8. Разработана методика расчета параметров камер полигональной формы, обеспечивающих равномерный характер распределения тангенциальных напряжений, высокую устойчивость обнажений стенок и кровли, а также снижение требуемой прочности искусственного массива, основанная на использовании современных теорий горного давления и учитывающая конструктивные особенности системы разработки.

9. Проведенные аналитические расчеты параметров систем разработки для условий рудника «Айхал» по методикам, учитывающим специфику геомеханических процессов при использовании камер полигональной (ромбовидной) формы: устойчивые пролеты вертикальных, горизонтальных и наклонных обнажений руд и закладки, нормативная прочность, размеры целиков, параметры камер и их соотношение показали хорошую сходимость с результатами моделирования методом конечных элементов и натурных наблюдений в процессе опытно-промышленных испытаний на руднике.

10. Разработана и реализована технология очистных работ при использовании камер полигональной формы, основанная на применении буровзрывных работ, механизированной доставки рудной массы самоходным оборудованием без присутствия людей в выработанном пространстве, закладки разнопрочными твердеющими смесями, что обеспечило формирова-

ние устойчивых ромбовидных камер проектной формы и размеров. Опытные промышленные испытания подтвердили возможность использования камерных систем.

11. Разработан алгоритм выбора и обоснования параметров камерных систем разработки, который позволяет на этапе проектирования принять оптимальный вариант отработки месторождений ценных руд, обеспечить безопасность горных работ и повысить эффективность использования недр с учетом горно-геологических условий месторождения.

12. Технология очистной выемки при освоении запасов неустойчивых руд с использованием ромбовидных камер с закладкой в период с 2015 по 2022 гг. в условиях рудника «Айхал» показала свою высокую эффективность. Себестоимость добычи при использовании камерных систем разработки снижается на 45 % по сравнению со слоевой системой разработки, принятой в проекте. Производительность блока при применении ромбовидных камер по сравнению со слоевой системой разработки увеличилась на 38 %, что позволило повысить годовую производственную мощность рудника с 500 до 650 тыс. тонн.

13. Разработан регламент для рудника «Мир-Глубокий», где предусмотрено применение системы разработки с выемкой ромбовидными камерами, высотой 40 м. Данный вариант системы разработки с учетом результатов внедрения на руднике «Айхал» принят техническим руководством АК «Алроса» для проектирования.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в:

Изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Дик, Ю.А. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с шахматным расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства /Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков //Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 41-45.

2. Котенков, А.В. Камерная система разработки с закладкой для выемки руды в сложных горно-геологических условиях /А.В. Котенков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 23-29.

3. Котенков, А.В. Опыт выемки запасов кимберлита ромбовидными камерами на руднике «Айхал» /А.В. Котенков //Горный журнал. – 2019. – № 9. – С. 9-14.

Монографиях

4. Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии. Монография /К.В. Булатов, Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, А.С. Кульминский, М.В. Тишков. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2022. – 600 с.

5. Практика опытно-промышленных испытаний технологии разработки рудных месторождений. Монография /Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, 2014. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2014. – 480 с.

6. Практика технического перевооружения процессов горного производства. Монография /Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, В.А. Лапин. – Верхняя Пышма: НЧОУ ВО «ТУ УГМК», 2022. – 512 с.

Патентах

7. Патент РФ на полезную модель № 2515285 U1. Способ разработки крутопадающих рудных тел с неустойчивыми рудами /Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, В.В. Минин, А.С. Кульминский, О.Ю. Арестов //Заявл. 02.04.2012, опубл. 10.05.2014, бюл. № 13.

Прочих изданиях

8. Денисова, Т.А. Проведение опытно-промышленных испытаний системы разработки ромбовидными камерами с увеличенными параметрами на руднике «Айхал» // Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр: труды международной научно-технической конференции / Т.А. Денисова, А.В. Котенков; под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – С. 154-155.

9. Технология камерной выемки руды в шахматном порядке с закладкой выработанного пространства (для условий отработки Айхальского месторождения АК «АЛРОСА») / Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков, А.А. Коваленко, А.С. Кульминский, О.Ю. Арестов // Глобус. Геология и бизнес. – 2013. – № 5 (29). – С. 42-45.

10. Дик, Ю.А. Совершенствование камерной системы разработки на Гайском подземном руднике / Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков // Глобус. Геология и бизнес. – 2013. – № 5 (29). – С. 56-64.

11. Котенков, А.В. Техническое перевооружение рудника «Айхал». Опыт отработки запасов камерными системами разработки / А.В. Котенков, Ю.А. Дик, О.Ю. Арестов // Ресурсосбережение и энергоэффективность: труды международной научно-технической конференции / под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – С. 72-75.

12. Котенков, А.В. Опыт внедрения камерных систем разработки на руднике «Айхал» / А.В. Котенков // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: тезисы докладов международной научно-технической конференции / под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – С. 21-23.