

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

Косырева Марина Александровна

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ЦЕЛИКОВ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ВЕРТИКАЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор РАН
Еременко Виталий Андреевич

Москва, 2024

Актуальность работы. Камерные системы в условиях разработки соляных месторождений подземным способом характеризуются высокой производительностью и полной механизацией за счет применения комбайнов при добыче и конвейеров при транспортировании полезного ископаемого. Основным недостатком данного класса систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства являются потери полезного ископаемого в целиках различного назначения, достигающие в междукамерных целиках (МКЦ) 60-80% и возрастающие с увеличением глубины разработки соляных месторождений.

При проведении научных исследований в 2019-2021 гг. при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-17-00034 «Формирование природно-технических систем разработки месторождений твердого минерального сырья на основе конвергентных технологий»), в которых участвовал автор, разработаны варианты камерной системы разработки, включающие отработку полезного ископаемого вертикальными камерами цилиндрической формы методом выбуривания (формирование сотовых горных конструкций), которые позволяют уменьшить потери соли в целиках с сохранением устойчивости разрабатываемого массива и исключить присутствие человека в очистном пространстве камер.

В настоящее время сотовые технологические конструкции применяются в авиастроении при конструировании крыльев самолетов и в судостроении при конструировании переборок кораблей для снижения массы и сохранения их несущих способностей к действующим нагрузкам. Функционально в природе так устроены кости млекопитающих и стебли злаковых культур.

Устойчивость сотовых конструкций достигается не за счет большого объема целиков, как это принято в камерно-целиковых системах разработки, а устойчивой круглой формой сотовых ячеек и наличием контакта и, соответственно, бокового распора между соседними целиками.

В связи с вышеизложенным можно заключить, что геомеханическое обоснование формы и размеров целиков при подземной разработке соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы, создаваемых в массиве методом выбуривания сотовых горных конструкций, является актуальной задачей.

Целью работы является уменьшение потерь полезного ископаемого за счет геомеханического обоснования формы и размеров целиков при подземной разработке соляных месторождений без снижения степени геодинамической безопасности.

Идея работы заключается в применении геомеханически обоснованных оптимальных параметров сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, обеспечивающих сохранение их устойчивости

и уменьшение потерь полезного ископаемого при подземной разработке соляных месторождений.

Основные задачи исследований:

1. Выполнить анализ горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ при подземной разработке соляных месторождений; существующих методов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) соляного массива в условиях применения камерных систем разработки; методов определения устойчивости подземных вертикальных выработок и камер круглого сечения, а также целиков различного назначения.

2. Провести теоретические исследования влияния формы, размеров и высоты целиков и вертикальных камер цилиндрической формы, направления и величин действующих главных напряжений в массиве, физико-механических свойств соли на устойчивость элементов сотовой горной конструкции и условий потери ими несущей способности.

3. На основе численного моделирования исследовать закономерности формирования вторичного поля напряжений в условиях применения сотовых горных конструкций, которые включают вертикальные камеры цилиндрической формы. Провести оценку смещений и избыточных напряжений, возникающих в конструктивных элементах исследуемых систем.

4. Провести геомеханическое обоснование формы и размеров целиков при подземной разработке соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

5. Подготовить рекомендации по применению сотовых горных конструкций для условий разработки соляного месторождения.

Методы исследований. При выполнении работы использовалась комплексная методика исследований, включающая анализ и обобщение научного и практического опыта применения камерных систем разработки и поддержания вертикальных выработок круглого сечения при освоении соляных месторождений; методы количественной и качественной геотехнической оценки состояния соляного массива, в том числе НДС; численное моделирование процессов формирования вторичного поля напряжений в условиях применения сотовых горных конструкций, разработка моделей; мониторинг смещений вмещающего соляного массива вертикальных выработок в натуральных условиях; математический и сравнительный анализ.

Объектом исследований являются массивы Илецкого месторождения каменной соли, Нивенского месторождения каменных, полиминеральных солей и полигалитов, Верхнекамское месторождение калийных и калийно-магниевых солей, Гремячинское месторождение калийных солей.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Выведены аналитические формулы для расчета минимальной и максимальной ширины МКЦ для квадратной и равносторонней треугольной сеток расположения

вертикальных камер цилиндрической формы, учитывающие глубину залегания целиков от земной поверхности, высоту и ширину целиков и камер, объемный вес каменной соли в целике и налегающей толще, предел прочности каменной соли в целике на сжатие.

2. Для условий Илецкого месторождения каменной соли установлены глубины (340-470 м) возможного применения сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, при различных соотношениях ширины целиков $a_{ц}$ и диаметров камер $b_{к} \leq 6$ м, при коэффициенте запаса прочности $KЗП \geq 1,5$ и обоснована возможность увеличения глубины разработки за счет увеличения ширины целика и уменьшения высоты этажа.

3. Установлено, что в условиях применения сотовых горных конструкций при одновременном увеличении ширины камеры и целика увеличивается несущая способность вмещающего массива и МКЦ, меньшая несущая способность закономерно регистрируется при меньшей ширине целика от 0,5 до 1,5 м при тех же значениях ширины камеры от 2 до 6 м с уменьшением потерь каменной соли.

Научная новизна:

1. Разработана методика аналитических расчетов определения устойчивости конструктивных элементов сотовых горных конструкций МКЦ и определены условия ограничения применения метода Л.Д. Шевякова для традиционных и новых систем разработки.

2. На основе гипотезы Турнера-Шевякова выведены аналитические формулы расчета минимальной и максимальной ширины МКЦ для условий подземной разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

3. Определены критические глубины применения сотовых горных конструкций для условий Илецкого месторождения каменной соли, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер, подтвержденные результатами численного моделирования.

4. Численными экспериментами установлены закономерности распределения разрушающих нагрузок, действующих на элементы сотовых горных конструкций, при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер.

5. На основе численного моделирования обоснованы параметры целиков для условий подземной разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны 3D модели сотовых горных конструкций, включающие вертикальные камеры цилиндрической формы с изменяющимися параметрами системы (форма и размеры целиков), которые могут быть использованы на практике при обосновании размеров конструктивных элементов систем разработки в конкретных горно-геологических условиях.

2. Разработана численная геомеханическая модель соляного массива, позволяющая изучать развитие вторичного поля напряжений в условиях применения сотовых горных конструкций.

3. Определены оптимальные параметры вертикальных камер цилиндрической формы и МКЦ, позволяющие сохранить устойчивость сотовой горной конструкции.

4. Выполнена привязка разработанных параметров вертикальных камер цилиндрической формы в составе сотовой горной конструкции к условиям разрабатываемого Илецкого месторождения каменной соли.

5. Результаты работы приняты в формате «Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли» на Соль-Илецком руднике ООО «Руссоль».

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается представительным объемом экспериментальных и численных исследований; применением современных методов оценки НДС массива горных пород, в т.ч. с использованием апробированной программы численного моделирования Midas; использованием в расчетах параметров качества соляного массива, его физико-механических свойств, полученных экспериментальными методами в условиях освоения месторождений каменных, полиминеральных, калийных, калийно-магниевых солей и полигалитов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на заседании Научного совета РАН по проблемам горных наук (Горный институт НИТУ «МИСИС», ИПКОН РАН, г. Москва, 2021 г.); международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Горный институт НИТУ «МИСИС», г. Москва, 2019-2024 гг.); Всероссийских конференциях с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (ИГД СО РАН, г. Новосибирск, 2017, 2021 гг.); IV Всероссийской конференции с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах» (Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, 2017 г.); Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена» (г. Новосибирск, ИГД СО РАН, 2019 г.); X Международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (г. Магнитогорск, РАН, РФФИ, ИПКОН РАН, МГТУ им. Г.И. Носова, 2019 г.); XI Международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр» (г. Магнитогорск, РАН, РФФИ, ИПКОН РАН, МГТУ им. Г.И. Носова, 2021 г.); 4 и 6 конференциях Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, ИПКОН РАН, 2020, 2024 гг.); 14 и 15 Международных научно-практических школах молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»

(г. Москва, ИПКОН РАН, 2019, 2020 гг.); XI научной конференции «Агошковские чтения» (ЗабГК, г. Чита, 2018 г.).

Личный вклад автора состоит:

- в постановке задач исследований;
- в выявлении на основе анализа и обобщения существующих методов основных горно-геологических и горнотехнических факторов, влияющих на формирование во вмещающем массиве вторичного поля напряжений в условиях применения камерных систем разработки и сотовых горных конструкций;
- в разработке 3D моделей сотовых горных конструкций, вмещающих вертикальные камеры цилиндрической формы;
- в исследовании закономерностей формирования вторичного поля напряжений в условиях применения сотовых горных конструкций, количественной оценке смещений и напряжений, возникающих в конструктивных элементах исследуемых систем;
- в геомеханическом обосновании применения камер цилиндрической формы при подземной разработке соляных месторождений и определении их оптимальных параметров, позволяющих сохранить устойчивость сотовой горной конструкции.

Публикации. Результаты научных исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 12 работах, в том числе в 2 изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, и в 9 изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и WoS.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 87 наименований и 3 приложений, изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 15 таблиц.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., проф. РАН Еременко В.А., главному научному сотруднику ИПКОН РАН, д.т.н., проф. Галченко Ю.П., сотрудникам кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института НИТУ МИСИС д.ф.-м.н., доц. Винникову В.А., д.т.н., проф. Вознесенскому А.С. и к.т.н., доц. Пугачу А.С., техническому директору ООО «Руссоль» Грамме Р.В. и директору Соль-Илецкого рудника Дружкину Д.В. за помощь в проведении исследований, полезные советы и конструктивные замечания, высказанные при обсуждении результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения Илецкого месторождения каменной соли, Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей, Гремячинского месторождения калийных солей и Нивенского месторождения каменных, полиминеральных солей и полигалитов подземным способом, методов аналитического расчета и оценки устойчивости конструктивных элементов камерной системы разработки с оставлением МКЦ.

В условиях применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ важным вопросом является определение их безопасных параметров, позволяющих в процессе ведения горных работ сохранять устойчивость горнотехнических систем. Большой вклад в разработку и развитие методов расчетов устойчивых параметров целиков различного назначения и оценки НДС вмещающего массива конструктивных элементов камерных систем разработки внесли: М.М. Протодьяконов, Л.-М. Турнер, Л.Д. Шевяков, С.Г. Авершин, В.Д. Слесарев, П.М. Цимбаревич, Н.И. Мухелишвили, К.В. Руппенейт, В.И. Борщ-Компониец, М.А. Иофис, Л.-Е. Грюнер, Ж.-Н. Х. Гупиер, К. Кегель, М. Стаматиу и многие другие ученые.

Для рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений представлены восемь вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ и оценка НДС представленных вариантами горнотехнических систем с использованием численного метода 3D моделирования.

Сравнение результатов численного анализа показало, что применение вариантов отработки панелей системой без оставления опорных разгрузочных целиков ОРЦ с точки зрения устойчивости горнотехнической системы незначительно уступает варианту с их оставлением в схожих горно-геологических условиях. При этом уменьшаются потери полезного ископаемого в условиях применения варианта без оставления ОРЦ.

Сравнение вариантов с оставлением внутрипластовых горизонтальных целиков и без них показало, что МКЦ (коэффициент запаса прочности $K_{ЗП} \geq 1,5$) устойчивы только при наличии внутрипластового горизонтального целика.

При этом применение любого из восьми вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ характеризуется высокими эксплуатационными потерями балансовых запасов в МКЦ, которые возрастают с глубиной.

Все вышеуказанное в Главе 1 позволяет определить основные задачи исследований.

Во второй главе выполнены аналитические расчеты основных параметров конструктивных элементов и оценка устойчивости камерной системы разработки с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

В работе рассматриваются два конструктивных варианта системы разработки, включающих сотовую горную конструкцию: 1 – при условии отработки вертикальных камер цилиндрической формы снизу вверх с применением механизированных комплексов (рисунок 1); 2 – при условии отработки вертикальных камер цилиндрической формы сверху вниз механизированным устройством, расширяющим пилотную скважину и перепуском через нее полезного ископаемого.

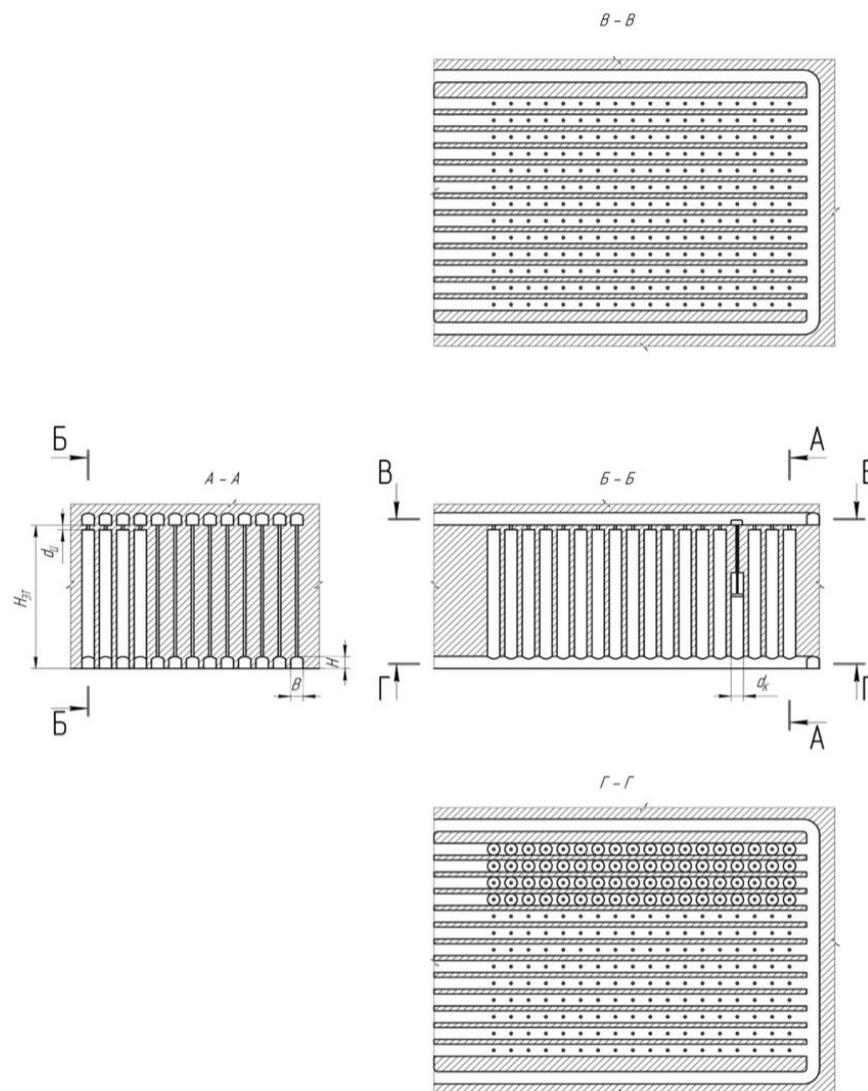


Рисунок 1 – Вариант системы разработки с использованием сотовых горных конструкций и отработкой камер снизу вверх с применением механизированных комплексов для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли.
 $H_{эт}$ – высота этажа; B – ширина горизонтальных подготовительных выработок; H – высота горизонтальных подготовительных выработок; d_k – диаметр камеры цилиндрической формы; $d_ц$ – высота потолочного целика камеры.

Для расчетов устойчивости МКЦ за основу принята гипотеза Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и вертикальных камер цилиндрической формы.

Гипотеза Л.-М. Турнера заключается в следующем: сила давления на регулярно расположенные целики определяется весом столба налегающей толщи пород от кровли МКЦ до земной поверхности, опирающейся на площадь пород, поддерживаемых целиками:

$$P = SH\gamma, \text{ Н} \tag{1}$$

где S – горизонтальная площадь поверхности налегающей толщи пород, оказывающей давление на целики (целик) и поддерживаемая целиками (целиком), м^2 ; H – глубина

залегания целиков от земной поверхности, м; γ – средневзвешенный удельный вес налегающей толщи пород над целиками, Н/м³.

Л.Д. Шевяковым в основе метода расчета параметров МКЦ определены следующие положения: наибольшая нагрузка на опорные целики осуществляется весом толщи пород до земной поверхности; вертикальные напряжения сжатия в горизонтальных сечениях целиков распределены равномерно и для оценки прочности целиков используются величины предела прочности, полученные экспериментально в лабораторных условиях при сжатии. Такой подход приемлем для залежей, протяженность наименьшего размера которых больше глубины горных работ. В противном случае, когда протяженность меньше глубины горных работ, давление на МКЦ может быть значительно меньше чем давление веса налегающей толщи пород.

При этом для обеспечения устойчивости необходимо выполнение условия:

$$P \leq F_{сж}^{пред} - F_{ц}^{сопр}, \text{ Н} \quad (2)$$

где $F_{сж}^{пред}$ – сила предельного сжатия ($F_{сж}^{пред} = s_{ц}R_{ц}$), Н; $F_{ц}^{сопр}$ – сила сопротивления, действующая со стороны целика ($F_{ц}^{сопр} = s_{ц}h_{ц}\gamma_{ц}$), Н; $s_{ц}$ – площадь горизонтального сечения целика, м²; $h_{ц}$ – высота целика, м; $\gamma_{ц}$ – удельный вес породы в целике, Н/м³; $R_{ц}$ – предел прочности породы целика на сжатие, Н/м².

Целики работают в условиях одноосного сжатия. Фактическую неравномерность напряжений учитывают путем введения коэффициента запаса прочности целика n (КЗП).

С учетом коэффициента запаса прочности целика n из выражения (2) получим:

$$SH\gamma + s_{ц}h_{ц}\gamma_{ц} \leq s_{ц}R_{ц} \frac{1}{n} \quad (3)$$

Преобразовав выражение (3), получим:

$$\frac{S}{s_{ц}} \leq \frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma}. \quad (4)$$

В работе рассмотрены различные варианты традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и вертикальных камер цилиндрической формы (рисунок 2).

Разработана методика аналитических расчетов для определения устойчивости конструктивных элементов сотовых горных конструкций МКЦ и определены условия ограниченности применения метода Л.Д. Шевякова для традиционных и новых систем разработки.

Выведены аналитические формулы расчета минимальной ширины МКЦ (Варианты 1-4) для горнотехнических условий Соль-Илецкого рудника и физико-механических свойств каменной соли Илецкого месторождения (рисунки 2а, б, в, г).

Вариант 1. Для столбчатых целиков, ограниченных камерами размерами $h_k \times d_k \times b_k$ (высота \times длина \times ширина камеры), ширину целика $a_{ц}$ при его длине $d_{ц}$ определяют через преобразования выражения, получаемого из геометрических соображений (рисунок 2а):

$$\frac{S}{s_{ц}} = \frac{(b_k + a_{ц})(d_k + d_{ц})}{a_{ц}d_{ц}} = \frac{b_k d_k + b_k d_{ц} + a_{ц}d_k + a_{ц}d_{ц}}{a_{ц}d_{ц}} = \frac{b_k d_k}{a_{ц}d_{ц}} + \frac{b_k}{a_{ц}} + \frac{d_k}{d_{ц}} + 1. \quad (5)$$

С учетом выражения (5), условие (4) перепишем следующим образом:

$$\frac{b_k d_k}{a_{ц} d_{ц}} + \frac{b_k}{a_{ц}} + \frac{d_k}{d_{ц}} + 1 \leq \frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma};$$

откуда:

$$a_{ц} \geq \frac{\frac{b_k d_k}{d_{ц}} + b_k}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \frac{d_k}{d_{ц}} - 1}, \text{ м.} \quad (6)$$

Таким образом, с учетом коэффициента запаса прочности целика его минимальная ширина составит:

$$a_{ц} = \frac{b_k + \frac{b_k \cdot d_k}{d_{ц}}}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \frac{d_k}{d_{ц}} - 1}, \text{ м.} \quad (7)$$

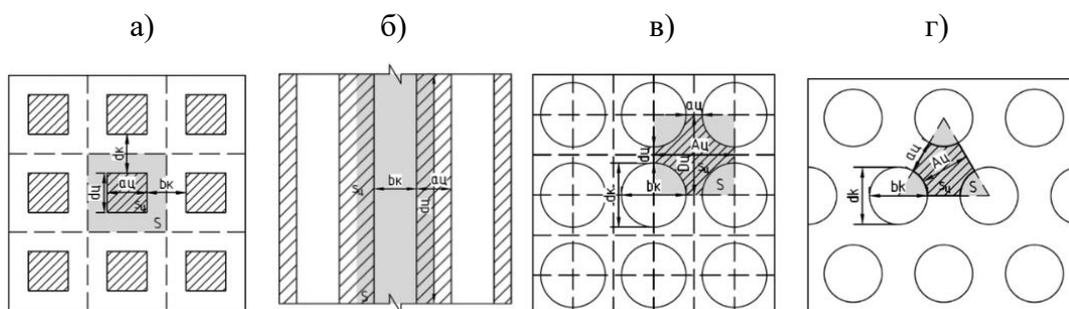


Рисунок 2 – Технологические схемы камерной системы разработки с оставлением столбчатых МКЦ (а), ленточных МКЦ (б) и МКЦ в условиях применения сотовых горных конструкций с квадратной (в) и равносторонней треугольной (г) сетками расположения вертикальных камер цилиндрической формы. b_k – ширина камеры (для сотовых конструкций диаметр камеры, $b_k = d_k$); d_k – длина камеры (для сотовых конструкций диаметр камеры, $d_k = b_k$); $a_{ц}$ – ширина целика (для сотовых конструкций минимальная ширина целика $a_{ц}$, максимальная ширина целика $A_{ц}$); $d_{ц}$ – длина целика (для сотовых конструкций минимальная длина целика $d_{ц}$, максимальная длина целика $D_{ц}$) (для сотовых конструкций $a_{ц} = d_{ц}$; $A_{ц} = D_{ц}$).

Вариант 2. Для ленточных целиков ($d_{ц} \rightarrow \infty$) выражение (7) приобретает вид (рисунок 2б):

$$a_{ц} = \frac{b_k}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}, \text{ м.} \quad (8)$$

Выведены аналитические формулы расчета минимальной $a_{ц}$ и максимальной $A_{ц}$ ширины МКЦ (Вариант 3) квадратной и треугольной сетками расположения вертикальных камер цилиндрической формы для условий применения сотовых горных конструкций на Соль-Илецком руднике и физико-механических свойств каменной соли Илецкого месторождения с коэффициентом запаса прочности $n=1, 2$ и 3 для глубины ведения горных работ 250, 400, 600 и 1000 м (рисунок 2в и г).

Определено допустимое значение коэффициента запаса прочности n МКЦ с определенным диапазоном, ограниченное расчетной формулой.

Вариант 3. Для варианта системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы с квадратной сеткой их расположения (рисунок 2в) по аналогии с вышеприведенными расчетами по формуле (5) при условии, когда $a_{ц} \neq d_{ц}$, получаем:

$$\frac{S}{S_{ц}} = \frac{S}{S - \pi \frac{b_{к}^2}{4}} = \frac{(b_{к} + a_{ц})(b_{к} + d_{ц})}{(b_{к} + a_{ц})(b_{к} + d_{ц}) - \pi \frac{b_{к}^2}{4}}, \quad (9)$$

откуда:

$$a_{ц} \geq \frac{\pi b_{к}^2}{4 \left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}} \right) (b_{к} + d_{ц})} - b_{к}, \text{ м.} \quad (10)$$

При равной периодичности расположения камер ($a_{ц} = d_{ц}$) неравенство (10) приобретает вид:

$$a_{ц}^2 + 2a_{ц}b_{к} \geq \left(\frac{\pi}{4 \left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}} \right)} - 1 \right) b_{к}^2. \quad (11)$$

Решаем полученное неравенство:

$$a_{ц} \geq -b_{к} + b_{к} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{4 \left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}} \right)} - 1 \right)}, \text{ м.} \quad (12)$$

Таким образом, с учетом коэффициента запаса прочности в рассматриваемом варианте системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы минимальная ширина целика составит:

$$a_{ц} = -b_{к} + b_{к} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{4 \left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}} \right)} - 1 \right)}, \text{ м.} \quad (13)$$

Если выражать размер целика не через минимальную $a_{ц}$, а максимальную его ширину $A_{ц}$, то:

$$A_{ц} = \sqrt{\frac{\pi b_{к}^2 \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right)}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}}, \text{ м.} \quad (14)$$

Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с различными конструктивными элементами выемочного участка по **Варианту 3** для рассматриваемых условий Соль-Илецкого рудника представлены в таблице 1 (рисунок 2в). Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ по **Варианту 3** представлены в таблице 2 (рисунок 2в).

Все вышеуказанное в Главе 2 позволяет обосновать первое научное положение.

Третья глава посвящена численному моделированию НДС сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы.

Для расчетов и анализа использовался программный комплекс Midas, встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, а также анализа и визуализации горного давления и деформаций на контуре выработок и в целиках при различных критериях нарушенности массива горных пород.

Критериями для оценки устойчивости выработок и МКЦ применялись: напряжение σ_{max} (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности вмещающего массива и целиков КЗП, а также смещение массива X.

В качестве выемочной единицы/участка месторождения выбран блок массива каменной соли кубической формы размером D_n (длина) \times B_n (ширина) \times H_n (высота этажа) = 60 \times 60 \times 60 м (таблица 1). Высота блока и диаметры камер выбраны с учетом эффективной возможности применяемого бурового оборудования на выбранную высоту блока как высоту двух сдвоенных этажей по 30 м. Геометрические параметры численных моделей и их конструктивных элементов с соотношением площадей пустот (вертикальных камер) и массива каменной соли представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Параметры численного моделирования

Параметр	Единицы измерения	Параметры модели, конструктивных элементов и условия моделирования
Высота блока	м	60
Ширина блока	м	60
Длина блока	м	60
Варианты сетки расположения камер	-	Квадратная
Высота камеры в блоке	м	60
Вариант исходного поля напряжений	-	Гидростатический ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$)
Варианты рассматриваемых глубин горных работ от земной поверхности	м	250÷310 м 400÷460 м 600÷660 м 1000÷1060 м

В качестве примера на рисунке 3 представлены результаты численных расчетов КЗП вмещающего массива вертикальные камеры цилиндрической формы и МКЦ в сотовом исполнении горной конструкции на завершающей расчетной стадии на глубине 400 м. Вмещающий массив каменной соли на глубине 400 м находится в устойчивом состоянии $KЗП > 1$, что подтверждается высокой степенью достоверности исходных входных параметров в численную модель, потому что массив гомогенный, однородный, физико-механические свойства с глубиной изменяются незначительно, регистрируется литостатическое исходное поле напряжений.

В диссертационной работе представлены диапазоны изменения количественных значений критериев численной оценки НДС сотовых горных конструкций по моделям 1-10 для рассматриваемых глубин 250÷310, 400÷460, 600÷660 и 1000÷1060 м. Выбирая консервативный подход при проектировании горнотехнической системы рудника учитывается тот критерий оценки, который позволяет определить наилучшие варианты устойчивости системы исключая все возможные варианты ее неустойчивости.

Проектирование параметров горнотехнических систем необходимо проводить по результатам численного моделирования с высокой степенью достоверности входных параметров в модель при условии, что $KЗП \geq 1,5$. Разработан график (рисунок 4), который позволяет определить критические глубины 340-470 м применения рассматриваемых в работе сотовых горных конструкций для условий Илецкого месторождения каменной соли, включающих МКЦ и вертикальные камеры цилиндрической формы с $KЗП \geq 1,5$ при различных соотношениях минимальной ширины целиков $a_{ц}$ и диаметров камер $b_{к}$: $a_{ц} = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3$ м соответствует $b_{к} = 2; 3; 2$ и $4; 5; 3$ и $6; 4; 5; 6$ м, с возможностью увеличения глубины разработки за счет увеличения ширины целика и уменьшения высоты этажа.

В работе исследовалось НДС 10 численных моделей с шириной камер 2, 3, 4, 5 и 6 м и размерами МКЦ в два и в четыре раза меньшими чем ширина камеры (таблица 2). Установлена закономерность распределения устойчивости численных моделей к действующим нагрузкам, представленная в таблице 4 и на рисунке 5: с увеличением ширины камеры $b_{к}$ при минимальной ширине целика $a_{ц}$ в два раза меньшей чем ширина камеры увеличивается несущая способность вмещающего массива и МКЦ, а также при уменьшении ширины целика с двух до четырех раз по сравнению с шириной камеры несущая способность уменьшается. При этом закономерно регистрируется при меньшей ширине целика меньшие значения несущей способности моделей.

Выбирая консервативный подход при проектировании горнотехнической системы рудника с применением сотовой горной конструкции, учитывается тот критерий оценки, который позволяет определить наилучшие варианты устойчивости системы, исключая все возможные варианты ее неустойчивости.

Все вышеуказанное в Главе 3 позволяет обосновать второе и третье научные положения.

Таблица 2 – Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с различными конструктивными элементами выемочного участка по **Варианту 3** для условий Соль-Илецкого рудника (размер модели (выемочной единицы, блока) 60×60×60 м) (рисунок 2в)

№ модели	Объем модели, м ³	Горизонтальная площадь модели, м ²	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Минимальная ширина a_c (длина d_c)/максимальная ширина A_c (длина D_c) целика, м	Количество камер в модели/в ряду, шт.	Горизонтальная площадь пустот (камер) в модели ($S_{\Sigma km}$), м ²	Горизонтальная площадь массива каменной соли в целиках модели ($S_{\Sigma cm}$), м ²	Ширина ооконтуривающего целика, м	Эксплуатационные потери в целиках (P_{cm}), %
1	216000	3600	2	0,5/2,5	529/23	1661,06	1702,94	1,5	50,62
2			2	1/3	361/19	1133,54	2230,46	2	66,30
3			3	0,75/3,75	225/15	1589,625	1659,375	2,25	51,07
4			3	1,5/4,5	169/13	1193,985	2406,015	1,5	66,83
5			4	1/5	121/11	1519,760	1616,24	3	51,54
6			4	2/6	81/9	1017,360	2118,64	4	67,56
7			5	1,25/6,25	81/9	1589,625	1716,625	2,5	51,92
8			5	2,5/7,5	49/7	961,625	2063,375	5	68,21
9			6	1,5/7,5	49/7	1384,740	1531,26	4,5	52,51
10			6	3/9	36/6	1017,360	2231,64	4,5	68,69

Таблица 3 – Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ $a_{ц}$ по **Варианту 3** для условий Соль-Илецкого рудника (рисунок 2в)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности Н, м	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Минимальная ширина $a_{ц}$ (длина $d_{ц}$) целика, м	Высота целика $h_{ц}$, м	Расчетная минимальная ширина целика $a_{ц}$, м		
					n=1	n=2	n=3
1	250	2	0,5	60	-0,069*	0,163	0,541
2		2	1		-0,069*	0,163	0,541
3		3	0,75		-0,103*	0,245	0,811
4		3	1,5		-0,103*	0,245	0,811
5		4	1		-0,137*	0,326	1,082
6		4	2		-0,137*	0,326	1,082
7		5	1,25		-0,172*	0,408	1,352
8		5	2,5		-0,172*	0,408	1,352
9		6	1,5		-0,206*	0,489	1,623
10		6	3		-0,206*	0,489	1,623
*Отрицательные значения «-» минимальной ширины целиков $a_{ц}$, рассчитываются при условии наложения камер друг на друга при тонкой их ширине							
1	400	2	0,5	60	0,050	0,575	2,198
2		2	1		0,050	0,575	2,198
3		3	0,75		0,076	0,862	3,298
4		3	1,5		0,076	0,862	3,298
5		4	1		0,101	1,149	4,397
6		4	2		0,101	1,149	4,397
7		5	1,25		0,126	1,436	5,496
8		5	2,5		0,126	1,436	5,496
9		6	1,5		0,151	1,724	6,595
10		6	3		0,151	1,724	6,595
1	600	2	0,5	60	0,250	1,861	С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0 \div 2.4$
2		2	1		0,250	1,861	
3		3	0,75		0,375	2,792	
4		3	1,5		0,375	2,792	
5		4	1		0,500	3,723	
6		4	2		0,500	3,723	
7		5	1,25		0,625	4,654	
8		5	2,5		0,625	4,654	
9		6	1,5		0,750	5,584	
10		6	3		0,750	5,584	
1	1000	2	0,5	60	0,925	С глубины $H=1000$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0 \div 1.5$	
2		2	1		0,925		
3		3	0,75		1,387		
4		3	1,5		1,387		
5		4	1		1,849		
6		4	2		1,849		
7		5	1,25		2,311		
8		5	2,5		2,311		
9		6	1,5		2,774		
10		6	3		2,774		

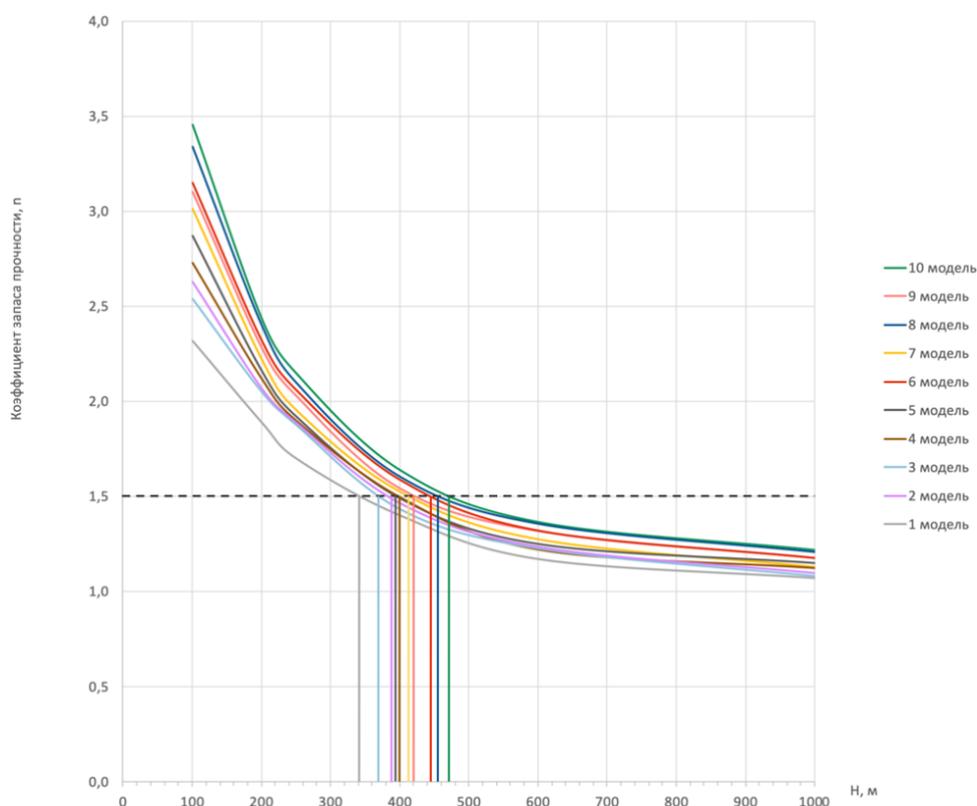


Рисунок 4 – График изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимая глубина применения моделей №№1-10. $KЗП \geq 1,5$ – допустимый предел проектирования горнотехнических систем с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель.

Таблица 4 – Рейтинг численных моделей по устойчивости при различных соотношениях ширины камер и целиков

№ модели	Нагрузка на модель P_H ($n \geq 1,5$), кН/м ²	Рейтинг модели по устойчивости от 1 (максимально устойчивый) до 10 (минимально устойчивый)	Ширина камеры b_k , м	Минимальная ширина целика $a_{ц}$, м
1	10500	10	2	0,5
2	12200	8	2	1
3	13100	9	3	0,75
4	13500	7	3	1,5
5	14200	6	4	1
6	16100	3	4	2
7	15000	5	5	1,25
8	16900	2	5	2,5
9	16000	4	6	1,5
10	17200	1	6	3

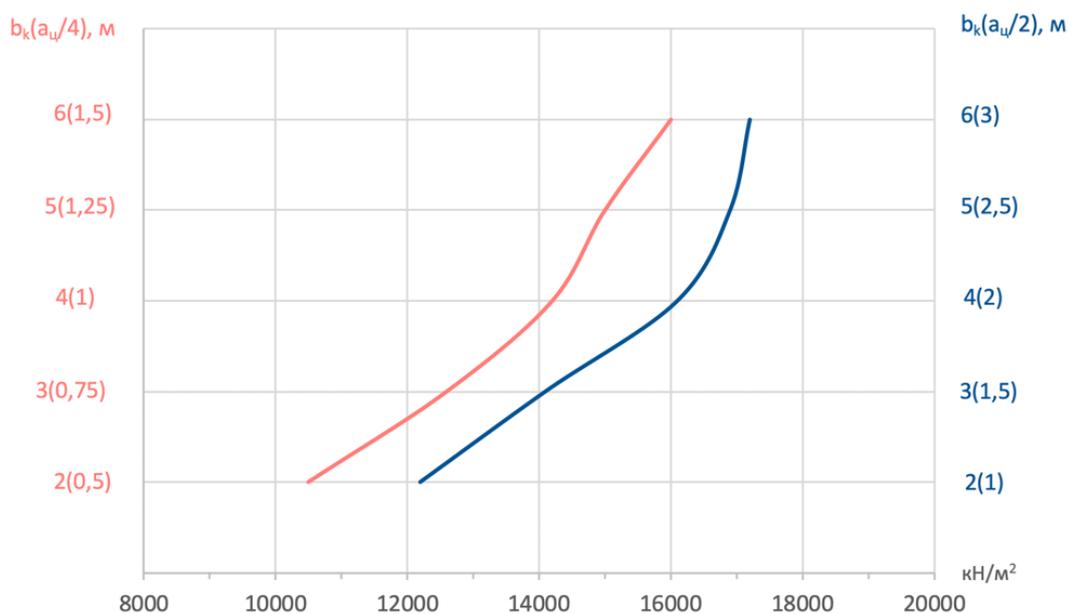


Рисунок 5 – Изменение действующих нагрузок на численную модель при $n \geq 1,5$ (P_n , кН/м²) при изменении ширины камер b_k и целиков $a_{ц}$. Синяя кривая – при ширине целика в два раза меньшей чем ширина камеры; Красная кривая – при ширине целика в четыре раза меньшей чем ширина камеры.

В четвертой главе представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций с геомеханически обоснованными в диссертационной работе параметрами в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли (рисунок 6). Планируется на первой стадии проведение опытно-промышленных испытаний и в дальнейшем извлечение запасов нефункциональных целиков, расположенных на Восточном фланге Илецкого месторождения каменной соли в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности. Рекомендуется также извлекать запасы ниже гор. -270 м мощностью 60 м (отм. $-300 \div -360$ м, глубина 418-478 м) с оставлением ниже гор. -270 м междуэтажного целика мощностью 30 м и запасы, расположенные в подошве ВЗТ мощностью 30 м в отм. $-80 \div -110$ м на глубине 198-228 м от земной поверхности с оставлением выше гор. -132 м междуэтажного целика мощностью 20 м.

Сравнение результатов, полученных с применением разработанной методики аналитических расчетов, представленными в Главе 2, с результатами численного моделирования, представленными в Главе 3, позволило определить минимальную устойчивую ширину МКЦ при определенном коэффициенте запаса прочности n для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли на различных глубинах от земной поверхности.

Численные расчеты являются представительными, так как степень достоверности входных параметров в модель весьма высокая, аналитические расчеты носят теоретический характер, но принимая консервативных подход необходимо уточнить устойчивые параметры системы в процессе проведения опытно-промышленных испытаний в шахтных условиях.

На основе разработанного графика изменения коэффициента запаса прочности целиков в таблице 5 представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций.

В условиях применения сотовой горной конструкции потери полезного ископаемого изменяются в диапазоне 50,62÷68,69% с оставлением оконтуривающего блок целика шириной 1,5-4,5 м (таблица 2). Оконтуривающий целик значительно увеличивает эксплуатационные потери полезного ископаемого при отработке очистного блока размером 60×60×60 м в диапазоне 9,75÷27,75% и был принят в расчет по аналогии с камерной системой разработки с оставлением МКЦ и ОРЦ. В действительности предлагаемая сотовая горная конструкция не предполагает оставление оконтуривающих целиков. Границы между очистными блоками условные. Отработка соляного купола планируется сплошным фронтом, от центра к флангам, до границ барьерного целика.

Применение сотовых горных конструкций (модели №№1-10) в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли позволяет извлечь 8,6÷13,8 тыс. т запасов каменной соли, расположенных на Восточном фланге в отметках эксплуатируемых этажей –132÷–270 м; 48,1÷76,8 млн. т запасов расположенных ниже гор. –270 м мощностью 60 м (отм. –300÷–360 м) и 24÷38,4 млн. т запасов расположенных в подошве ВЗТ мощностью 30 м в отм. –80÷–110 м.

Таблица 5 – Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

№ модели	Ширина камеры b_k , м	Минимальная ширина целика $a_{ц}$, м	Критическая глубина применения Н, м	Участок шахтного поля
1	2	0,5	341	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–215 м на глубине 250-333 м от земной поверхности; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
2	2	1	387	
3	3	0,75	368	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–270 м на глубине 250-388 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
4	3	1,5	400	
5	4	1	393	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–270 м на глубине 250-388 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
6	4	2	442	
7	5	1,25	415	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–270 м на глубине 250-388 м; запасы ниже гор. –270 м в отм. –300÷–340м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–
8	5	2,5	458	

				110 м на глубине 198-228 м
9	6	1,5	420	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–270 м на глубине 250-388 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
10	6	3	474	Запасы на Восточном фланге в отм. этажей –132÷–270 м на глубине 250-388 м; запасы ниже гор. –270 м в отм. – 300÷–340м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м

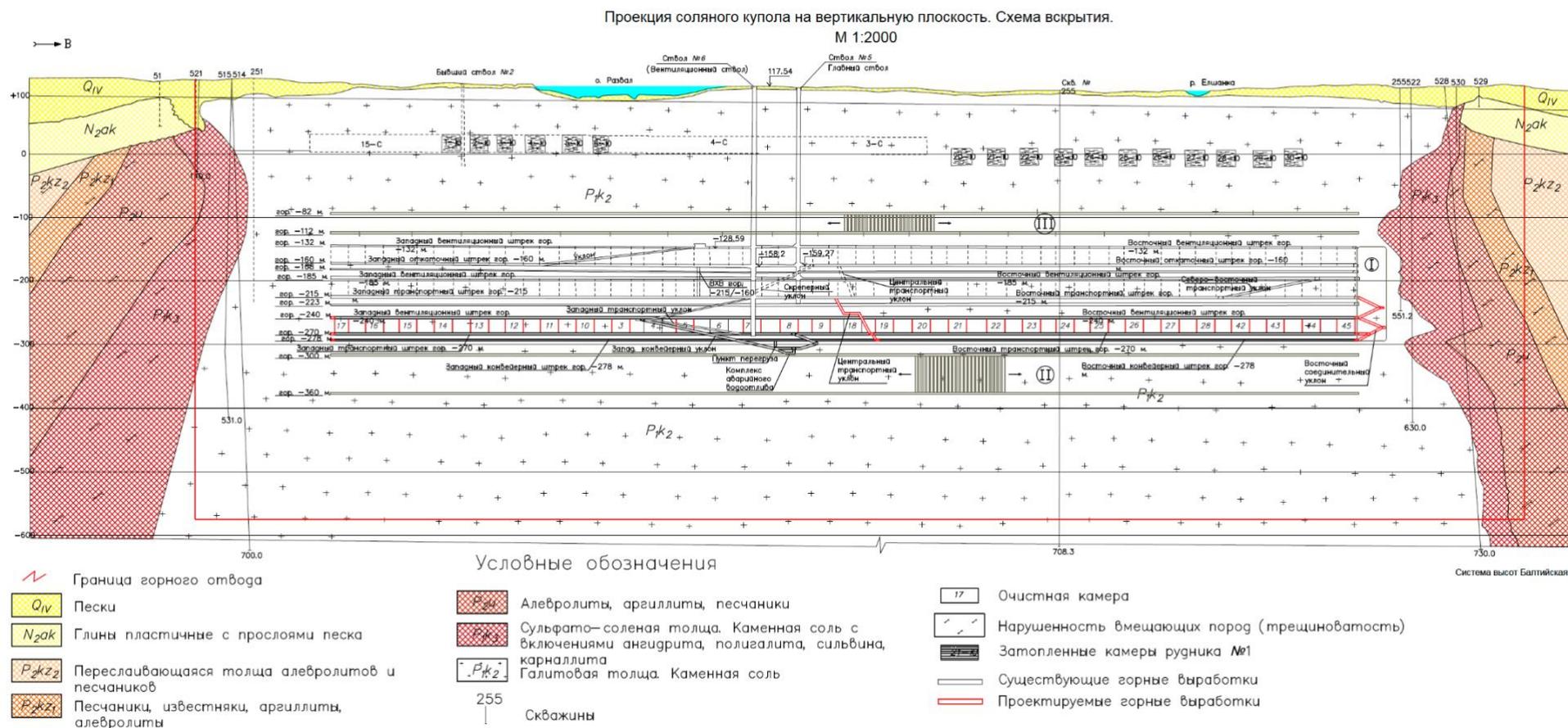


Рисунок 6 – Схема вскрытия Илецкого месторождения каменной соли. I – нефункциональные целики на Восточном фланге Илецкого месторождения каменной соли в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности; II – запасы ниже гор. -270 м мощностью 60 м (отм. $-300 \div -360$ м, глубина 418-478 м) с оставлением ниже гор. -270 м междуэтажного целика мощностью 30 м; III – запасы расположенные в подошве ВЗТ мощностью 30 м в отм. $-80 \div -110$ м на глубине 198-228 м от земной поверхности с оставлением выше гор. -132 м междуэтажного целика мощностью 20 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи геомеханического обоснования оптимальных параметров сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы и обеспечивающих уменьшение потерь полезного ископаемого при подземной разработке соляных месторождений, что имеет важное значение для развития горной геомеханики, а также повышения эффективности и безопасности горного производства.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. На основе анализа горно-геологических и горнотехнических условий освоения месторождений каменных, полиминеральных, калийных, калийно-магниевых солей и полигалитов подземным способом выполнены геомеханическое сравнение вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ и оценка НДС горнотехнических систем с использованием численного метода 3D моделирования.

2. На основе гипотезы Турнера-Шевякова для конструктивного варианта камерной системы разработки с оставлением МКЦ с квадратной и равносторонней треугольной сетками расположения вертикальных камер цилиндрической формы для условий применения сотовых горных конструкций выведены аналитические формулы расчета минимальной и максимальной ширины МКЦ.

3. Разработана численная геомеханическая модель соляного массива, позволившая изучить развитие вторичного поля напряжений в условиях применения сотовых горных конструкций.

4. Разработаны 3D численные модели сотовых горных конструкций, вмещающие вертикальные камеры цилиндрической формы с изменяющимися параметрами системы (форма и размеры целиков).

5. Установлены критические глубины применения сотовых горных конструкций для условий Илецкого месторождения каменной соли, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер.

6. Выявлены закономерности распределения разрушающих нагрузок, действующих на численные модели сотовых горных конструкций при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер.

7. На основе численного моделирования обоснованы параметры целиков для условий подземной разработки Илецкого месторождения каменной соли вертикальными камерами цилиндрической формы.

8. Разработаны «Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли».

Полученные результаты показывают перспективность применения сотовых горных конструкций в условиях подземной разработки месторождений каменных, полиминеральных,

калийных, калийно-магниевых солей и полигалитов с обеспечением безопасности ведения горных работ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. Еременко В.А., Галченко Ю.П., Косырева М.А. Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 98-109.
2. Еременко В.А., Винников В.А., Пугач А.С., Косырева М.А. Обоснование размеров междукамерных целиков при разработке соляных месторождений вертикальными очистными камерами цилиндрической формы // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 29-38.

В изданиях, индексируемых наукометрических базах Scopus и WoS:

1. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Vysotin N.G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining // Eurasian Mining, 2020, No. 1, pp. 9-13.
2. Eremenko V.A., Galchenko Yu.P., Vysotin N.G., M.A. Kosyreva M.A. and Yakusheva E.D. Substantiation of convergent technology data for the Ilets rock salt mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science № 523 (2020) 012030.
3. Еременко В.А., Косырева М.А., Высотин Н.Г., Хажыылай Ч.В. Геомеханическое обоснование параметров отработки месторождений каменных и полиминеральных солей, полигалитов по камерным системам // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 37-43.
4. Ch.V. Khazhyulai, M.A. Kosyreva, V.A. Eremenko, A.R. Umarov. Stope stability assessment by the Mathews–Potvin method: a case-study of open stoping in salt rock mass under conditions of secondary stress field // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science № 684 (2021) 012011.
5. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A., Vysotin N.G., Kosyreva M.A. Justification of functional organization and contents of modeling cluster concept for geomechanical research of convergent mining technologies. Eurasian Mining, 2021, No. 2, pp. 11-17.
6. V.A. Eremenko, V.A. Vinnikov, A.S. Pugach, M.A. Kosyreva. Substantiation of rib pillar sizes for rock salt mining in vertical cylindrical stopes arranged at the nodes of regular triangular pattern. Eurasian mining, 2023, No. 2, pp. 56-62.
7. M.A. Kosyreva, V.A. Eremenko Numerical stress–strain modeling of honeycomb mine structures with vertical stopes of cylindrical form. Eurasian mining, 2024, No. 1, pp. 36-39.

В прочих изданиях:

1. Еременко В.А., Косырева М.А. Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли // Научный вестник Арктики. – 2017. – № 2 (2). – С. 5-18.
2. Косырева М.А., Еременко В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния каркасной системы подземного рудника для условий самообрушения руды. Материалы 14 Международной молодежной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы

освоения недр в XXI веке глазами молодых». 28 октября-1 ноября 2019 г. – Москва: ИПКОН РАН, 2019. – С. 60-63.

3. Еременко В.А., Галченко Ю.П., Мясков А.В., Косырева М.А. Исследование напряженного состояния массива при использовании конвергентной горной технологии // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2019. – Т. 6. – № 2. – С. 78-85.