

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор РАН
Еременко Виталий Андреевич

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
Введение	7
Глава 1. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений России подземным способом. Геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния массива при применении существующих вариантов систем разработки.	13
1.1 Анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений России подземным способом	13
1.1.1 Илецкое месторождение каменной соли	13
1.1.2 Верхнекамское месторождение калийных и калийно-магниевых солей.....	17
1.1.3 Гремячинское месторождение калийных солей.....	21
1.1.4 Нивенское месторождение каменных, полиминеральных солей и полигалитов	22
1.2 Геомеханическое обоснование вариантов отработки соляных месторождений камерными системами разработки.....	24
1.2.1 Существующие варианты отработки соляных месторождений камерными системами разработки.....	24
1.2.2 Геомеханический анализ НДС массива при применении существующих вариантов систем отработки	30
Выводы по первой главе	33
Глава 2. Расчет основных параметров конструктивных элементов и оценка устойчивости камерной системы разработки с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы	34
2.1 Использование гипотезы Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением междукамерных целиков и с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы. Методы аналитических расчетов.....	34
2.1.1 Методика аналитических расчетов.....	38
2.1.2 Результаты расчетов.....	44
Выводы по второй главе.....	61
Глава 3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы	63
3.1 Численное моделирование при изучении вопросов горного давления	63
3.2 Варианты конструктивного исполнения численных моделей	68

3.3 Результаты численного моделирования	69
Выводы по третьей главе	82
Глава 4. Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли	84
4.1 Условия разработки Илецкого месторождения каменной соли.....	84
4.2 Сравнение результатов, полученных с применением разработанной методики аналитических расчетов, с результатами численного моделирования.....	88
4.3 Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли	96
Выводы по четвертой главе	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	163

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- МКЦ – междукамерный целик
- БРЦ – барьерный разгрузочный целик
- ОРЦ – опорный разгрузочный целик
- МЭЦ – междуэтажный целик
- ВЗТ – водозащитная толща
- НДС – напряженно-деформированное состояние
- КЗП – коэффициент запаса прочности
- SFA, SF – английская программная версия аббревиатуры КЗП
- МДЭ – метод дискретных элементов
- МГЭ – метод граничных элементов
- МКЭ – метод конечных элементов
- UDEС, 3DEC, PFC, EDEM, FLAC, Abaqus ELFIN, Plaxis, Map3D, Examine3D, Midas, Fidesys – программы численного моделирования
- 3D модель – объемная модель
- SAFETY FACTOR – КЗП в модели
- S-XX – горизонтальные напряжения в модели
- DISPLACEMENT TOTAL T – смещения в модели
- INSTRON 300DX – сервогидравлический пресс 300 т
- ГОСТ – государственный стандарт
- ЦДПС Илецксопь – цех добычи и переработки соли
- ВКМКС (ВКМС) – Верхнекамское месторождение калийных солей
- РАН – Российская академия наук
- РНФ – Российский научный фонд
- РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований
- НИТУ МИСИС – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
- ИГД СО РАН – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук
- ИПКОН РАН – Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук
- МГТУ им. Г.И. Носова – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЗабГК – Забайкальский горный колледж им. М.И. Агошкова

$H_{эм}$ – высота этажа, м

B – ширина горизонтальных подготовительных выработок, м

d_k – диаметр (длина) камеры цилиндрической формы (для сотовых конструкций диаметр камеры, $d_k = b_k$), м

b_k – ширина камеры (для сотовых конструкций диаметр камеры, $b_k = d_k$)

$a_{ц}$ – ширина целика (для сотовых конструкций минимальная ширина целика $a_{ц}$, максимальная ширина целика $A_{ц}$), м

$d_{ц}$ – длина целика (для сотовых конструкций минимальная длина целика $d_{ц}$, максимальная длина целика $D_{ц}$) (для сотовых конструкций $a_{ц} = d_{ц}$; $A_{ц} = D_{ц}$), м

S – горизонтальная площадь поверхности налегающей толщии пород, оказывающей давление на целики (целик) и поддерживаемая целиками (целиком), m^2

H – глубина залегания целиков от земной поверхности, м

γ – средневзвешенный удельный вес налегающей толщии пород над целиками, N/m^3

$F_{сж}^{пред}$ – сила предельного сжатия, Н

$F_{ц}^{сопр}$ – сила сопротивления, действующая со стороны целика, Н

$S_{ц}$ – площадь горизонтального сечения целика, m^2

$h_{ц}$ – высота целика, м

$\gamma_{ц}$ – удельный вес породы в целике, N/m^3

$R_{ц}$ – предел прочности породы целика на сжатие, N/m^2

n – коэффициент запаса прочности

$S_{\Sigma км}$ – горизонтальная площадь пустот (камер) в численной модели, m^2

$S_{\Sigma цм}$ – горизонтальная площадь массива каменной соли в целиках численной модели, m^2

$\Pi_{цм}$ – эксплуатационные потери в целиках выемочного участка, %

ε_3 – растягивающая деформация

ε_c – предельное (критическое) значение растягивающей деформации

ΔL – изменение исходного размера деформируемого объекта, м

L – исходный размер деформируемого объекта, м

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа

E – модуль Юнга, ГПа

ν – коэффициент Пуассона

σ_{max} – максимальное напряжение, МПа

$\Delta\sigma$ – избыточное напряжение, МПа

$\sigma_{сж}$ (σ_c) – предел прочности породы на одноосное сжатие в массиве, МПа

X – смещение массива, мм

φ – угол внутреннего трения породы в массиве, град.

D_n (длина) \times B_n (ширина) \times H_n (высота этажа) – размеры блока в натуральных условиях, размеры численной модели, м

Введение

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 Дружину Д.В. за помощь в проведении исследований, полезные советы и конструктивные замечания, высказанные при обсуждении результатов работы.

Глава 1. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений России подземным способом. Геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния массива при применении существующих вариантов систем разработки.

1.1 Анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений России подземным способом

Анализ проводился для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли, Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей, Гремячинского месторождения калийных солей и проектирования горных работ на Нивенском месторождении каменных, полиминеральных солей и полигалитов. Анализ проводился для понимания различных условий и возможностей привязки предлагаемой системы разработки, включающей сотовую горную конструкцию к освоению соляных куполов и пластовых залежей соли.

1.1.1 Илецкое месторождение каменной соли

Верхняя, разведанная часть купола Илецкого месторождения, расположенного в Оренбургской области, до глубины 700 м сложена соляным штоком, который имеет размер в плане 2×0,9 км (рисунки 1.1, 1.2) [1, 2]. Месторождение представляет собой соляной купол, покрытый и окруженный в верхней части рыхлыми песчано-галечниковыми отложениями. Геофизические исследования показывают, что соляной купол месторождения прослеживается на глубину до 2 км и более. Запасы каменной соли месторождения уникальные по своим объемам и составу, который не требует обогащения [3,4].

В настоящее время второй рудник разрабатывается камерной системой с МКЦ и междуэтажными (МЭЦ) целиками. В условиях отработки Илецкого месторождения камерной системой разработки оставляются целики: разгрузочные, под скважины, околострековые, под промплощадку, под соляные радуги и барьерный. Ранее, в прошлом столетии, выемка соли осуществлялась буровзрывным способом, в настоящее время – с применением комбайновой технологии [3-5].

Безопасное и эффективное освоение запасов месторождения ввиду наличия затопленного рудника №1 в этаже $\approx +20/-20$ м (отм. земной поверхности +117.54 м) и первого дорабатываемого -132/-160 м, второго отрабатываемого -185/-215 м ($H=305\div 335$ м), третьего подготовленного и отрабатываемого -230/-270 м этажей рудника №2 (рисунок 1.3) предполагает решение ряда геомеханических задач: охрана

месторождения от затопления; предотвращение проникновения воды в горные выработки; обеспечение сохранности поверхностных объектов для их безопасной и безаварийной эксплуатации; недопущение больших потерь каменной соли [4]. Охрана рудника №2 от затопления обеспечивается наличием водозащитной толщи (ВЗТ) мощностью 130 м до вышележащего затопленного рудника №1.



Условные обозначения

N_{2ok} Акчагыльский ярус. Глины пластичные с прослоями песка.	Пески
P_{2t} Татарский ярус. Песчаники, алевролиты, аргиллиты.	Алевролиты
P_{2kz2} Верхнеказанский подъярус. Переслаивающаяся толща алевролитов и песчаников.	Песчаник
P_{2kz1} Нижнеказанский подъярус. Песчаники, известняки, аргиллиты, алевролиты.	Каменная соль
P_{2u} Уфинский ярус. Алевролиты, аргиллиты, песчаники.	Стратиграфические границы
P_{2k3} Кунгурский ярус. Сульфато-соленая толща.	Согласные: 1. Достоверные 2. Предполагаемые
Нарушенность вмещающих пород (трещиноватость)	Несогласные: 1. Достоверные 2. Предполагаемые
Скважины	

Рисунок 1.2 – Геологическая карта Илецкого месторождения каменной соли (вертикальный поперечный разрез)

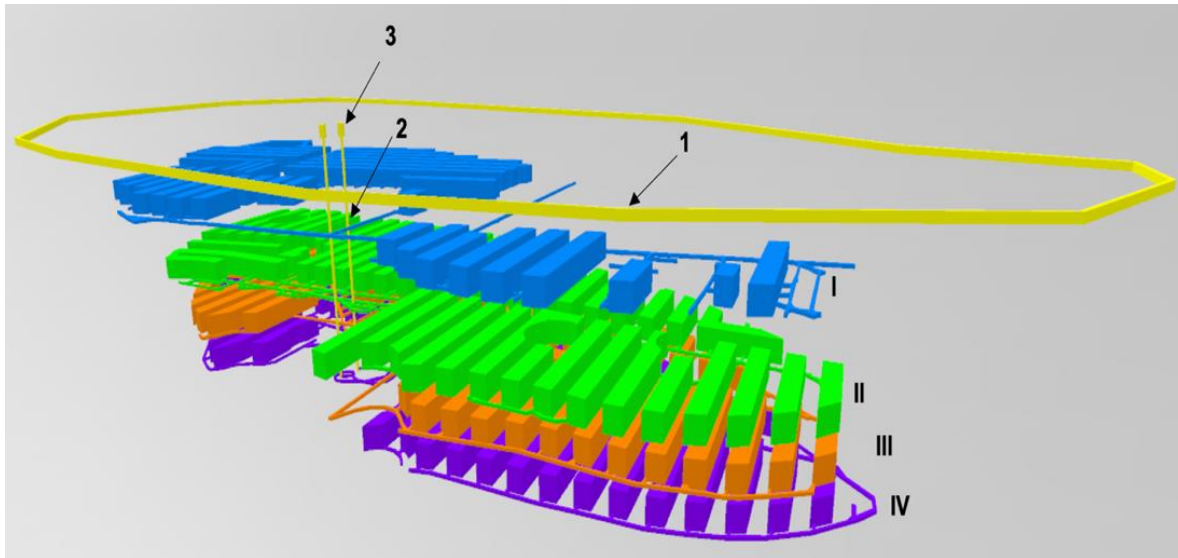


Рисунок 1.3 – Модель Соль-Илецкого рудника. 1 – граница горного отвода; 2 – вертикальные стволы; 3 – копры; I – первый рудник; второй рудник: II – 1 этаж; III – 2 этаж; IV – 3 этаж.

1.1.2 Верхнекамское месторождение калийных и калийно-магниевых солей

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) находится в пределах Пермского края, главным образом на левобережье р. Камы. Соляная толща месторождения, имеющая форму линзы площадью около 8,2 тыс. км², прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном – до 56 км. Внутри контура соляной толщи расположена многопластовая залежь калийно-магниевых солей протяженностью 140 км при ширине до 41 км (рисунки 1.4 и 1.5). Площадь основной части калийной залежи по внешнему контуру составляет 3,7 тыс. км² [2, 6-8].

В пределах соляной толщи ВКМС выделяются, снизу вверх, следующие слои: подстилающая каменная соль мощностью от 50 до 515 м, сильвинитовая зона средней мощностью 21 м, сильвинито-карналлитовая – мощностью от 21 до 115 м и покровная каменная соль. Над покровной каменной солью залегает соляно-мергельная толща, представленная в нижней части чередованием пластов каменной соли с мергелями и глинами. Мощность надсолевой толщи, которая представлена терригенно-карбонатными отложениями, пестроцветной толщей и породами четвертичного возраста, колеблется от 100 до 300 м. Глубина залегания кровли калийной залежи в пределах месторождения изменяется от 150 до 500 м [2, 6-8].

Камерная система разработки с оставлением МКЦ применяется на Верхнекамском месторождении калийных солей при отработке сильвинитовых пластов, а также карналлитового пласта, представленного на отдельных участках месторождения сильвинитом [9]. При одних условиях оставляются жесткие целики, при других – податливые.

На основе горно-геологических и горнотехнических условий и физико-механических свойств пород месторождения в основном оставляются жесткие МКЦ. При этом возрастают потери в жестких целиках вдоль тектонических зон, где мощность ВЗТ недостаточна для поддержания налегающей толщи податливыми целиками.

Основные параметры камерной системы разработки определяются горно-геологическими и горнотехническими условиями, а также типом очистного комбайна и используемыми транспортными средствами для доставки руды от очистного комбайна до места ее разгрузки. Ширина МКЦ может изменяться от 3 до 20 м, камер – от 9 до 18 м при длине очистной выработки до 200 м.

Для минимизации процессов деформирования массива и действия горного давления применяется закладка выработанного пространства камер.

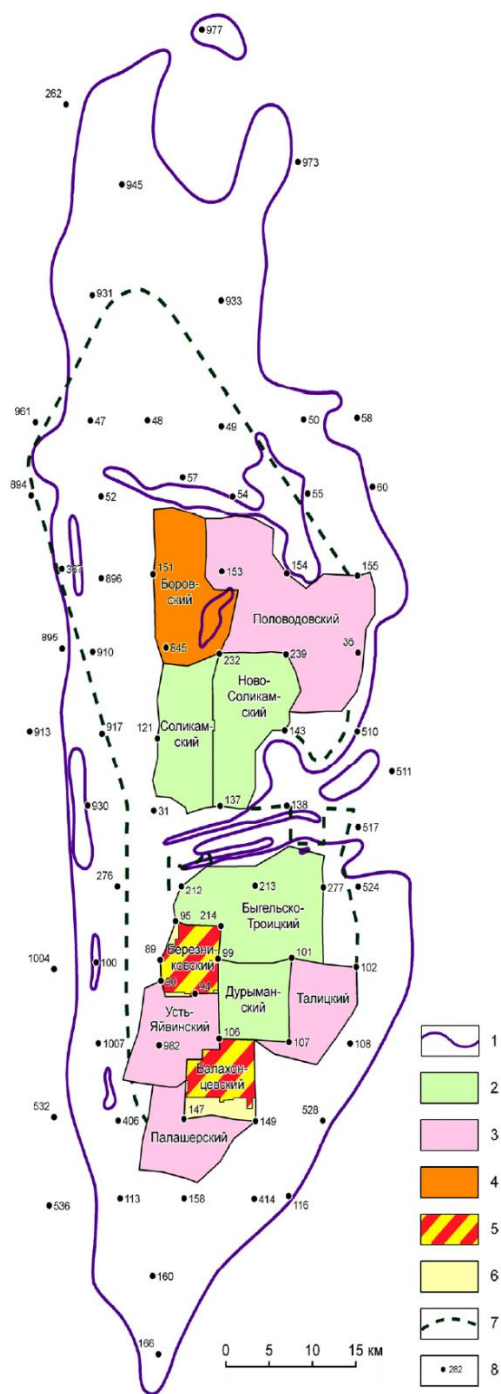


Рисунок 1.4 – Схема Верхнекамского месторождения калийных солей [7]. 1 – граница калийной залежи, участки детальной разведки солей; 2 – эксплуатируемые участки; 3 – участки, переданные для освоения; 4 – резервный участок; 5 – затопленные рудники; 6 – оставшиеся после затопления запасы; 7 – границы подсчета запасов солей категории С₂; 8 – скважины.

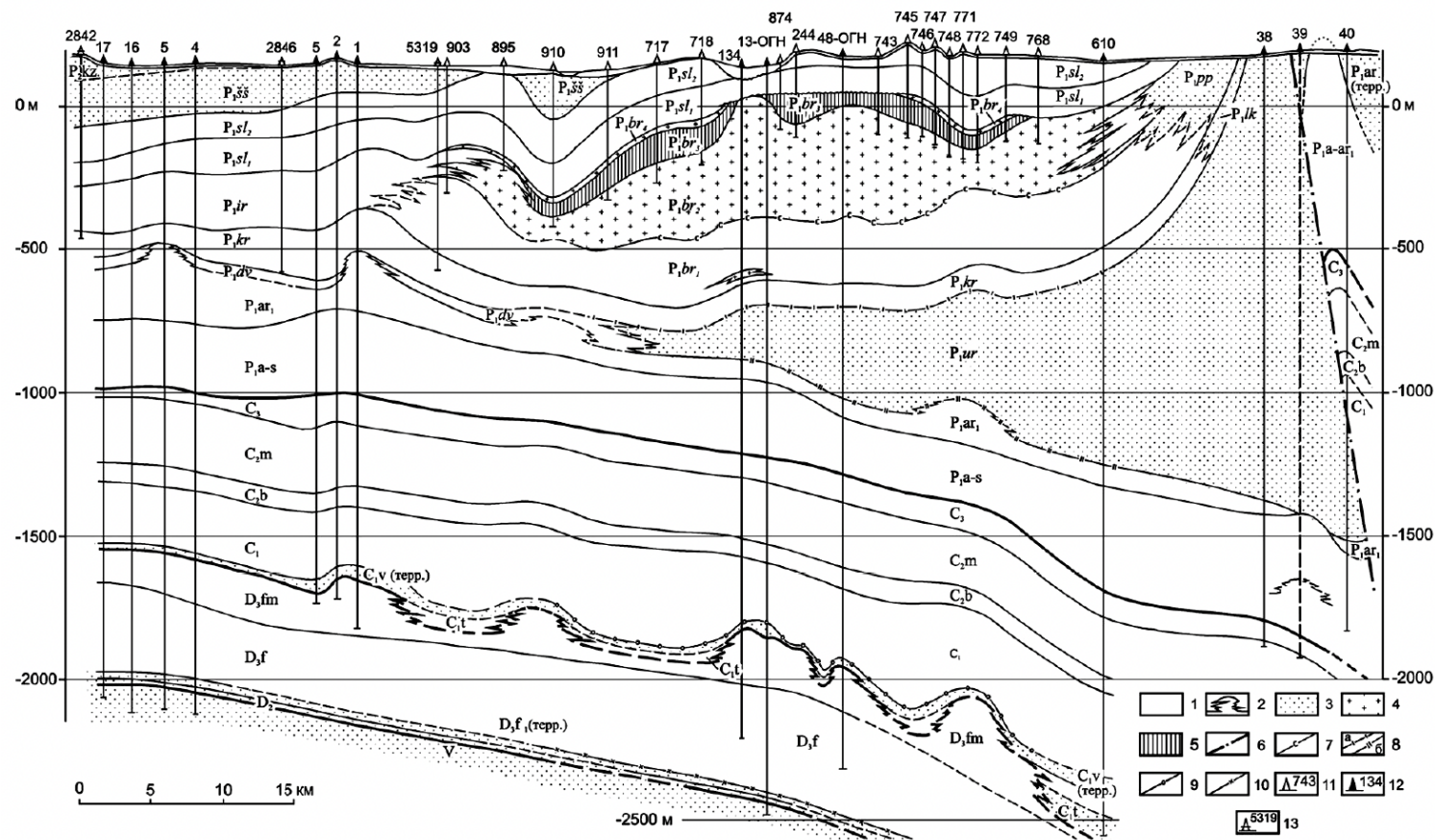


Рисунок 1.5 – Геологический разрез Соликамского месторождения [7]. 1 – карбонатные и существенно карбонатные отложения; 2 – рифовые постройки; 3 – преимущественно терригенные отложения; 4 – каменная соль; 5 – калийные и калийно-магниевые соли; 6 – Всеволодо-Вильевенский надвиг, отражающие горизонты; 7 – по подошве соляной толщи (ОГ С); 8 – по кровле терригенной – а (ОГ Ат) и карбонатной – б (ОГ Ак) толщи артинского яруса; 9 – по кровле терригенной пачки визейского яруса (ОГ II); 10 – по кровле терригенной пачки тиманского горизонта (ОГ III); скважины и их номера: 11 – солеразведочные; 12 – нефтяные; 13 – структурные.

1.1.3 Гремячинское месторождение калийных солей

Гремячинское месторождение калийных солей расположено в Котельниковском районе Волгоградской области [2, 6, 10]. Предельные размеры участка составляют по широте 11,3 км, по долготе – 14,9 км.

В пермской системе в кунгурском ярусе залегают каменные и калийные соли. В настоящее время к промышленным отнесен один пласт сложенный сильвинитовыми породами.

Разработка месторождения проектируется для условий сохранности ВЗТ без нарушения ее целостности. Мощность ВЗТ в пределах участка изменяется от 0 до 320 м (рисунок 1.6 [10]).

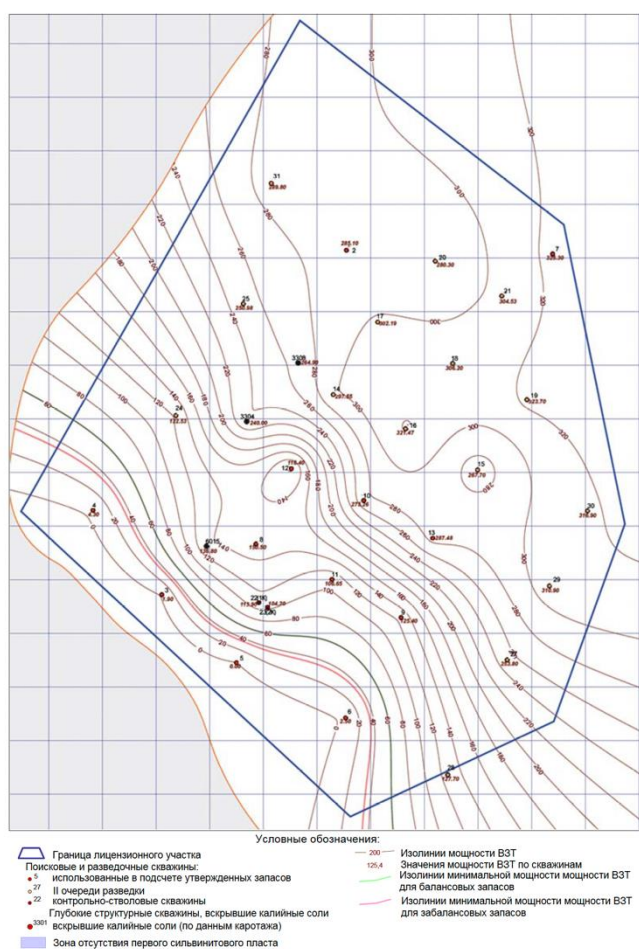


Рисунок 1.6 – Изолинии мощности ВЗТ [10]

Гремячинское месторождение относится к пластовым пологозалегающим месторождениям.

Продуктивный пласт представляет собой моноклираль мощностью от 2 до 20 м, при этом средняя мощность пласта составляет 11 м (рисунок 1.7, [10]).

Определена камерная система разработки месторождения с оставлением «жестких» МКЦ. Оставляются также барьерные разгружающие целики (БРЦ). Отбойка будет осуществляться комбайновым способом.

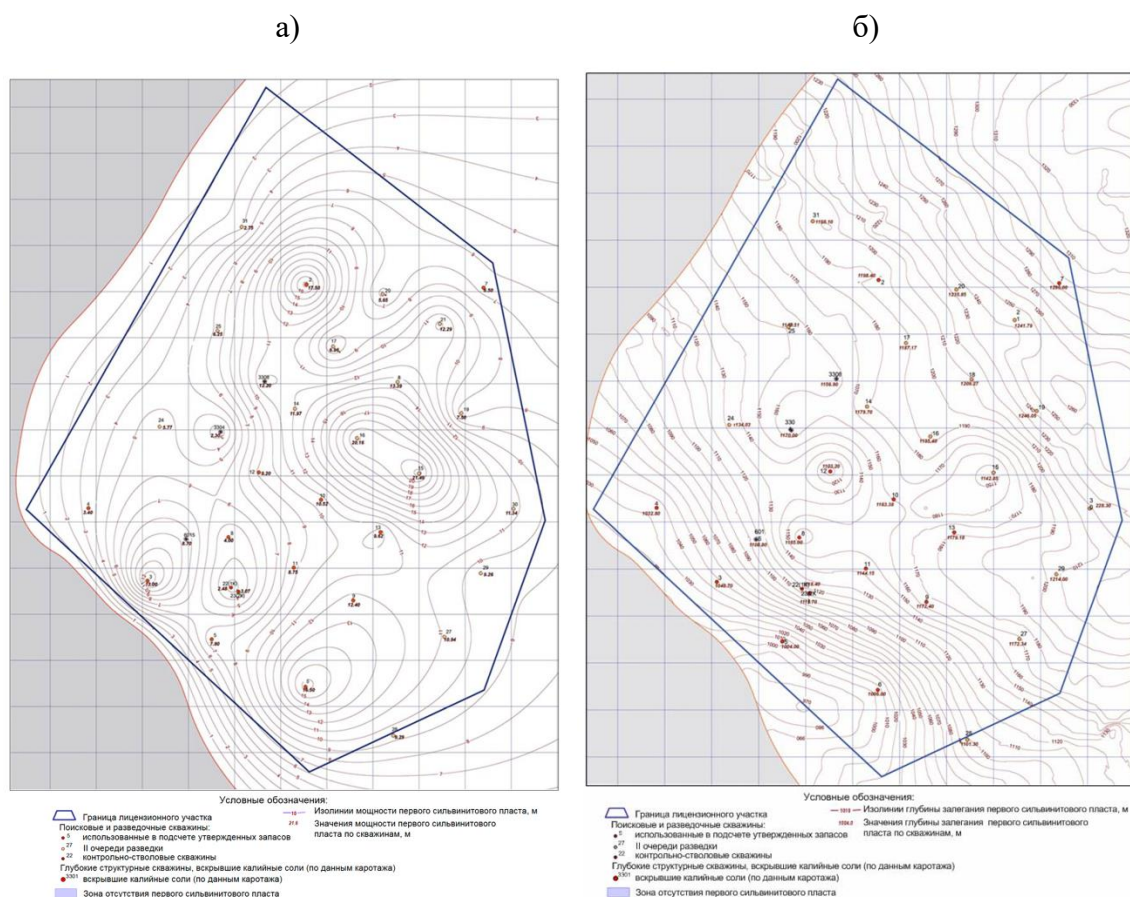


Рисунок 1.7 – Изолинии мощности (а) и глубины залегания (б) сильвинитового пласта [10]

1.1.4 Нивенское месторождение каменных, полиминеральных солей и полигалитов

Нивенское месторождение находится в Багратионовском районе Калининградской области на северо-западной окраине Восточно-Европейской равнины, на юго-восточном побережье Балтийского моря [2, 11, 12]. Глубина залегания продуктивных пластов от земной поверхности от 1 до 1,2 км и более. Мощность пластов изменяется от 0,5 до 15 м и более. На участке месторождения по глубине практически всегда регистрируется наличие

нескольких продуктивных пластов. Мощность пластов наиболее ценных полигалитов более 100 м.

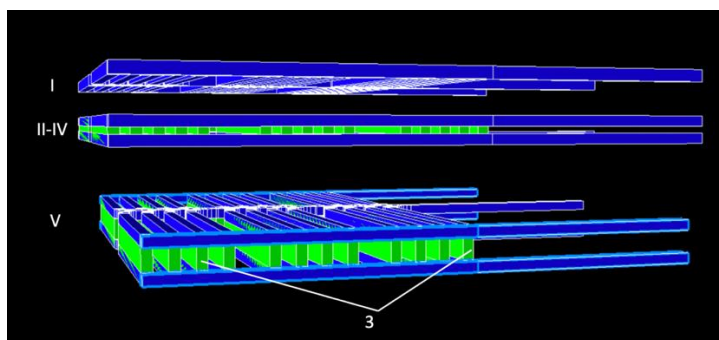
Горнотехнические условия эксплуатации проектируемого рудника осложнены наличием нескольких мощных водоносных горизонтов выше соляного массива и как следствие, необходимостью поддержания целостности ВЗТ (ориентировочно четырех ВЗТ) для безопасной работы предприятия, большой глубиной залегания и довольно изменчивой гипсометрией пластов солей.

Проектируются базовые варианты камерных систем разработки промышленных полиминеральных пластов с последующей закладкой выработанного пространства отходами процессов обогащения и производства (рисунок 1.8, [12]):

Вариант 1 «Одностадийная отработка запасов одноходовыми камерами по ширине». Ширина камер оптимизируется рассмотрением 2-3-х стандартных типоразмеров добычного комбайна. МКЦ равнозначные и соосные по критерию сближенности пластов. Высота камер определяется геологической мощностью пластов, утвержденными условиями, технологичностью и эффективностью ведения очистных (в том числе селективная выемка) и закладочных работ, промышленной безопасностью. Порядок отработки пластов от нисходящего к допустимому смешанному (локальная подработка вышележащих пластов).

Вариант 2 «Двухстадийная отработка запасов одноходовыми камерами по ширине с доработкой МКЦ после проведения закладочных работ». Ширина камер оптимизируется рассмотрением 2-3-х стандартных типоразмеров добычного комбайна. МКЦ равнозначные и соосные по критерию сближенности пластов. Высота камер определяется также как и для Варианта 1.

Вариант 3 (с чередованием МКЦ и опорных разгрузочных целиков (ОРЦ)) «Двухстадийная отработка запасов одноходовыми камерами по ширине с доработкой ОРЦ после проведения закладочных работ». Ширина камер оптимизируется рассмотрением 2-3-х стандартных типоразмеров добычного комбайна. МКЦ и ОРЦ равнозначные (расчетные) и соосные по критерию сближенности пластов.



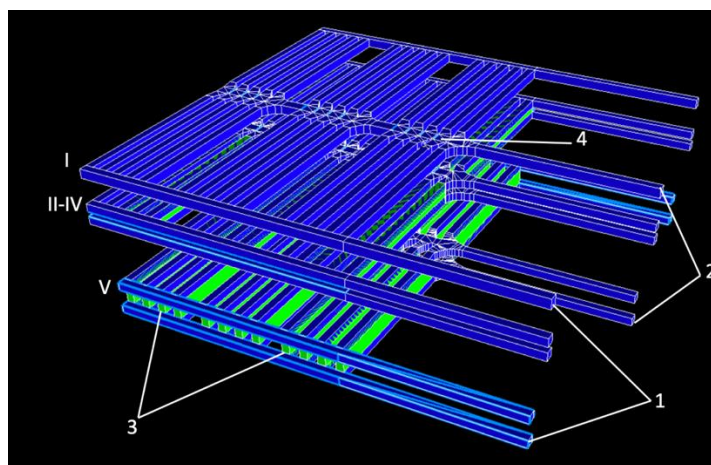


Рисунок 1.8 – 3D Схема отработки пластов на участке Нивенского месторождения.
 1 – блоковый фланговый штрек; 2 – блоковый конвейерный штрек; 3 – камеры;
 4 – сопряжения очистных выработок; I – пласт полиминеральной соли; II-IV – пласты полиминеральной соли; V – пласт полигалита.

1.2 Геомеханическое обоснование вариантов отработки соляных месторождений камерными системами разработки

В условиях применения камерных систем разработки с оставлением междукамерных целиков (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. Рупнейт, В.И. Борщ-Компониц, М.А. Иофис, Л.-Е. Грюнер, Ж.-Н.Х. Гупиер, К. Кегель, М. Стаматиу и многие другие ученые.

1.2.1 Существующие варианты отработки соляных месторождений камерными системами разработки

Главной задачей при проектировании горных работ для условий освоения соляных месторождений с целью обеспечения минимальных потерь полезного ископаемого в целиках является выбор параметров камерной системы разработки с оставлением целиков. Критерии выбора камерной системы разработки многократно описаны в геомеханических исследованиях институтов и различных компаний горного профиля [5, 9, 12-15 и др.].

В соответствии с классификацией месторождений и рассматриваемых глубин освоения, в основном применяется камерная система разработки с оставлением ленточных целиков и закладкой выработанного пространства камер в вариантах с оставлением и без оставления ОРЦ, которая нашла широкое применение при отработке Илецкого, Верхнекамского и других месторождений. Анализ мирового опыта применения камерной системы разработки с оставлением целиков показывает, что различные варианты обеспечивают безопасную и эффективную отработку промышленных пластов или соляных куполов в широком диапазоне горно-геологических условий их залегания, используя методы управления горным давлением за счет разгрузки массива горных пород, времени выемки, стояния и закладки камер и т.п. [12].

Необходимость управления горным давлением с оставлением целиков горняки понимали еще в глубокой древности. На Лаврийских рудниках в античной Греции (рисунок 1.9 из музея античности [16]) для поддержания выработанного пространства оставлялись рудные целики. В погоне за прибылью некий Дефил вел их отработку. Следствием этого было обрушение пород. Дефил был уличен руководителем государственного хозяйства Афин и осужден. Уже в IV веке до нашей эры (примерно 2,5 тысячи лет назад) был издан специальный закон, запрещающий отработку поддерживающих целиков в целях обеспечения сохранности земной поверхности и выработок [12, 16].

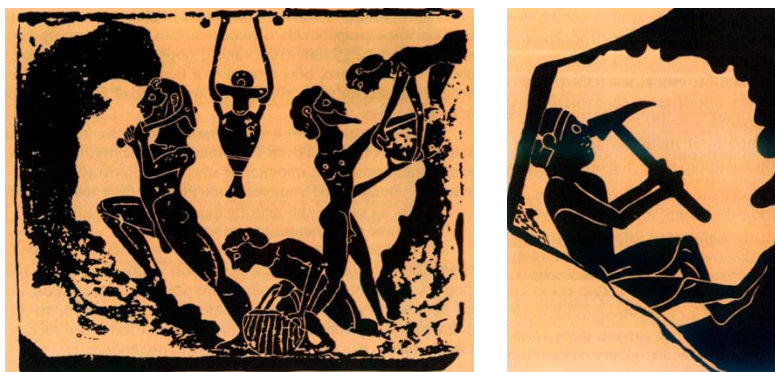


Рисунок 1.9 – Античные изображения горных работ на коринфских табличках (Древняя Греция) [16]

Управление горным давлением при камерной системе разработки с МКЦ и последующей закладкой выработанного пространства камер осуществляется с поддержанием открытого выработанного пространства и всей налегающей толщи до поверхности целиками из соли, оставленными в выработанном пространстве на длительный срок, а также с возможной последующей закладкой выработанного

пространства камер и в некоторых вариантах дальнейшей отработкой или частичной отработкой МКЦ во второй стадии [12].

Следует отметить, что камерная система разработки с оставлением МКЦ позволяет: осуществлять закладку очистных камер отходами обогащения, в т.ч. непосредственно в шахтных условиях; эффективно решать основные проблемы управления состоянием массива, в частности значительно снизить величины деформаций подрабатываемой водозащитной толщи ВЗТ и земной поверхности, обеспечивая при этом защиту рудника от затопления и необходимую охрану объектов на земной поверхности от вредного влияния горных работ; обеспечивать высокую производительность и пр. [12, 16-23].

В результате сравнения параметров отработки шахтного поля и предлагаемого проходческого и добычного оборудования определяется оптимальная ширина очистных камер. Высота их и МКЦ зависит от мощности промышленных пластов, междупластья или размеров соляного купола в границах соляного диапира [12].

Внесенный в камеры массив закладки, после ее консолидации обеспечивает сопротивление горизонтальному расширению/конвергенции целиков, что предотвращает непрогнозируемое развитие деформационных процессов [12].

В данном разделе диссертационной работы представлены несколько вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ.

Вариант 1 – камерная система разработки с оставлением МКЦ и закладкой выработанного пространства камер, без оставления ОРЦ при отработке панелей. Отработка осуществляется в две стадии. Комбайн обрабатывает камеры на необходимую высоту выемки. Размер сетки целиков на I стадии отработки определяется как допустимый пролет очистной камеры в свету b (с учетом применяемого выемочного оборудования) плюс ширина одного МКЦ ($2b$). В I стадию обрабатываются камеры с оставлением МКЦ (рисунки 1.10а, 1.10г). Затем камеры, отработанные на I стадии, закладываются (рисунки 1.10б, 1.10д). Во II стадию обрабатываются после отработанных последующие камеры в центральной части МКЦ между заложенными камерами и оставляются МКЦ уже меньшей ширины (рисунки 1.10б, 1.10е). Затем камеры, отработанные на II стадии, закладываются (рисунки 1.10в, 1.10ж). На границе блоков по периметру оставляются междупанельные целики шириной не менее ширины чем МКЦ [12].

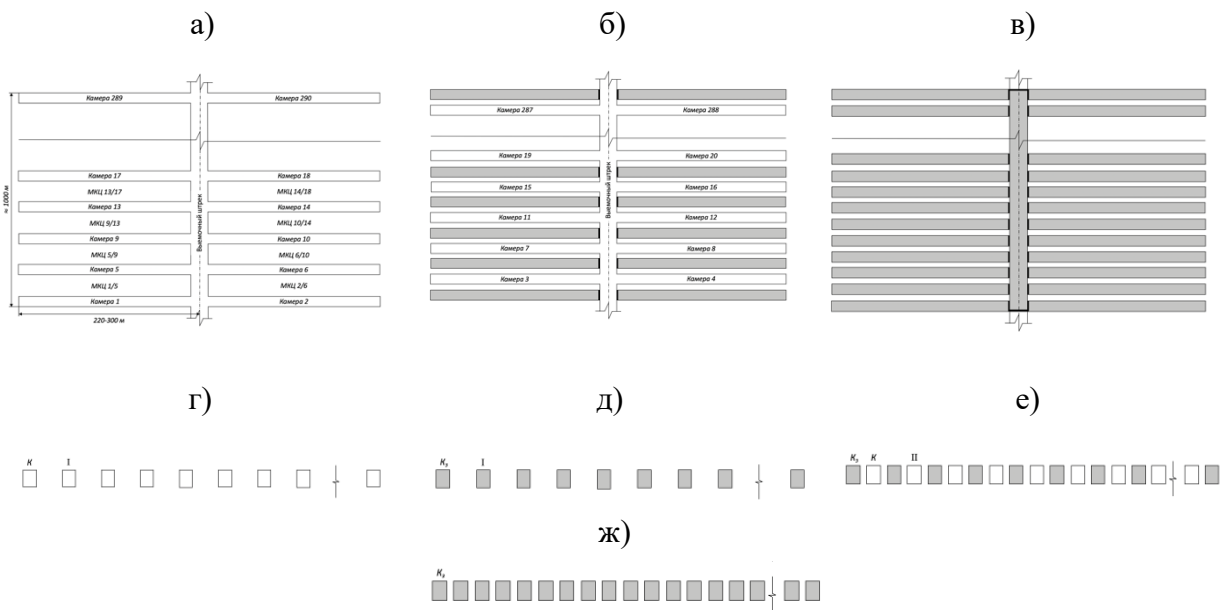


Рисунок 1.10 – Горизонтальная и вертикальная схемы отработки панели (Вариант 1). К – камера; K_3 – заложенная камера; I – камеры первой стадии отработки; II – камеры второй стадии отработки; МКЦ – междукамерный целик [12].

Вариант 2 – камерная система разработки с оставлением МКЦ и закладкой выработанного пространства камер увеличенной высоты без оставления ОРЦ при отработке панелей. Оработка камер как и в *Варианте 1* осуществляется в две стадии [12].

Вариант 3 – камерная система разработки с МКЦ и закладкой выработанного пространства камер увеличенной высоты без оставления ОРЦ при отработке панелей, с оставлением в центре камеры горизонтального внутрипластового целика. Оработка осуществляется в четыре стадии. Размер сетки целиков на I стадии определяется как допустимый пролет очистной камеры в свету (с учетом применяемого выемочного оборудования) плюс ширина одного МКЦ (2b). В I стадию отрабатываются верхние части камер с оставлением МКЦ. Затем верхние части камер, отработанные на I стадии, закладываются. Во II стадию отрабатываются ниже оставленного в камерах горизонтального внутрипластового целика нижние части камер. Затем нижние части камер, отработанные на II стадии, закладываются. В III стадию отрабатываются верхние части камер в центральной части МКЦ между заложеными верхними частями камер и оставляются МКЦ меньшей ширины. Затем верхние части камер, отработанные на III стадии, закладываются. В IV стадию отрабатываются нижние части камер в центральной части МКЦ между заложеными нижними частями камер и оставляются МКЦ меньшей ширины. Затем верхние части камер, отработанные на IV стадии, закладываются [12].

Вариант 4 аналогичен *Варианту 2*, но на I стадии отработки в *Варианте 2* ширина МКЦ= 2b, а в *Варианте 4* он увеличен до 2,5b [12].

Следует отметить, что в случаях применения *Вариантов 2-4* рекомендуется использовать только нисходящий порядок отработки запасов камер увеличенной высоты.

Если предположить восходящий порядок отработки, то необходимо оставлять в камере мощные внутрипластовые целики, ниже которых объем недозакладки будет достигать до 15%. В противном случае отработка является небезопасной и экономически неэффективной, так как могут происходить обрушения внутрипластовых или междуэтажных целиков (МЭЦ) в процессе движения по ним и работы добычных комбайнов и действия высокого горного давления. В свою очередь работать тяжелым очистным комбайнам в восходящем порядке двигаясь по закладочному массиву очень сложно в связи с низкими его прочностными свойствами. Армировать и укреплять верхнюю часть закладочного массива для движения очистных комбайнов – трудоемкий и сложный процесс [12].

Вариант 5 – камерная система разработки с оставлением МКЦ и закладкой выработанного пространства камер, а также с оставлением внутрипластовых целиков, при этом отработка камер осуществляется в условно шахматном и восходящем порядке (рисунок 1.11). Оработка каждого слоя осуществляется в одну стадию. Размер сетки целиков определяется как допустимый пролет очистной камеры в свету (с учетом применяемого выемочного оборудования) плюс ширина одного МКЦ. Камеры отрабатываются в нижнем слое, затем закладываются. Затем отрабатываются камеры в вышележащем слое в условно шахматном порядке по отношению к нижнему слою и закладываются, и т.д. [12].

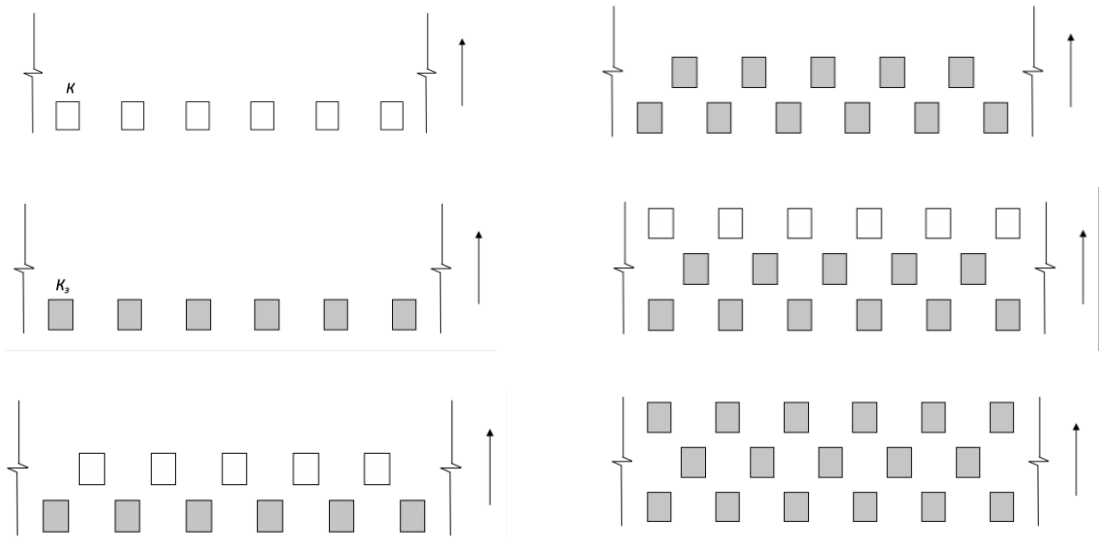


Рисунок 1.11 – Вертикальная схема отработки панели (Вариант 5). ↑ – восходящий порядок отработки.

Вариант 6 аналогичен *Варианту 5*, но внутрипластовые целики не оставляются.

Вариант 7 – камерная система разработки с оставлением МКЦ и ОРЦ с закладкой выработанного пространства камер при отработке блоков (рисунок 1.12). Отработка осуществляется в две стадии. Размер сетки целиков определяется как допустимый пролет очистной камеры в свету (с учетом применяемого выемочного оборудования) плюс ширина одного МКЦ. В I стадию отрабатываются камеры с оставлением МКЦ (рисунок 1.12а), затем они закладываются (рисунок 1.12б). Между несколькими отработанными камерами в I стадию оставляются ОРЦ, ширина которых зависит от мощности отрабатываемого пласта или этажа при отработке соляного купола. Во II стадию при благоприятных геомеханических условиях таким же порядком отрабатываются и закладываются камеры в массиве ОРЦ [12].

Варианты 1-6 подразумевают отработку продуктивных пластов или соляного купола одноходовым способом, т.е. камера отрабатывается одним ходом комбайна на всю проектную ширину.

Вариант 8 аналогичен *Варианту 7*, но камеры при этом увеличенного сечения и отработка продуктивных пластов может осуществляться многоходовым способом [12].

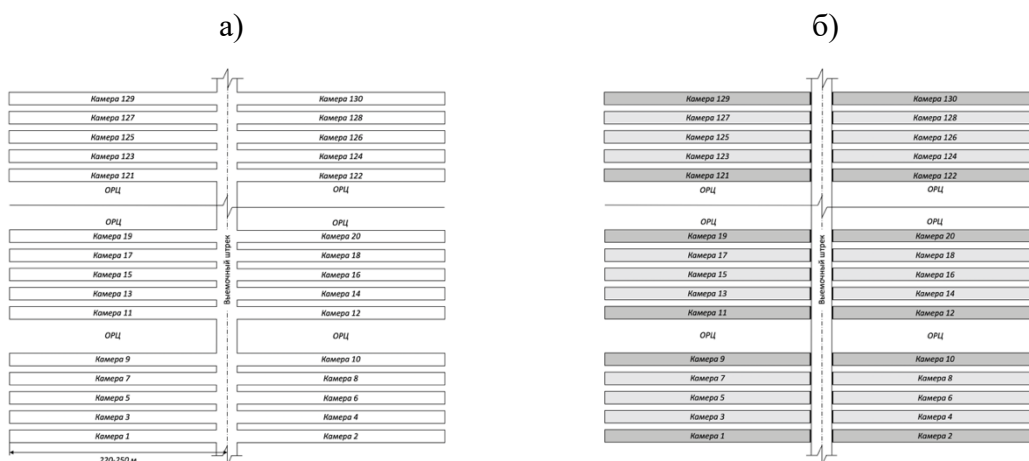


Рисунок 1.12 – Горизонтальная схема отработки панели (Вариант 7). ОРЦ – опорный разгрузочный целик.

1.2.2 Геомеханический анализ НДС массива при применении существующих вариантов систем отработки

Геомеханическое обоснование (сравнение) *Вариантов*, представленных в разделе 1.2.1, и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) горнотехнических систем проводилась аналитическим способом, а также с использованием численного метода 3D моделирования и последующей по возможности калибровкой численных моделей в шахтных условиях.

При расчетах и анализе использовался программный комплекс Mar3D [24] и оценивались два параметра. Сначала при численном анализе определялся параметр – микродеформация массива ε_{μ} . Области массива, в которых регистрируются трещины растяжения, имеют значения микродеформаций $\varepsilon_{\mu}^k \geq 350$ [25]. Далее в шахтных условиях проводилась оценка состояния массива целиков различного назначения и вмещающего массива камер, определялось местоположение и объемы зон растягивающих деформаций (зоны отжима и нарушения трещинами сплошности массива и пр.). Затем модель калибровалась с учетом проведенных шахтных измерений посредством изменения значений входных параметров, а именно физико-механических свойств массива каменной соли: предела прочности на одноосное сжатие, модуля упругости, коэффициента Пуассона, угла внутреннего трения и сцепления [12, 26]. После калибровки сопоставлялась установленная в натурных условиях граница ненарушенного массива с границей полученной при численном анализе зоны микродеформаций со значениями $\varepsilon_{\mu}^k \geq 350$, в которой регистрируются трещины растяжения. Данный метод позволил определить реальные размеры и объемы

нарушенного и ненарушенного трещинами массива целиков и в целом вмещающего камеры массива, в т.ч. в почве ВЗТ.

Для оценки НДС массива горных пород в предположении его упругого поведения применялся критерий прочности Хука–Брауна [27, 28]. Для количественной оценки качества породного массива использовалась система классификации по показателю индекса Q (метод Бартона) [29].

Размеры зон нарушенности массива определялись с применением различных методов (реперные станции, исследование массива через скважины с помощью технического эндоскопа, сканирование, визуальный осмотр обнажений камер и выработок, измерение с помощью маркшейдерского оборудования, лазерного дальномера, обычной рулетки или линейки).

На завершающей стадии в откалиброванной модели определялся коэффициент запаса прочности целиков, допустимое значение которого должно быть $KЗП \geq 1,5$ для условий с высокой степенью достоверности входных параметров в модель, которой отличаются именно соляные гомогенные месторождения [12].

Численное моделирование позволило определить оптимальные параметры камер и целиков с позиций устойчивости и деформируемости в течение длительного и необходимого срока при различной их высоте, оптимальную и безопасную мощность внутрипластовых целиков при нисходящем порядке отработки камер в свите пластов, обеспечивающую устойчивость всей горнотехнической системы рудника и безопасность ведения горных работ, обосновать параметры конструктивных элементов системы [12, 30].

Установлено, что без оставления внутрипластового горизонтального целика горнотехнические системы в основном неустойчивые, в целиках регистрируется $KЗП \leq 1,5$, а с оставлением целика – устойчивые.

Анализ микродеформаций показал, что в некоторых случаях при рассматриваемых устойчивых параметрах МКЦ наблюдается развитие зон растягивающих деформаций $\mu\varepsilon > 350$, в основном в боках камер (рисунок 1.13). Рекомендуются в данном случае рассматривать возможность крепления боков камер анкерами и заранее определять бюджет данных мероприятий [12].

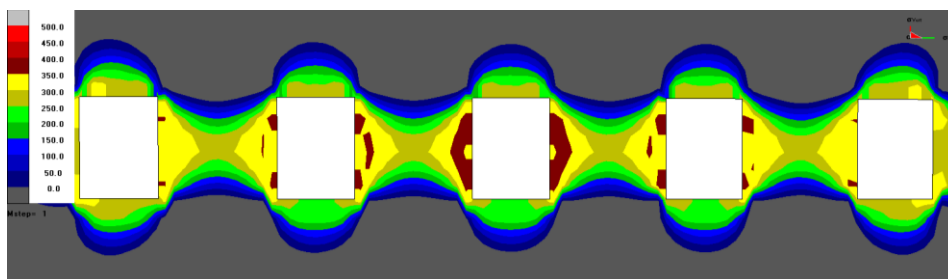


Рисунок 1.13 – Зоны растягивающих деформаций во вмещающем камеры массиве, установленные на основе численного анализа. 0.0-500.0 – диапазон микродеформаций ε_{μ} .

Сравнение результатов численного анализа показало, что применение *Вариантов* обработки панелей системой без оставления ОРЦ (*Варианты 1-4*) с точки зрения устойчивости горнотехнической системы незначительно уступает *Варианту* с их оставлением (*Варианты 7 и 8*) в схожих горно-геологических условиях. При этом уменьшаются потери полезного ископаемого в условиях применения *Варианта* без оставления ОРЦ.

Сравнивая *Варианты 5 и 6* установлено, что МКЦ (КЗП \geq 1,5) устойчивые при наличии внутрипластового горизонтального целика (рисунок 1.14).

Следует отметить, что проведенные в процессе исследований аналитические расчеты устойчивости камер и целиков (по известным методикам и формулам, разработанным в XX веке) и сравнение с результатами численного анализа показали, что откалиброванные численные модели уменьшили примерно на 10-20% количественные параметры устойчивости конструктивных элементов системы разработки по сравнению с полученными аналитическими данными, соответственно, уменьшились допустимые размеры пролетов обнажений камер и увеличилась ширина МКЦ [12].

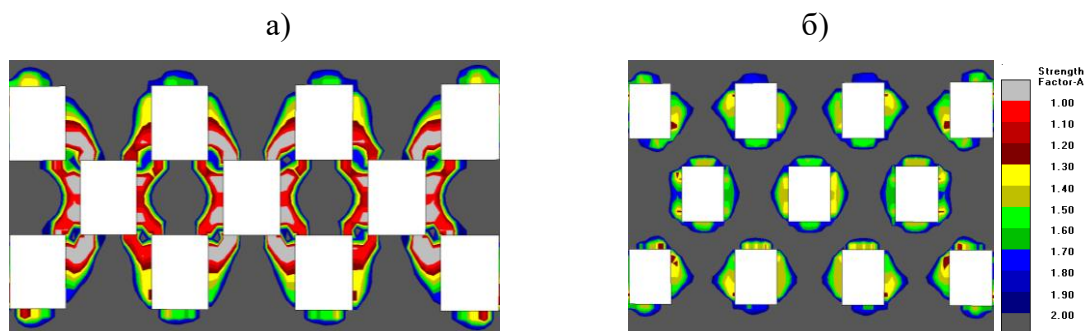


Рисунок 1.14 – Коэффициент запаса прочности МКЦ, рассчитанный с помощью численного моделирования для горнотехнических систем с наличием внутрипластовых горизонтальных целиков (а - *Вариант 5*) и без них (б - *Вариант 6*). КЗП (Strength Factor-A (SFA) – английская программная версия аббревиатуры КЗП): диапазон КЗП 1.00÷2.00.

Аналитические исследования позволили актуализировать условия применения камерных систем разработки. Современный уровень развития геотехнологии освоения соляных месторождений подземным способом с применением камерных систем характеризуется высокой степенью механизации добычных работ и низкой их трудоемкостью, которые обеспечиваются за счет широкого применения комбайновой технологии очистной выемки. Неизбежной платой за такую форму обеспечения высокой производительности труда является опасность горных работ, обусловленная необходимостью постоянного присутствия человека непосредственно в очистном пространстве выемочных камер, а главное – высокими эксплуатационными потерями балансовых запасов в МКЦ, достигающими 60-80% и возрастающими пропорционально увеличению глубины разработки месторождений [3, 31].

Все вышеуказанное позволяет определить основные задачи исследований.

Выводы по первой главе

1. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения месторождений каменных, калийных, калийно-магниевых, полиминеральных солей и полигалитов подземным способом позволил определить мощности соляных куполов и продуктивных пластов, площади месторождений, глубины разработки, в т.ч. проектируемых соляных залежей, количество и мощности ВЗТ, горнотехнические условия применения камерных систем разработки и многое другое.

2. Для рассматриваемых условий представлены восемь вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ.

3. Показано геомеханическое сравнение вариантов отработки панелей камерной системой разработки с оставлением ленточных МКЦ и оценка НДС горнотехнических систем с использованием численного метода 3D моделирования и последующей калибровкой численных моделей в шахтных условиях.

Сравнение результатов численного анализа показало, что применение вариантов отработки панелей системой без оставления 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.

Сравнивая варианты с оставлением внутрипластовых горизонтальных целиков и без них установлено, что МКЦ ($KЗП \geq 1,5$) устойчивые только при наличии внутрипластового горизонтального целика.

Глава 2. Расчет основных параметров конструктивных элементов и оценка устойчивости камерной системы разработки с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы

2.1 Использование гипотезы Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением междукамерных целиков и с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы. Методы аналитических расчетов.

В разделе представлены аналитические расчеты параметров конструктивных элементов и оценка устойчивости камерной системы разработки с оставлением МКЦ в классическом варианте отработки полезного ископаемого горизонтальными камерами и в варианте отработки вертикальными камерами цилиндрической формы методом выбуривания, которые позволяют уменьшить потери соли в целиках с сохранением устойчивости разрабатываемого массива [12, 32-37].

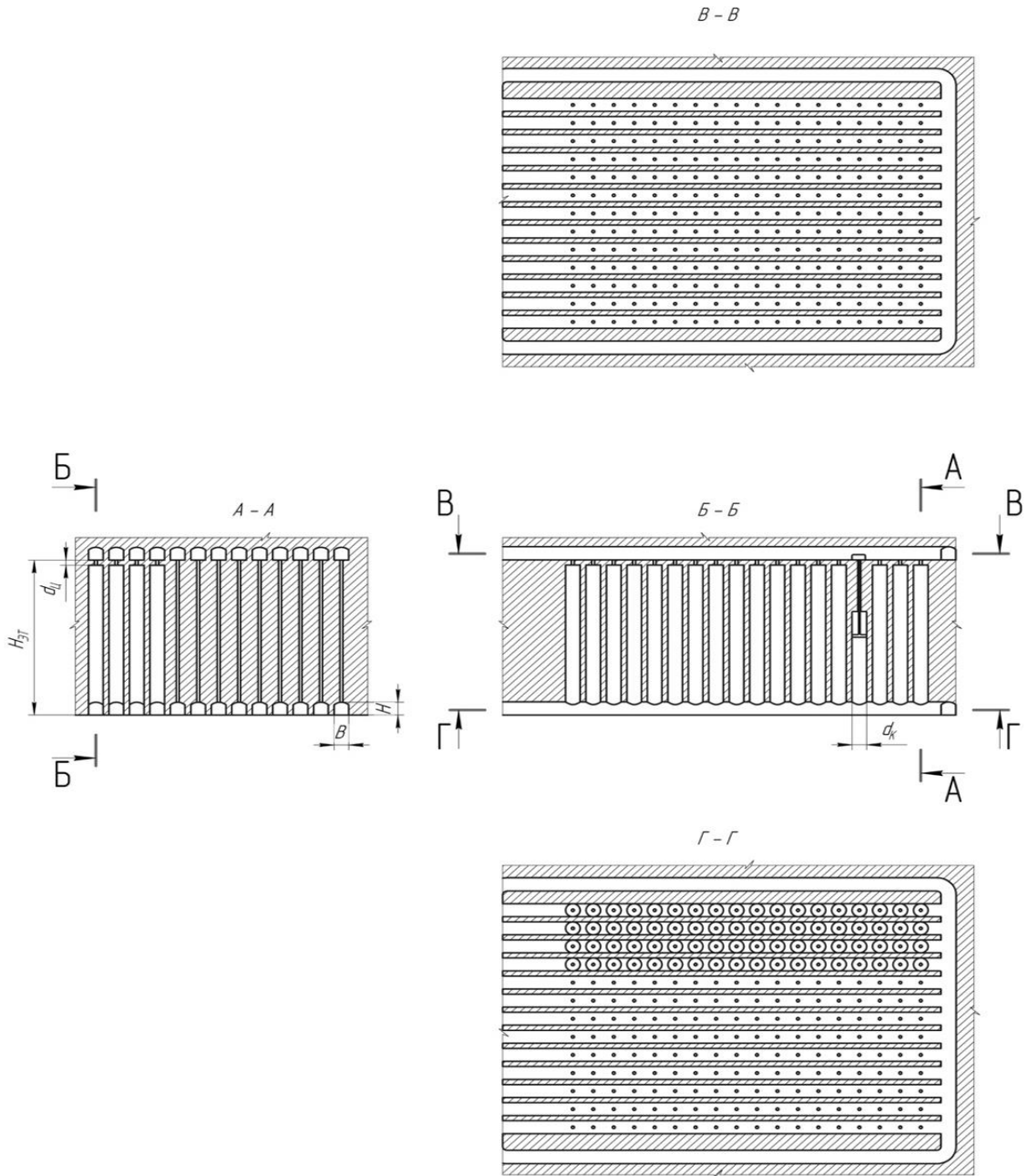
Для расчетов устойчивости МКЦ за основу принята гипотеза Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы с квадратной и равносторонней треугольной сеток их расположения. 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.

В рамках реализации проекта № 19-17-00034 РНФ «Формирование природно-технических систем разработки месторождений твердого минерального сырья на основе конвергентных технологий» разработаны два конструктивных варианта системы разработки, включающих сотовую горную конструкцию: 1 – при условии отработки вертикальных камер цилиндрической формы снизу вверх с применением механизированных комплексов (рисунок 2.1а); 2 – при условии отработки вертикальных камер цилиндрической формы сверху вниз механизированным устройством, расширяющим пилотную скважину и перепуском через нее полезного ископаемого (рисунок 2.1б) [3, 35, 38-41]. Для обоснования реализуемости предлагаемых технических решений подобраны механизированные установки для проходки восстающих выработок, с помощью которых осуществляется освоение соляного месторождения по предлагаемым вариантам системы разработки с использованием сотовой горной конструкции: Epiroc

Robbins 92R (диаметр 2,4-6 м); Robbins 53RH (диаметр 1,2-2,4 м); Robbins 74R (диаметр 1,5-3,1 м); Robbins 44RH (диаметр 1-1,8 м); самая компактная установка Robbins 34RH (диаметр 0,6-1,5 м); Sandvik Rhino (серии 400 (1-2,1 м); 600, 1000 (2,1-3,5 м); 1200, 2000 (3,5-6,5 м); 2400); устройство для бурения вертикальных камер сверху вниз, позволяющее расширять пилотную скважину и перепускать через нее соль на нижний горизонт (разработка ИГД СО РАН) [25].

Конструктивное исполнение данной системы положено в основу геомеханического обоснования применения вертикальных камер цилиндрической формы при подземной разработке соляных месторождений. Для расчетов устойчивости МКЦ за основу принята гипотеза Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

a)



б)

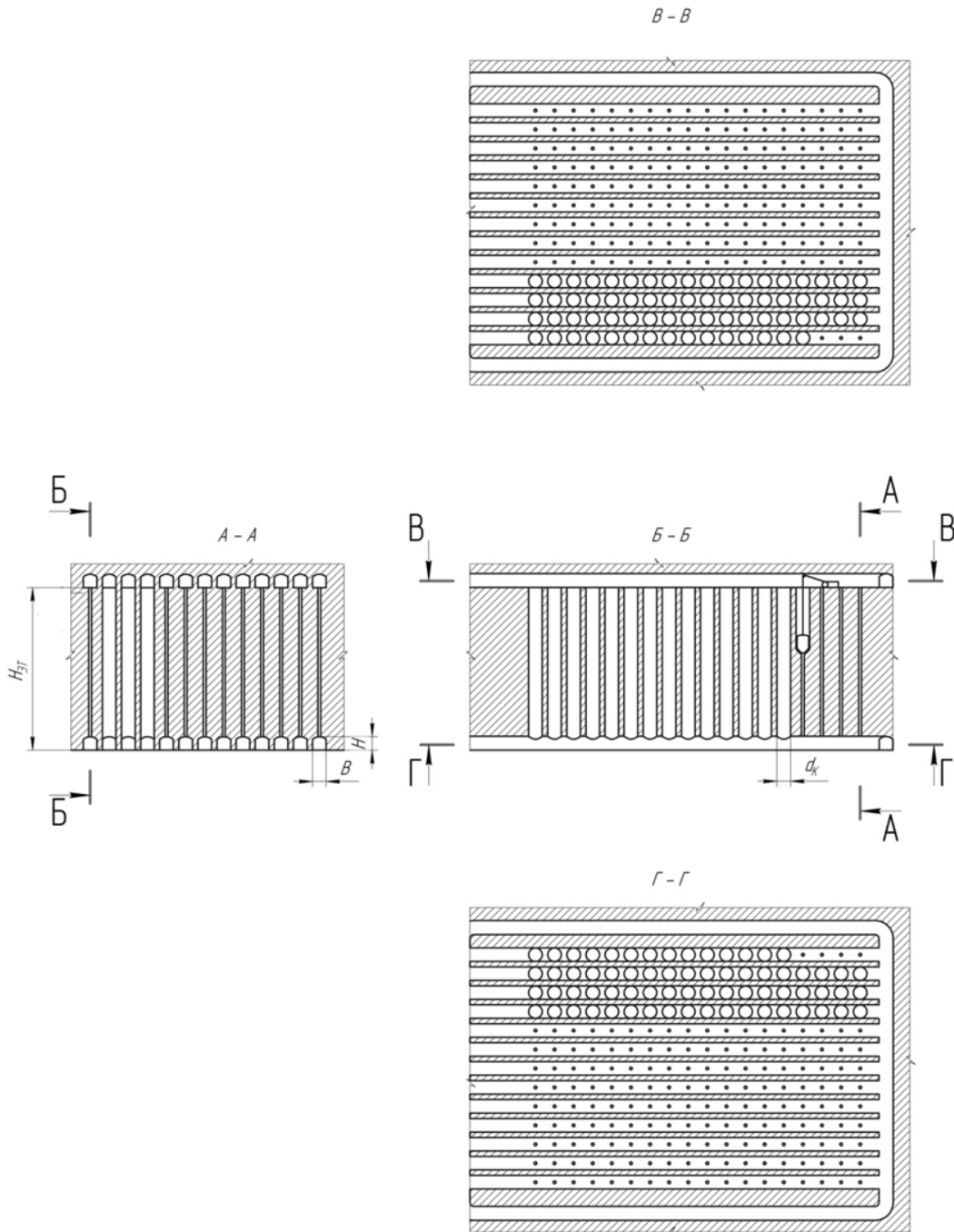


Рисунок 2.1 – Варианты системы разработки с применением сотовых горных конструкций и отработкой камер снизу вверх с применением механизированных комплексов (а) и отработкой вертикальных камер сверху вниз механизированным устройством, расширяющим пилотную скважину, с перепуском через нее полезного ископаемого на концентрационный горизонт (б) для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли [25]. H_{3m} – высота этажа; B – ширина горизонтальных подготовительных выработок; H – высота горизонтальных подготовительных выработок; d_k – диаметр камеры цилиндрической формы; $d_{ц}$ – высота потолочного целика камеры.

2.1.1 Методика аналитических расчетов

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 [13, 15, 42, 43]:

$$P = SH\gamma, \text{ Н} \quad (2.1)$$

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/м^3 .

Л.Д. Шевяковым в основе метода расчета параметров МКЦ определены следующие положения [13, 42, 43]: 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:

$$P \leq F_{\text{сж}}^{\text{пред}} - F_{\text{ц}}^{\text{сопр}}, \text{ Н} \quad (2.2)$$

где $F_{\text{сж}}^{\text{пред}}$ – сила предельного сжатия ($F_{\text{сж}}^{\text{пред}} = s_{\text{ц}}R_{\text{ц}}$), Н ; $F_{\text{ц}}^{\text{сопр}}$ – сила сопротивления, действующая со стороны целика ($F_{\text{ц}}^{\text{сопр}} = s_{\text{ц}}h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}$), Н ; $s_{\text{ц}}$ – площадь горизонтального сечения целика, м^2 ; $h_{\text{ц}}$ – высота целика, м ; $\gamma_{\text{ц}}$ – удельный вес породы в целике, Н/м^3 ; $R_{\text{ц}}$ – предел прочности породы целика на сжатие, Н/м^2 .

Целики работают в условиях одноосного сжатия. Фактическую неравномерность напряжений [44, 45] учитывают путем введения коэффициента запаса прочности целика n (КЗП).

С учетом коэффициента запаса прочности целика n из выражения (2.2) получим:

$$SH\gamma + s_{\text{ц}}h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}} \leq s_{\text{ц}}R_{\text{ц}}\frac{1}{n} \quad (2.3)$$

Преобразовав выражение (2.3), получим:

$$\frac{S}{s_{\text{ц}}} \leq \frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma}. \quad (2.4)$$

В работе рассмотрены различные варианты традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и вертикальных камер цилиндрической формы (рисунок 2.2).

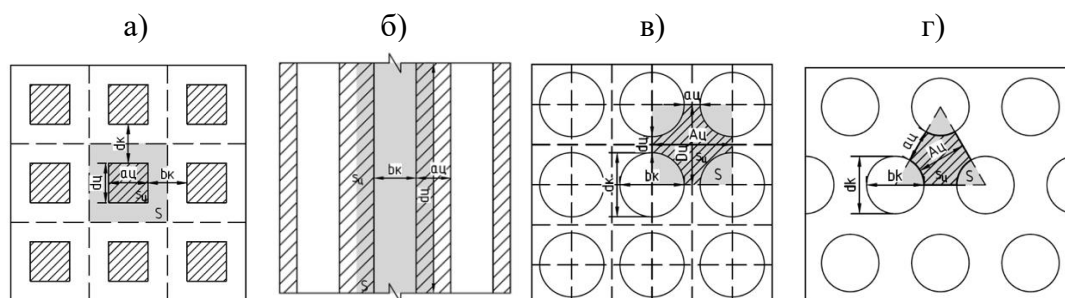


Рисунок 2.2 – Технологические схемы камерной системы разработки с оставлением столбчатых МКЦ (а), ленточных МКЦ (б) и МКЦ в условиях применения сотовых горных конструкций с квадратной (в) и равносторонней треугольной (г) сетками расположения вертикальных камер цилиндрической формы [3]. b_k – ширина камеры (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 $a_ц = d_ц$; $A_ц = D_ц$).

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 столбчатых МКЦ, ограниченных камерами (Вариант 1, рисунок 2.2а) и ленточных МКЦ (Вариант 2, рисунок 2.2б) для горнотехнических условий Соль-Илецкого рудника и физико-механических свойств каменной соли Илецкого месторождения.

Определена ограниченность применения данного метода и формулы: не учтена возможность и не представлены в методике поправки на отрицательные «—» значения ширины МКЦ. В этом случае также целесообразно рассматривать различные параметры для целиков, располагаемых на разных глубинах: для рассматриваемых горизонтов эти значения могут быть положительными, для остальных – отрицательными, что не имеет логического смысла в расчетах.

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 2.2а):

$$\frac{s}{s_{\text{ц}}} = \frac{(b_{\text{к}}+a_{\text{ц}}) \cdot (d_{\text{к}}+d_{\text{ц}})}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} = \frac{b_{\text{к}}d_{\text{к}}+b_{\text{к}}d_{\text{ц}}+a_{\text{ц}}d_{\text{к}}+a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} = \frac{b_{\text{к}}d_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} + \frac{b_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}} + \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} + 1. \quad (2.5)$$

С учетом выражения (2.5), условие (2.4) перепишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{b_{\text{к}}d_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} + \frac{b_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}} + \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} + 1 &\leq \frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma}; \\ \frac{b_{\text{к}}d_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} + \frac{b_{\text{к}}d_{\text{ц}}}{a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} &\leq \frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma} - \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} - 1; \\ a_{\text{ц}} &\geq \frac{b_{\text{к}}(d_{\text{к}} + d_{\text{ц}})}{d_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma} - \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} - 1 \right)}, \text{ м}; \end{aligned}$$

откуда:

$$a_{\text{ц}} \geq \frac{\frac{b_{\text{к}}d_{\text{к}}+b_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} + \frac{b_{\text{к}}}{a_{\text{ц}}}}{\frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma} - \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} - 1}, \text{ м}. \quad (2.6)$$

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

$$a_{\text{ц}} = \frac{b_{\text{к}} + \frac{b_{\text{к}} \cdot d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}}}{\frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma} - \frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} - 1}, \text{ м}. \quad (2.7)$$

Вариант 2. Для ленточных целиков ($d_{\text{ц}} \rightarrow \infty$) выражение (2.7) приобретает вид (рисунок 2.2б):

$$a_{\text{ц}} = \frac{b_{\text{к}}}{\frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma} - 1}, \text{ м}. \quad (2.8)$$

Вариант 3. Для варианта системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы с квадратной сеткой их расположения (рисунок 2.2в) по аналогии с вышеприведенными расчетами по формуле (2.5) при условии, когда $a_{\text{ц}} \neq d_{\text{ц}}$, получаем:

$$\frac{s}{s_{\text{ц}}} = \frac{s}{s - \pi \frac{b_{\text{к}}^2}{4}} = \frac{(b_{\text{к}}+a_{\text{ц}})(b_{\text{к}}+d_{\text{ц}})}{(b_{\text{к}}+a_{\text{ц}})(b_{\text{к}}+d_{\text{ц}}) - \pi \frac{b_{\text{к}}^2}{4}}, \quad (2.9)$$

Откуда (2.6) перепишется как:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\pi b_{\text{к}}^2}{4(b_{\text{к}} + a_{\text{ц}})(b_{\text{к}} + d_{\text{ц}})} &\geq \frac{1}{\frac{R_{\text{ц}}}{nH\gamma} - \frac{h_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}{H\gamma}}; \\ 1 - \frac{\pi b_{\text{к}}^2}{4(b_{\text{к}} + a_{\text{ц}})(b_{\text{к}} + d_{\text{ц}})} &\geq \frac{nH\gamma}{R_{\text{ц}} - nh_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}}; \\ \frac{\pi b_{\text{к}}^2}{b_{\text{к}}^2 + a_{\text{ц}}b_{\text{к}} + b_{\text{к}}d_{\text{ц}} + a_{\text{ц}}d_{\text{ц}}} &\leq 4 \left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{\text{ц}} - nh_{\text{ц}}\gamma_{\text{ц}}} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\pi} + \frac{a_{ц}}{\pi b_{к}} + \frac{d_{ц}}{\pi b_{к}} + \frac{a_{ц}d_{ц}}{\pi b_{к}^2} &\geq \frac{1}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)}; \\
a_{ц} \left(1 + \frac{d_{ц}}{b_{к}}\right) &\geq \frac{\pi b_{к}}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)} - \frac{\pi b_{к}}{\pi} - \frac{\pi b_{к}d_{ц}}{\pi b_{к}}; \\
a_{ц} \cdot \frac{b_{к} + d_{ц}}{b_{к}} &\geq \frac{\pi b_{к}}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)} - (b_{к} + d_{ц}); \\
a_{ц} &\geq \frac{\pi b_{к}^2}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)(b_{к} + d_{ц})} - b_{к}, \text{ м.}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

При равной периодичности расположения камер ($a_{ц}=d_{ц}$) неравенство (2.10) приобретает вид:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\pi} + \frac{a_{ц}}{\pi b_{к}} + \frac{a_{ц}}{\pi b_{к}} + \frac{a_{ц}^2}{\pi b_{к}^2} &\geq \frac{1}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)}; \\
a_{ц}^2 + 2a_{ц}b_{к} &\geq \frac{\pi b_{к}^2}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)} - b_{к}^2; \\
a_{ц}^2 + 2a_{ц}b_{к} &\geq \left(\frac{\pi}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)} - 1\right) b_{к}^2.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Решаем полученное неравенство:

$$a_{ц} \geq -b_{к} + b_{к} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)} - 1\right)}, \text{ м.} \tag{2.12}$$

Таким образом, с учетом коэффициента запаса прочности в рассматриваемом варианте системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы минимальная ширина целика (рисунок 2.2в) составит:

$$a_{ц} = -b_{к} + b_{к} \sqrt{\frac{\pi}{4\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)}}, \text{ м.} \tag{2.13}$$

Если выражать размер целика не через минимальную $a_{ц}$, а максимальную его ширину $A_{ц}$ (рисунок 2.2в), то:

$$\begin{aligned}
\frac{S}{S_{ц}} &= \frac{A_{ц} \cdot D_{ц}}{A_{ц} \cdot D_{ц} - \frac{\pi b_{к}^2}{4}}; \\
\frac{A_{ц} \cdot D_{ц}}{A_{ц} \cdot D_{ц} - \frac{\pi b_{к}^2}{4}} &\leq \frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma}; \\
A_{ц} \cdot D_{ц} &\leq \left(A_{ц} \cdot D_{ц} - \frac{\pi b_{к}^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma}\right);
\end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
A_{ц} \cdot D_{ц} &\leq A_{ц} \cdot D_{ц} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right) - \frac{\pi b_{к}^2}{4} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right); \\
A_{ц} \cdot D_{ц} \cdot \left(1 - \frac{R_{ц}}{nH\gamma} + \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right) &\leq -\frac{\pi b_{к}^2}{4} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right); \\
A_{ц} \cdot D_{ц} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1 \right) &\geq \frac{\pi b_{к}^2}{4} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right); \\
A_{ц} &\geq \frac{\frac{\pi b_{к}^2}{4D_{ц}} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right)}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}, \text{ м.}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Ширина целика $A_{ц}$ тогда рассчитывается по формуле:

$$A_{ц} = \frac{\frac{\pi b_{к}^2}{4D_{ц}} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right)}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}, \text{ м.} \tag{2.16}$$

При равной периодичности расположения камер в двух направлениях ($A_{ц} = D_{ц}$), начиная с выражения (2.15), неравенство представляется следующим образом:

$$A_{ц}^2 \geq \frac{\frac{\pi b_{к}^2}{4} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right)}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}, \text{ м.} \tag{2.17}$$

Решая полученное неравенство через корни квадратного уравнения и учитывая выполнение условия положительного знака ширину целика, определяем по формуле:

$$A_{ц} = \sqrt{\frac{\frac{\pi b_{к}^2}{4} \cdot \left(\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} \right)}{\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - 1}}, \text{ м.} \tag{2.18}$$

Для варианта системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы с равносторонней треугольной сеткой их расположения (рисунок 2.2г) по аналогии с вышеприведенными расчетами по формуле (2.5) получаем:

$$\frac{S}{S_{ц}} = \frac{\frac{l^2\sqrt{3}}{4}}{\frac{l^2\sqrt{3}}{4} - 3 \cdot \frac{\pi b_{к}^2}{360^\circ} \alpha} = \frac{(a_{ц}+b_{к})^2\sqrt{3}}{4 \left(\frac{(a_{ц}+b_{к})^2\sqrt{3}}{4} - \frac{\pi b_{к}^2}{8} \right)} = \frac{(a_{ц}+b_{к})^2\sqrt{3}}{(a_{ц}+b_{к})^2\sqrt{3} - \frac{\pi b_{к}^2}{2}}, \tag{2.19}$$

где l – длина стороны равностороннего треугольника, м, $l = (a_{ц} + b_{к})$; α – угол отсекаемого от целика сектора, для равностороннего треугольника составляет 60° .

С учетом выражения (2.19), условие (2.4) перепишем следующим образом:

$$a_{ц} + b_{к} \geq \frac{\sqrt{\pi b_{к}}}{\sqrt[4]{3} \cdot \sqrt{2} \sqrt{1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}}}; \tag{2.20}$$

Решаем полученное неравенство:

$$a_{ц} \geq \frac{\sqrt{\pi b_{к}}}{\sqrt[4]{3} \cdot \sqrt{2} \sqrt{1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}}} - b_{к}, \text{ м.} \tag{2.21}$$

Отсюда ширина целика определяется по формуле:

$$a_{ц} = -b_{к} + \frac{b_{к}}{\sqrt[4]{3}} \sqrt{\frac{\pi}{2\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)}}, \text{ м.} \quad (2.22)$$

Если выразить размер целика не через минимальную $a_{ц}$, а его максимальную ширину $A_{ц}$ (рисунок 2.2г), то:

$$A_{ц} = \frac{1}{2} \left(-b_{к} + b_{к} \cdot \sqrt[4]{3} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2\left(1 - \frac{nH\gamma}{R_{ц} - nh_{ц}\gamma_{ц}}\right)}} \right), \text{ м.} \quad (2.23)$$

Сравним формулы (2.7) и (2.18). Горизонтальная площадь поверхности налегающей толщи пород (S), оказывающей давление на целик и поддерживаемая целиком, больше площади самого целика ($s_{ц}$) за счет того, что в расчеты дополнительно закладывается площадь выработанного пространства пустот, окружающих целик. Для варианта системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы площадь поверхности налегающей толщи пород приходится на площадь самого целика и площади сегментов камер окружающих целик, составляющих для рассматриваемого Варианта 3 в сумме площадь одной камеры для квадратной сетки расположения камер (рисунок 2.2в) или сумме половины площади одной камеры для равносторонней треугольной сетки расположения камер (рисунок 2.2г). Площади сегментов вертикальных камер цилиндрической формы для квадратной сетки их расположения учтены в числителе за счет вычитаемого параметра, включающего свойства целика и суммарную площадь сегментов камер, а также учтены в качестве вычитаемого параметра $b_{к}$ для равносторонней треугольной сетки расположения камер. Для системы столбчатых целиков – это часть площади камер, окружающих целик. Их можно представить как прямоугольные площади, примыкающие к боковым и угловым частям целика и выходящие за его пределы, а в случае применения вертикальных камер цилиндрической формы – их сегменты, составляющие в сумме площадь круглой камеры для квадратной сетки расположения камер (рисунок 2.2в) или сумме половины площади одной камеры для равносторонней треугольной сетки расположения камер (рисунок 2.2г), примыкающие к угловым частям целика и входящие в пределы поверхности налегающей толщи. Знаменатель в формуле (2.18) соответствует знаменателю для столбчатых целиков ($d_{ц} \rightarrow \infty$) в формуле (2.8).

Таким образом, обоснование устойчивости целиков для различных вариантов их конструкций сводится к сравнению ширины камеры $b_{к}$ в случае применения столбчатых целиков с высотой целика и прочностными свойствами массива в случае применения вертикальных камер цилиндрической формы, которые в большей степени могут

варьироваться, чем ширина камер, тем самым обеспечивая большую устойчивость такой конструкционной формы.

2.1.2 Результаты расчетов

Для проведения проверочных расчетов выбирались горнотехнические условия Соль-Илецкого рудника и физико-механические свойства каменной соли Илецкого месторождения. Высота целиков выбиралась $h_{ц} = 60$ м исходя из возможностей сдваивания двух этажей высотой $H_{эт.} = 30$ м (горнотехнические условия рудника) и применения бурового оборудования.

На начальном этапе выполнения исследований проведен сбор и анализ данных о физико-механических свойствах каменной соли Илецкого месторождения. Целью исследования было определение прочностных и деформационных характеристик массива каменной соли, которые выбирались из возможности применения сотовых горных конструкций в конкретных горно-геологических условиях.

Объектом исследований является каменная соль Илецкого месторождения. Массив месторождения галитов является гомогенным.

Испытания физико-механических свойств образцов каменной соли с Илецкого месторождения проводились на сервогидравлическом прессе INSTRON 300DX, обеспечивающем мягкий (программа нагружения задается по нагрузкам) и жесткий (программа нагружения задается по перемещению захватов) режимы нагружения с автоматической записью в память компьютера результатов эксперимента и построением полных диаграмм деформирования в координатах «нагрузка - продольная и поперечная деформация», а при трехосном сжатии – дополнительно «боковое давление - изменение внешнего диаметра». Оборудование, соответствующее требованиям международных стандартов, позволяет получать прочностные, деформационные характеристики на всех стадиях нагружения образцов вплоть до их разрушения.

Для испытаний на сервогидравлическом прессе INSTRON 300DX использовались образцы с квадратным поперечным сечением (рисунок 2.3). Исследования были проведены на образцах, изготовленных из каменной соли. Образцы доставлялись и подготавливались согласно ГОСТ 21153.0-75. Всего было испытано 5 образцов каменной соли, которые отбирались с разных горизонтов рудника в этажах $-132 \div -160$ м, $-185 \div -215$ м и $-240 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности.

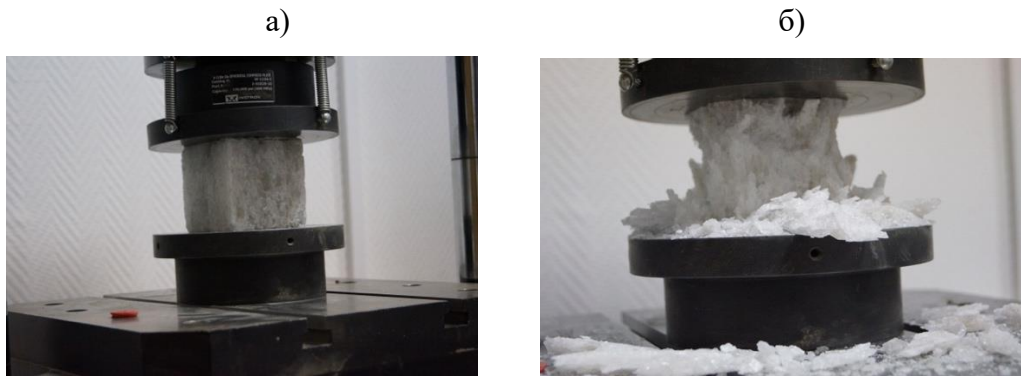


Рисунок 2.3 – Проведение испытаний на сервогидравлическом прессе INSTRON 300DX: а – образец до нагружения; б – образец разрушен.

Результаты испытаний 5 образцов каменной соли приведены в таблице 2.1 и на рисунке 2.4.

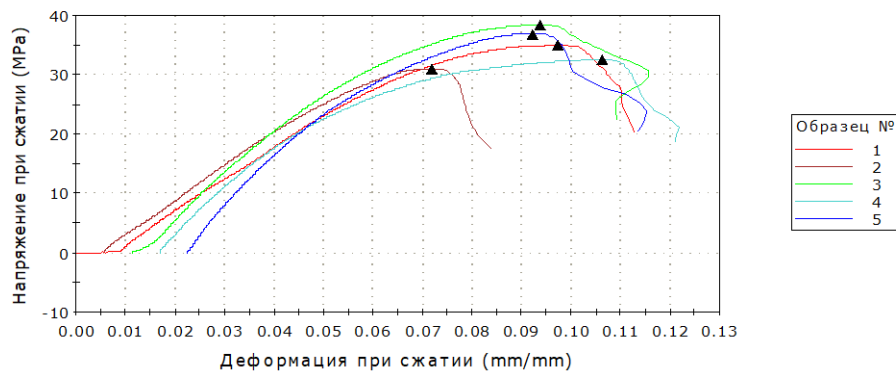


Рисунок 2.4 – График зависимостей «напряжение σ - деформация ϵ » для определения деформационных свойств каменной соли

Таблица 2.1 – Результаты испытаний 5 образцов каменной соли на одноосное сжатие

Номер образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь, см ²	Максимальное напряжение при разрушении, $\sigma_{сж}$, МПа
1	71,0	73,0	52,1	35,0
2	74,0	71,0	50,6	32,5
3	71,0	70,0	50,0	37,4
4	71,0	70,0	50,3	33,7
5	71,0	73,0	49,6	39,0

$\sigma_{сж.ср} =$ 35,5 МПа
 $\Delta =$ 3,04 МПа
 $V =$ 8,40 %

Плотность соли определялась в соответствии с ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Плотность ρ в лабораторных условиях была определена методом непосредственных измерений. Для этого образцы, изготовленные из отобранного материала, обмерялись и взвешивались, после чего вычислялась их плотность.

Предел прочности горных пород при одноосном сжатии σ_c определялся в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Сущность метода заключается в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образца правильной формы через стальные плоские плиты.

При определении предела прочности при одноосном сжатии образцы непрерывно подвергали нагрузке со скоростью 0,5-1,0 МПа/сек до разрушения.

Деформационные показатели (модуль деформации E_ρ , модуль упругости E_y и коэффициент Пуассона μ) определялись в соответствии с ГОСТ 28985-91.

При нагружении поддерживалась постоянная скорость продольного деформирования образца породы. По результатам испытаний строились графики зависимости напряжения сжатия от продольных относительных деформаций образца.

В таблице 2.2 представлены результаты испытаний физико-механических свойств образцов каменной соли Илецкого месторождения.

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства каменной соли Илецкого месторождения

Параметр	Единица измерения	Значение
Объемный вес каменной соли, γ	кН/м ³	20,9
Предел прочности на одноосное сжатие, $\sigma_{сж}$	кН/м ²	35000
Коэффициент Пуассона, ν	-	0,35
Сцепление, C	кН/м ²	4500
Модуль упругости, E	кН/м ²	30000000
Угол внутреннего трения, φ	°	41
GSI (геологический индекс прочности)	-	95
Структурный индекс mi	-	10

Результаты аналитических расчетов ширины ленточного МКЦ $a_{ц}$ по *Варианту 2* для условий Соль-Илецкого рудника представлены в таблице 2.3 (рисунок 2.2б). Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с квадратной сеткой их расположения с различными конструктивными элементами выемочного участка по *Варианту 3* для рассматриваемых условий Соль-Илецкого рудника представлены в таблице 2.4 (рисунки 2.2в и 2.5) [46]. Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ для квадратной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* представлены в таблице 2.5 (рисунок 2.2в и 2.5). Результаты аналитических расчетов максимальной ширины МКЦ для квадратной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* представлены в таблице 2.6 (рисунки 2.2в и 2.5).

Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с равносторонней треугольной сеткой их расположения с различными конструктивными элементами выемочного участка по *Варианту 3* для рассматриваемых условий Соль-Илецкого рудника представлены в таблице 2.7 (рисунки 2.2г и 2.6). Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ для равносторонней треугольной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* представлены в таблице 2.8 (рисунки 2.2г и 2.6). Результаты аналитических расчетов максимальной ширины МКЦ для равносторонней треугольной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* представлены в таблице 2.9 (рисунки 2.2г и 2.6).

Как следует из таблицы 2.3 (результаты аналитических расчетов ширины ленточного МКЦ $a_{ц}$), часть рассчитанных размеров ширины целиков по формуле (2.7) Л.Д. Шевякова принимают отрицательные значения. При этом расчетная ширина целиков должна иметь положительные значения. Определим случаи, при которых это происходит. Числитель в формуле (2.7) в условиях задачи всегда принимает положительные значения. Перепишем так же и знаменатель в виде неравенства, соответствующего положительным значениям:

$$\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} - \frac{d_{к}}{d_{ц}} - 1 > 0, \quad (2.24)$$

$$\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} > \frac{d_{к}}{d_{ц}} + 1. \quad (2.25)$$

Таким образом, знаменатель представляется как состоящий из двух частей:

- 1) $\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma}$ определяет вес столба налегающей толщи пород, оказывающей давление на целик, и сопротивление, действующее со стороны целика (следует из равновесия сил);
- 2) $\frac{d_{к}}{d_{ц}} + 1$ — определяется геометрическими параметрами целика и камер (следует из отношения площадей). Таким образом, в рамках каждого расчета выполняется

геометрическое подобие. Знак минус показывает, что выбраны слишком широкие камеры по отношению к размерам целика. Если выбрать размеры камер, сопоставимые с размерами целика, то с увеличением запаса увеличивается и расчетная ширина целика (формула 2.7). Полученные выводы говорят об ограниченности применения данного метода и формулы: не учтена возможность и не представлены поправки на отрицательные «-» значения ширины целиков. В этом случае также целесообразно рассматривать различные параметры для целиков, располагаемых на разных глубинах: для рассматриваемых горизонтов эти значения могут быть положительными, для остальных – отрицательными, что, как уже отмечалось, не имеет логического смысла в расчетах.

Подобным образом определим положительные значения ширины целика для конструктивного *Варианта 3* с применением вертикальных камер цилиндрической формы. Воспользуемся формулой (2.18), определив знаменатель через дробь и задав условие получения положительных значений:

$$\frac{\frac{R_{ц} - h_{ц}\gamma_{ц}}{nH\gamma} - 1}{\frac{R_{ц} - h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma}} > 0, \quad (2.26)$$

$$1 - \frac{1}{\frac{R_{ц} - h_{ц}\gamma_{ц}}{nH\gamma}} > 0, \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{\frac{R_{ц} - h_{ц}\gamma_{ц}}{nH\gamma}} < 1, \quad (2.28)$$

$$\frac{R_{ц}}{nH\gamma} - \frac{h_{ц}\gamma_{ц}}{H\gamma} > 1. \quad (2.29)$$

Полученное неравенство (2.29) схоже с неравенством (2.25), где выделяется две части: равновесие сил и геометрические параметры целика. Для вертикальных камер цилиндрической формы геометрические параметры по умолчанию не влияют на знак, стоящий перед вычисляемым значением ширины целика. Это аналогично *Варианту 2* расчетов для ленточных целиков ($d_{ц} \rightarrow \infty$ по Л.Д. Шевякову). Таким образом, при варианте системы разработки с применением вертикальных камер цилиндрической формы чувствительными на логичность получаемых значений (положительный знак) являются два параметра: высота целика $h_{ц}$ и глубина расположения целиков от земной поверхности H .

Все вышеуказанное позволяет обосновать первое научное положение «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».

Таблица 2.3 – Результаты аналитических расчетов ширины ленточного МКЦ $a_{ц}$ по *Варианту 2* для условий Соль-Илецкого рудника (рисунок 2.26)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности Н, м	Ширина b_k /длина d_k камеры, м	Ширина $a_{ц}$ /длина $d_{ц}$ целика, м	Высота целика $h_{ц}$, м	Расчетная ширина целика $a_{ц}$, м		
					n=1	n=2	n=3
1*	250**	28/250**	27/250**	30	5,147	12,962	26,246
2				40	5,185	13,206	27,269
3				50	5,223	13,460	28,374
4				60	5,263	13,724	29,573
1	400			30	9,255	28,714	95,969
2				40	9,332	29,469	104,963
3				50	9,411	30,266	115,817
4				60	9,491	31,106	129,175
1	600			30	16,632	88,395	-201,691
2				40	16,798	93,304	-180,072
3				50	16,968	98,791	-162,640
4				60	17,141	104,963	-148,284
1	1000			30	45,893	-133,369	-57,936
2				40	46,658	-127,305	-56,761
3				50	47,449	-121,769	-55,633
4				60	48,267	-116,694	-54,549
1* – существующие горнотехнические условия Соль-Илецкого рудника							
250** – средняя длина камер в этажах рудника, м							
Область применения аналитического метода – положительные значения ширины целика							

Таблица 2.4 – Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с квадратной сеткой их расположения с различными конструктивными элементами выемочного участка по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (размер модели (выемочной единицы, блока) 60×60×60 м) (рисунки 2.2в и 2.5)

№ модели	Объем модели, м ³	Горизонтальная площадь модели, м ²	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Минимальная ширина $a_{ц}$ (длина $d_{ц}$)/максимальная ширина $A_{ц}$ (длина $D_{ц}$) целика, м	Количество камер в модели/в ряду, шт.	Горизонтальная площадь пустот (камер) в модели ($S_{\Sigma км}$), м ²	Горизонтальная площадь массива каменной соли в целиках модели ($S_{\Sigma цм}$), м ²	Ширина ооконтуривающего целика, м	Эксплуатационные потери в целиках ($P_{цм}$), %
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 2.5 – Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ $a_{ц}$ для квадратной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (рисунки 2.2в и 2.5)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности H , 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	

Минимальную ширину целиков необходимо уточнять с учетом влияния продольного изгиба для МКЦ, у которых коэффициент формы (отношение ширины к высоте) составляет менее 0,5. При этом, наиболее эффективными методами являются численные методы расчета.

Таблица 2.6 – Результаты аналитических расчетов максимальной ширины МКЦ $A_{ц}$ для квадратной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (рисунки 2.2в и 2.5)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности H , м	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Максимальная ширина $A_{ц}$ (длина $D_{ц}$) целика, м	Высота целика $h_{ц}$, м	Расчетная максимальная ширина целика $A_{ц}$, м		
					n=1	n=2	n=3
1	250	2	2,5	60	1,931	2,163	2,541
2		2	3		1,931	2,163	2,541
3		3	3,75		2,897	3,245	3,811
4		3	4,5		2,897	3,245	3,811
5		4	5		3,863	4,326	5,082
6		4	6		3,863	4,326	5,082
7		5	6,25		4,828	5,408	6,352
8		5	7,5		4,828	5,408	6,352
9		6	7,5		5,794	6,489	7,623
10		6	9		5,794	6,489	7,623
1	400	2	2,5	60	2,050	2,575	4,198
2		2	3		2,050	2,575	4,198
3		3	3,75		3,076	3,862	6,298
4		3	4,5		3,076	3,862	6,298
5		4	5		4,101	5,149	8,397
6		4	6		4,101	5,149	8,397
7		5	6,25		5,126	6,436	10,496
8		5	7,5		5,126	6,436	10,496
9		6	7,5		6,151	7,724	12,595
10		6	9		6,151	7,724	12,595
1	600	2	2,5	60	2,250	3,861	С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной
2		2	3		2,250	3,861	
3		3	3,75		3,375	5,792	
4		3	4,5		3,375	5,792	
5		4	5		4,500	7,723	
6		4	6		4,500	7,723	
7		5	6,25		5,625	9,654	
8		5	7,5		5,625	9,654	
9		6	7,5		6,750	11,584	

10		6	9		6,750	11,584	формулой $n=0\div 2.4$
1	1000	2	2,5		2,925		С глубины $H=1000$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0\div 1.5$
2		2	3		2,925		
3		3	3,75		4,387		
4		3	4,5		4,387		
5		4	5		5,849		
6		4	6		5,849		
7		5	6,25		7,311		
8		5	7,5		7,311		
9		6	7,5		8,774		
10		6	9		8,774		

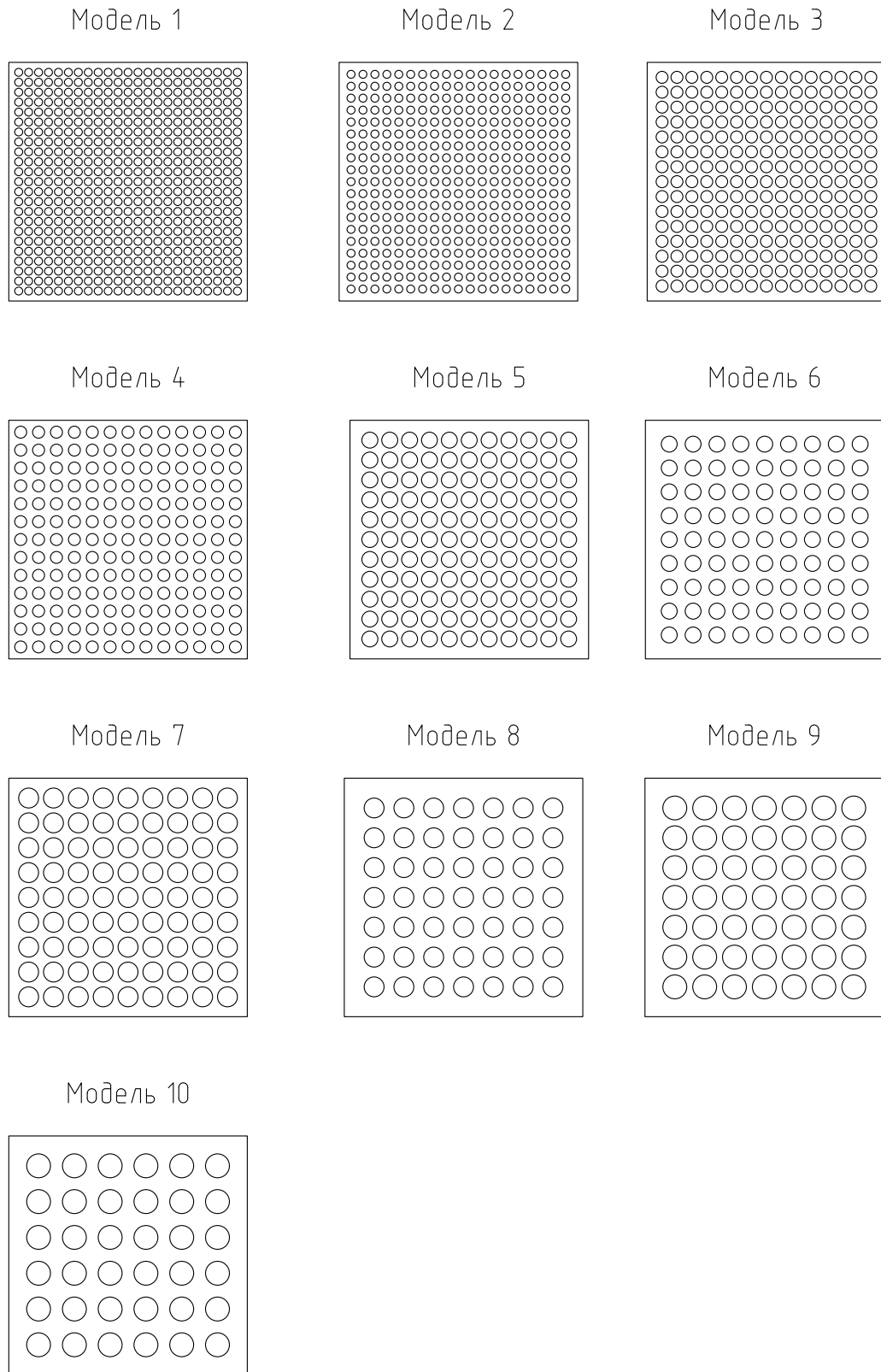


Рисунок 2.5 – Десять моделей с квадратной сеткой расположения вертикальных камер цилиндрической формы с различными размерами конструктивных элементов (ширина камер и целиков) выемочного участка (размер модели 60×60×60 м) (таблица 2.4)

Таблица 2.7 – Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с равносторонней треугольной сеткой их расположения с различными конструктивными элементами выемочного участка по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (размер модели (выемочной единицы, блока) 60×60×60 м) (рисунки 2.2г и 2.6)

№ варианта моделирования	Объем модели, м ³	Горизонтальная площадь модели, м ²	Диаметр (ширина, длина) камеры, м	Минимальная ширина целика $a_{ц}$ / максимальная ширина целика $A_{ц}$, м	Расстояние между камерами в ряду (количество камер в ряду по ширине модели)/ расстояние между рядами камер от их центров (количество рядов камер по длине модели), м	Количество камер в модели, шт.	Горизонтальная площадь пустот (камер) в модели ($S_{\Sigma КМ}$), м ²	Горизонтальная площадь массива каменной соли в целиках модели ($S_{\Sigma ЦМ}$), м ²	Ширина огибающей целика (запад-восток, север-юг - стороны в модели (рис. 4)), м	Эксплуатационные потери в целиках выемочного участка ($P_{цм}$), %
1	216000	3600	2	0,5/1,16	0,5 м (23 шт. (1 ряды) – 22 шт. (2 ряды))/ 2,16 м (26 шт.)	299 шт. (1 ряды) + 286 шт. (2 ряды) = 585 шт.	1836,9	1763,1	1,5 (запад-восток); 2 (север-юг)	48,97
2			1/1,59	1 м (19 шт. (1 ряды) – 18 шт. (2 ряды))/ 2,59 м (22 шт.)	209 шт. (1 ряды) + 198 шт. (2 ряды) = 407 шт.	1277,98	2322,02	2 (запад-восток); 1,8 (север-юг)	64,50	
3			0,75/1,74	0,75 м (15 шт. (1 ряды) – 14 шт. (2 ряды))/ 3,24 м (17 шт.)	135 шт. (1 ряды) + 112 шт. (2 ряды) = 247 шт.	1745,05	1854,94	2,25 (запад-восток); 2,58 (север-юг)	51,52	

4			3	1,5/2,39	1,5 м (13 шт. (1 ряды) – 12 шт. (2 ряды)/ 3,89 м (14 шт.)	91 шт. (1 ряды) + 84 шт. (2 ряды) = 175 шт.	1236,37	2363,62	1,5 (запад-восток); 3,21 (север-юг)	65,65
5			4	1/2,33	1 м (11 шт. (1 ряды) – 10 шт. (2 ряды)/ 4,33 м (13 шт.)	77 шт. (1 ряды) +60 шт. (2 ряды) = 137 шт.	1720,72	1879,28	3 (запад-восток); 2,02 (север-юг)	52,20
6			4	2/3,19	2 м (9 шт. (1 ряды) – 8 шт. (2 ряды)/ 5,19 м (11 шт.)	54 шт. (1 ряды) + 40 шт. (2 ряды) = 94 шт.	1180,64	2419,36	4 (запад-восток); 2,05 (север-юг)	67,20
7			5	1,25/2,91	1,25 м (9 шт. (1 ряды) - 8 шт. (2 ряды)/ 5,41 м (10 шт.)	45 шт. (1 ряды) + 40 шт. (2 ряды) = 85 шт.	1668,12	1931,87	2,5 (запад-восток); 3,15 (север-юг)	53,66
8			5	2,5/3,99	2,5 м (7 шт. (1 ряды) - 6 шт. (2 ряды)/ 6,49 м (9 шт.)	35 шт. (1 ряды) + 24 шт. (2 ряды) = 59 шт.	1157,87	2442,12	5 (запад-восток); 1,54 (север-юг)	67,83
9			6	1,5/3,49	1,5 м (7 шт. (1 ряды) - 6 шт. (2 ряды)/ 6,49 м (8 шт.)	28 шт. (1 ряды) + 24 шт. (2 ряды) = 52 шт.	1469,52	2130,48	4,5 (запад-восток); 4,28 (север-юг)	59,18
10			6	3/4,79	3 м (6 шт. (1 ряды) - 5 шт. (2 ряды)/ 7,79 м (6 шт.)	18 шт. (1 ряды) + 15 шт. (2 ряды) = 33 шт.	932,58	2667,42	4,5 (запад-восток); 7,52 (север-юг)	74,09

Таблица 2.8 – Результаты аналитических расчетов минимальной ширины МКЦ $a_{ц}$ для равносторонней треугольной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (рисунки 2.2г и 2.6)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности Н, м	Диаметр (ширина $b_{к}$, длина $d_{к}$) 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	0,075	0,324	0,730
2		2	1		0,075	0,324	0,730
3		3	0,75		0,113	0,487	1,096
4		3	1,5		0,113	0,487	1,096
5		4	1		0,151	0,649	1,461
6		4	2		0,151	0,649	1,461
7		5	1,25		0,188	0,811	1,826
8		5	2,5		0,188	0,811	1,826
9		6	1,5		0,226	0,973	2,191
10		6	3		0,226	0,973	2,191
1	400	2	0,5	60	0,203	0,767	2,511
2		2	1		0,203	0,767	2,511
3		3	0,75		0,305	1,150	3,767
4		3	1,5		0,305	1,150	3,767
5		4	1		0,407	1,533	5,023
6		4	2		0,407	1,533	5,023
7		5	1,25		0,508	1,916	6,279
8		5	2,5		0,508	1,916	6,279
9		6	1,5		0,610	2,300	7,534
10		6	3		0,610	2,300	7,534
1	600	2	0,5	60	0,418	2,149	С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0 \div 2.4$
2		2	1		0,418	2,149	
3		3	0,75		0,627	3,224	
4		3	1,5		0,627	3,224	
5		4	1		0,835	4,299	
6		4	2		0,835	4,299	
7		5	1,25		1,044	5,374	
8		5	2,5		1,044	5,374	
9		6	1,5		1,253	6,448	
10		6	3		1,253	6,448	
1	1000	2	0,5	60	1,143	С глубины $H=1000$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0 \div 1.5$	
2		2	1		1,143		
3		3	0,75		1,714		
4		3	1,5		1,714		
5		4	1		2,285		
6		4	2		2,285		
7		5	1,25		2,856		

8		5	2,5		2,856	
9		6	1,5		3,428	
10		6	3		3,428	

Минимальную ширину целиков необходимо уточнять с учетом влияния продольного изгиба для МКЦ, у которых коэффициент формы (отношение ширины к высоте) составляет менее 0,5. При этом, наиболее эффективными методами являются численные методы расчета.

Таблица 2.9 – Результаты аналитических расчетов максимальной ширины МКЦ $A_{ц}$ для равносторонней треугольной сетки расположения вертикальных камер по *Варианту 3* для условий Соль-Илецкого рудника (рисунки 2.2г и 2.6)

№ варианта	Глубина расположения целиков от земной поверхности H , м	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Максимальная ширина $A_{ц}$ (длина $D_{ц}$) целика, м	Высота целика $h_{ц}$, м	Расчетная максимальная ширина целика $A_{ц}$, м		
					n=1	n=2	n=3
1	250	2	2,5	60	0,797	1,013	1,365
2		2	3		0,797	1,013	1,365
3		3	3,75		1,196	1,520	2,047
4		3	4,5		1,196	1,520	2,047
5		4	5		1,595	2,026	2,729
6		4	6		1,595	2,026	2,729
7		5	6,25		1,993	2,533	3,412
8		5	7,5		1,993	2,533	3,412
9		6	7,5		2,392	3,039	4,094
10		6	9		2,392	3,039	4,094
1	400	2	2,5	60	0,908	1,396	2,907
2		2	3		0,908	1,396	2,907
3		3	3,75		1,362	2,094	4,360
4		3	4,5		1,362	2,094	4,360
5		4	5		1,816	2,792	5,814
6		4	6		1,816	2,792	5,814
7		5	6,25		2,270	3,490	7,267
8		5	7,5		2,270	3,490	7,267
9		6	7,5		2,724	4,188	8,721
10		6	9		2,724	4,188	8,721
1	600	2	2,5	60	1,094	2,593	С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной
2		2	3		1,094	2,593	
3		3	3,75		1,641	3,890	
4		3	4,5		1,641	3,890	
5		4	5		2,188	5,187	
6		4	6		2,188	5,187	
7		5	6,25		2,735	6,484	
8		5	7,5		2,735	6,484	
9		6	7,5		3,281	7,780	

10		6	9		3,281	7,780	формулой $n=0\div 2.4$
1	1000	2	2,5		1,722	С глубины $H=1000$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено расчетной формулой $n=0\div 1.5$	
2		2	3		1,722		
3		3	3,75		2,582		
4		3	4,5		2,582		
5		4	5		3,443		
6		4	6		3,443		
7		5	6,25		4,304		
8		5	7,5		4,304		
9		6	7,5		5,165		
10		6	9		5,165		

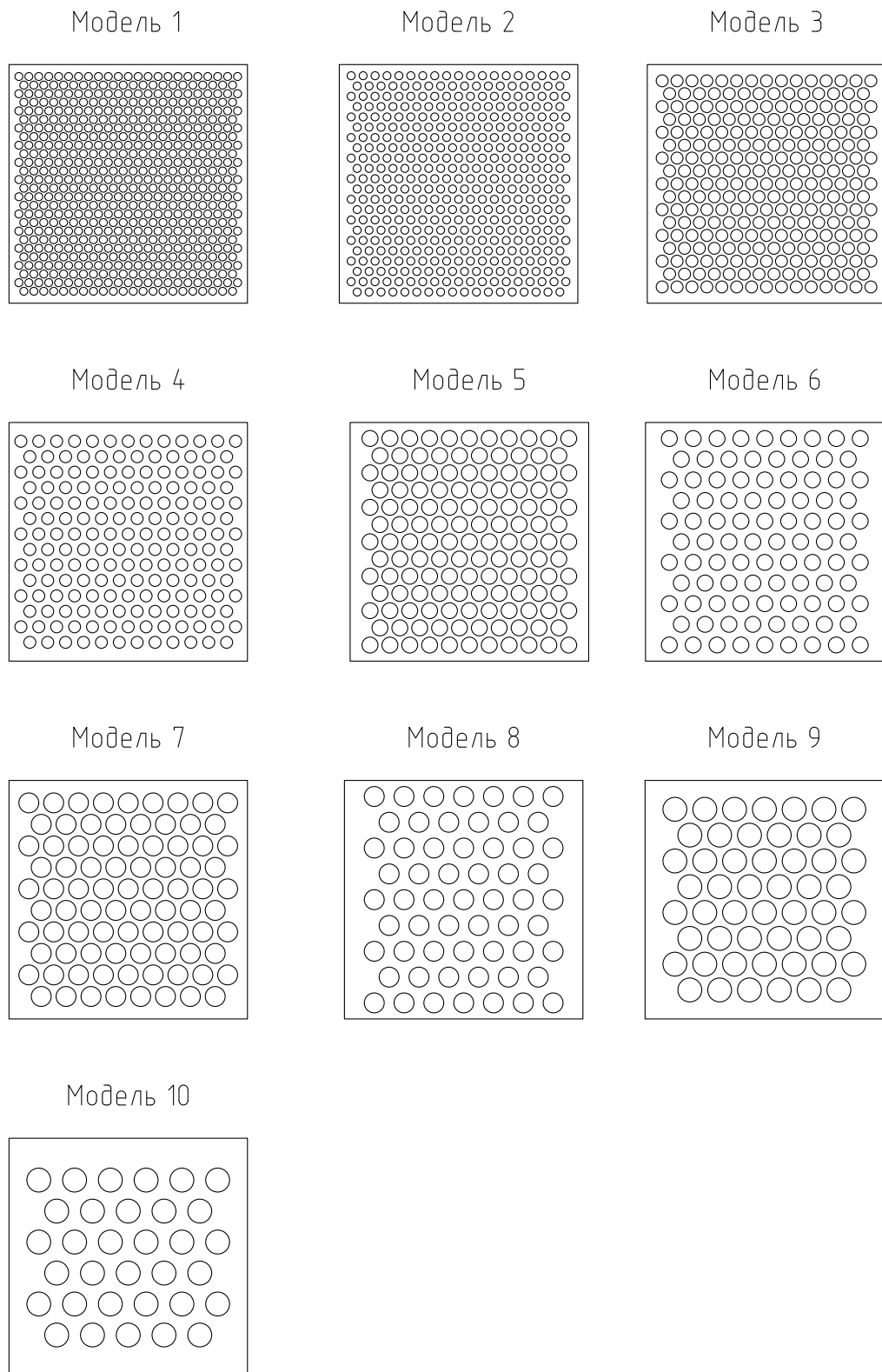


Рисунок 2.6 – Десять моделей с равносторонней треугольной сеткой расположения вертикальных камер цилиндрической формы с различными размерами конструктивных элементов (ширина камер и целиков) выемочного участка (размер модели 60×60×60 м) (таблица 2.7)

Выводы по второй главе

1. Представлены аналитические расчеты параметров конструктивных элементов и оценка устойчивости камерной системы разработки с оставлением МКЦ в классическом варианте отработки полезного ископаемого горизонтальными камерами и в варианте отработки вертикальными камерами цилиндрической формы методом выбуривания, которые позволяют уменьшить потери соли в целиках с сохранением устойчивости разрабатываемого массива.

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

2. Для расчетов устойчивости МКЦ за основу принята гипотеза Турнера-Шевякова для традиционных условий применения камерных систем разработки с оставлением МКЦ и с оставлением целиков в условиях разработки соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы.

3. 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.

4. Разработаны аналитические формулы расчета минимальной ширины столбчатых МКЦ ограниченных камерами и ленточных МКЦ для горнотехнических условий Соль-Илецкого рудника и физико-механических свойств каменной соли Илецкого месторождения.

5. Выполнены аналитические расчеты минимальной ширины ленточных МКЦ для горнотехнических условий Соль-Илецкого рудника и физико-механических свойств каменной соли Илецкого месторождения с коэффициентом запаса прочности $n=1, 2$ и 3 для глубин ведения горных работ 250, 400, 600 и 1000 м.

Определена ограниченность применения данного метода и формулы: не учтена возможность и не представлены в методике поправки на отрицательные «—» значения ширины МКЦ. В этом случае также целесообразно рассматривать различные параметры для целиков, располагаемых на разных глубинах: для рассматриваемых горизонтов эти значения могут быть положительными, для остальных – отрицательными, что не имеет логического смысла в расчетах.

6. Разработаны аналитические формулы расчета минимальной $a_{ц}$ и максимальной $A_{ц}$ ширины МКЦ для условий применения вертикальных очистных камер цилиндрической

формы, квадратной и равносторонней треугольной сетками их расположения, 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.

7. Выполнены аналитические расчеты минимальной $a_{ц}$ и максимальной $A_{ц}$ ширины МКЦ для условий применения сотовых горных конструкций условий и создания вертикальных очистных камер цилиндрической формы, квадратной и треугольной сеткой их расположения, 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. Определено допустимое значение коэффициента запаса прочности n МКЦ с определенным диапазоном ограниченное расчетной формулой.

Глава 3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы

3.1 Численное моделирование при изучении вопросов горного давления

Понимание процессов и масштабов развития зон нарушенности вмещающего подземные камеры соляного массива является важным аспектом при оценке его устойчивости, включающего МКЦ [47]. Зона нарушенности соляного массива – это зона образования и развития трещин вследствие техногенного нарушения его природной сплошности (еще называют «зоной пластичности»), в которой массив претерпевает необратимые нарушения и деформируется пластично.

Установлены основные причины образования зон нарушенности вокруг подземных камер: техногенное трещинообразование в результате влияния механизированного или взрывного способа проходки; хрупкое разрушение нетронутого массива под действием высокой концентрации перераспределенных напряжений вокруг камер; сдвиговое разрушение массива вдоль неоднородностей и новообразованных трещин.

Размеры зон изменяются от нескольких сантиметров вокруг камер, пройденных с применением механизированного способа отбойки в низко напряженных соляных массивах, до нескольких метров вокруг камер, пройденных с помощью буровзрывных работ (БВР) в сильнонапряженных массивах, а также зависят от физико-механических свойств массива, геометрической формы камер, способов и качества проходки (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Отжим массива каменной соли на контурах пересекающей МКЦ выработки (а) и МКЦ (б) на глубину до 0,5 м от обнажения с характерным образованием разрывных трещин (Соль-Илецкий рудник)

Для эксплицитного моделирования зон нарушенности соляного массива наиболее приемлемы метод дискретных элементов (МДЭ) с использованием, например, программного обеспечения UDEC, 3DEC, PFC, EDEM и др. и метод конечных элементов (МКЭ) с

использованием, например, таких программ как FLAC, Abaqus ELFIN, Plaxis и др., где зона пластической деформации моделируется в прямой форме. Модели при этом довольно точно отображает реальный механизм разрушения массива [48-50].

Свойства массива, необходимые для введения в численную модель, очень сложно определить с приемлемой точностью вследствие большого количества погрешностей, например, на дискретную, неоднородную, анизотропную, неупругую природу массивов, или на величину и направления действия главных природных напряжений, что значительно снижает достоверность результатов моделирования [48].

Для детальной количественной оценки входных параметров в модель можно применять ретроспективный анализ отклика массива на проведение камер, основанный на так называемом наблюдательном методе Терзаги (рис. 3.2а) [51] с использованием линейного (упругого) моделирования методом граничных элементов (МГЭ) с применением таких программных пакетов как, например, Map3D, Examine3D и др. или МКЭ с использованием программ Midas, Fidesys и др. Адаптация метода Терзаги к линейному моделированию представлена на рис. 3.2б. По мере развития горных работ модель становится все более и более откалиброванной. Традиционно отклик массива на проходку вертикальных камер цилиндрической формы наблюдают визуально или с помощью инструментов. В диссертационной работе рассматривается характер деформирования вертикальных камер цилиндрической формы в натуральных условиях их поддержания на Илецком месторождении каменной соли на глубине 250÷390 м от земной поверхности, а также для проектируемых глубин до 1060 м. Хорошо откалиброванная модель позволяет осуществлять обоснованно достоверный прогноз поведения массива [48].

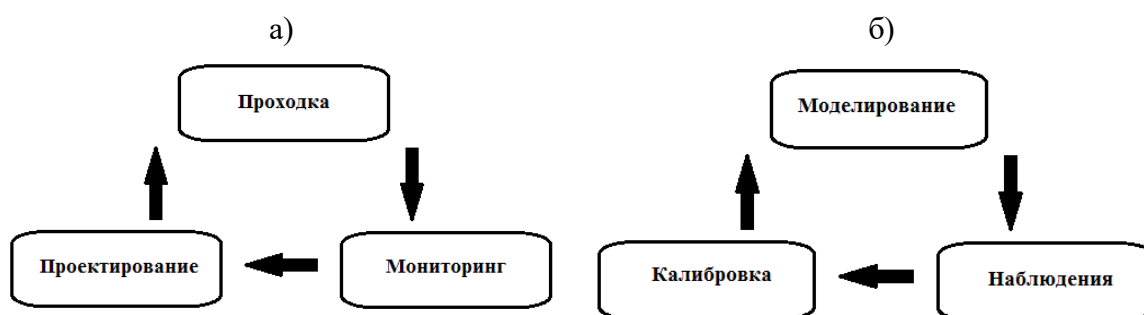


Рисунок 3.2 – Наблюдательный метод Терзаги применяемый при проектировании (а) и численном моделировании (б) [48]

Недостатком известных в настоящее время классических [52, 53 и др.] и недавно разработанных [27, 54 и др.] критериев разрушения массивов состоит в том, что они учитывают только максимальные и минимальные главные напряжения, что определяет преимущественно сдвиговой механизм разрушения. В натуральных же условиях, особенно на глубоких рудниках, вокруг камер наблюдаются возникшие слои параллельных трещин.

Данный тип разрушения называют растрескиванием. В настоящее время общепризнанным является тот факт, что эти трещины, называемые трещинами растяжения, возникают под действием высоких сил сжатия. Данный вид разрушения относится не к сдвигу, а к растяжению [28, 48, 55, 56]. Происходит процесс второстепенного растяжения, даже при условии, что все три главные компоненты напряжения сжимающие. Этот процесс определяется критерием растягивающей деформации [57], согласно которому: «Массив начинает разрушаться при всестороннем сжатии, когда вторичное растягивающее напряжение превышает определенный предел свойственный данному массиву», т.е.:

$$\varepsilon_3 \geq \varepsilon_c \quad (3.1)$$

где ε_3 – растягивающая деформация; ε_c – предельное (критическое) значение растягивающей деформации [48].

Растягивающая деформация возникает в направлении действия минимального главного напряжения и описывается следующим уравнением:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)], \quad (3.2)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения, E – модуль Юнга массива, ν – коэффициент Пуассона.

Трещины растяжения образуются в плоскостях, перпендикулярных направлению действия минимального главного напряжения. Критерий растягивающей деформации применим для массивов от очень крепких и хрупких до мягких [48].

В зонах нарушенности соляного массива трещины растяжения вступают во взаимодействие с природными нарушениями сплошности массива и могут вызвать значительные вывалы. Планы измеренных расстояний от обнажений до границ образования трещин растяжений необходимо совмещать с контурами растягивающих деформаций, полученными с помощью численного моделирования [50]. Путем варьирования упругими свойствами массива (например, E и ν) достигается соответствие между контурами деформаций растяжения и планами глубины деформирования массива от обнажений до границ образования трещин растяжений. В результате проведения подобной калибровки определяется критерий разрушения по механизму растяжения для конкретного участка рудника [48].

В качестве показателя, характеризующего состояние вторичного поля напряжений, принята относительная деформация растяжения массива $\varepsilon_3 = \Delta L/L$, ΔL – изменение исходного размера деформируемого объекта, м; L – исходный размер деформируемого объекта, м [25].

При проведении лабораторных исследований установлено, что первые трещины в каменных солях регистрируются при уровне деформаций растяжения $\varepsilon_3 = 0,0002$, что

является критическим значением объемного трещинообразования [55, 56]. В шахтных условиях при значениях $\varepsilon_3 \approx 0,00035$ в каменных солях отмечаются первые трещины растяжения, а с увеличением ε_3 до 0,0005 – 0,0008 и более массив начинает интенсивно деформироваться, образуются своды и зоны возможного обрушения массива (таблица 3.1). Поэтому в качестве численного критерия, определяющего внешнюю границу вторичного поля напряжений, принято значение $\varepsilon_3 = 0,00035$ соответствующее деформации, при которой наблюдаются первые трещины в массиве каменной соли [25].

Таблица 3.1 – Откалиброванные значения деформаций растяжения при проходке камер в каменной соли

Состояние массива каменной соли	Деформация растяжения, ε_3	Раскрытие трещин
Раздробленный (смятый)	$>0,0005$	>5 мм
Сильно нарушенный	0,00045–0,0005	до 5 мм
Нарушенный	0,00035–0,00045	до 2 мм
Трещиноватый	0,00025–0,00035	~ 0–1 мм
Зарождение трещин	0,00015	Неразличимы

При проведении исследований выполнено численное моделирование НДС сотовых горных конструкций, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы (рисунки 2.1, 2.2 и 2.5) [49, 50, 58].

Для численных 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 [12, 25, 58-63].

Критериями для оценки устойчивости целиков и вмещающего массива выработок применялись: напряжение σ_{max} (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности вмещающего массива и целиков КЗП, а также смещение массива X [25].

Избыточное напряжение $\Delta\sigma$ – это критерий, который показывает наличие напряжения в массиве, которое по своей величине больше прочностных свойств и характеристик соляных пород в рассматриваемых естественных условиях, а не в образцах. Если значение избыточного напряжения $\Delta\sigma < 0$, то оно меньше прочности породы и массив и выработки находятся в устойчивом состоянии. Если $\Delta\sigma > 0$, то напряжение превышает прочность соляной породы и на контуре выработки возможны шелушение, интенсивное заколообразование и другие негативные факторы проявления горного давления.

Для оценки НДС массива горных пород в результате действия избыточного напряжения (т.е. напряжения, превышающего предельное) при упругом анализе использовался критерий прочности Хука-Брауна, который является функцией максимального и минимального значений главных напряжений, а также прочностных свойств массива горных пород. Этот критерий особенно хорошо подходит для оценки устойчивости соляного массива, которым представлены рассматриваемые условия [4].

В качестве критерия нарушенности МКЦ применяется коэффициент запаса прочности КЗП (SF – английская версия аббревиатуры КЗП, программная), определяемый следующим образом:

$$SF = \frac{\text{Прочность}}{\text{Давление}} = \frac{(\sigma_c + q\sigma_3)}{\sigma_1}, \quad (3.3)$$

где σ_c – предел прочности породы на одноосное сжатие в массиве, МПа; σ_1 – главное максимальное напряжение, МПа; σ_3 – главное минимальное напряжение, МПа.

$$q = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}, \quad (3.4)$$

где φ – угол внутреннего трения породы в массиве, град.

Результаты численных расчетов максимальных смещений X вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива в сотовом исполнении горной конструкции на завершающей расчетной стадии для различных исследуемых глубин оценивались по критерию неустойчивости вмещающего массива применяемому к численным моделям разработанного компанией Abaqus на основе большого количества шахтных наблюдений и сопоставления их с результатами численного моделирования (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Критерий неустойчивости вмещающего массива применяемый к численным моделям

№№	Диапазон максимальных смещений X*, м	Описание процессов и событий
1	0.000÷0.075	Низкая вероятность деформаций и обрушений
2	0.076÷0.140	Средняя вероятность деформаций и обрушений
3	0.141÷0.260	Вероятны малообъемные обрушения
4	0.261÷0.480	Вероятны среднеобъемные обрушения (КЗП**<1,3÷1,5)
5	0.481÷>>0.65	Вероятны крупнообъемные обрушения (КЗП**<1,2÷1,3)
*Определен по результатам многолетних натуральных наблюдений **Допустимым коэффициентом запаса прочности целиков (при проектировании параметров горных работ) при численном анализе в условиях высокой степени достоверности исходных входных параметров в численную модель считается КЗП ≥1,5		

3.2 Варианты конструктивного исполнения численных моделей

Для проведения численного моделирования разработаны варианты конструктивного исполнения моделей, которые представлены в таблице 3.3, согласованные с условиями разработки выемочного участка (блока) Илецкого месторождения каменной соли. 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. Высота блока и диаметры камер выбраны с учетом эффективной возможности применяемого бурового оборудования на выбранную высоту блока как высоту двух сдвоенных этажей высотой 30 м. Геометрические параметры численных моделей и их конструктивных элементов с соотношением площадей пустот (вертикальных камер) и массива каменной соли, а также физико-механические свойства каменной соли и условия моделирования представлены в таблицах 2.2, 2.4-2.6 и на рисунках 2.2, 3.3.

Таблица 3.3 – 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
Варианты рассматриваемых глубин горных работ от земной поверхности	м	250 ÷ 310 м 400 ÷ 460 м 600 ÷ 660 м 1000 ÷ 1060 м
Главные напряжения при гидростатическом исходном поле напряжений	кН/м ²	$\sigma_1 = \gamma H$ (вертикальное) $\sigma_2 = \gamma H$ (горизонтальное) $\sigma_3 = \gamma H$ (горизонтальное)

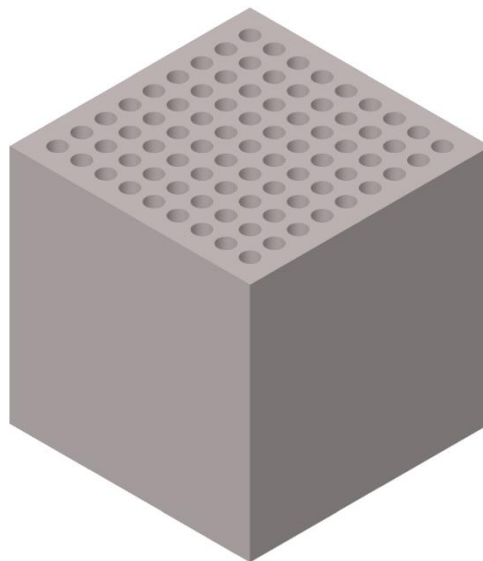


Рисунок 3.3 – 3D изображение 6-й модели (см. рисунок 2.2) блока размерами 60×60×60 м (ширина камер 4 м, ширина целиков 2 м), подготовленной для численного моделирования

3.3 Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования рассматривались по двум разрезам по каждой модели: горизонтальному и вертикальному в центральной части блоков (рисунок 3.4).

В качестве примера на рисунках 3.5-3.7 представлены результаты численных расчетов максимальных действующих вертикальных напряжений σ_{max} , коэффициентов запаса прочности КЗП МКЦ и смещений X вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива в сотовом исполнении горной конструкции на завершающей расчетной стадии на глубинах 400-460 м и 1000-1060 м в модели 6 (рисунки 2.2, 3.3). Маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки (рисунки 3.5-3.10).

Максимальное вертикальное напряжение для рассматриваемых условий регистрируется в модели 6 со значением $\sigma_{max} = 17,741$ МПа (рисунок 3.5) и не превышает предела прочности каменной соли (таблица 2.2).

Вмещающий массив каменной соли на глубине 400 м находится в устойчивом состоянии $KЗП > 1$ ($KЗП = 1,04 \div 19,41$) (рисунок 3.6), 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.

Вмещающий массив каменной соли на глубине 1000 м находится как в устойчивом состоянии $KЗП > 1$, так и в неустойчивом состоянии $KЗП \leq 1$ ($KЗП = 0,81 \div 42,19$) (рисунок 3.9). При условии, если $KЗП \leq 1$ регистрируются пластические деформации и массив разрушается.

Максимальное смещение на глубине 400 м регистрируется в модели со значением $X = 0.00342$ м (рисунок 3.7), что соответствует смещениям, которые входят в категорию низких вероятностей деформаций и обрушений (таблица 3.2); на глубине 1000 м $X = 0.00867$ м (рисунок 3.10) входят в категорию средних вероятностей деформаций и обрушений, возможны сверх малообъемные обрушения вмещающего массива.

Результаты численного моделирования по моделям 1-10 (рисунок 2.2) для рассматриваемых глубин $250 \div 310$, $400 \div 460$, $600 \div 660$ и $1000 \div 1060$ м представлены в Приложении А диссертационной работы.

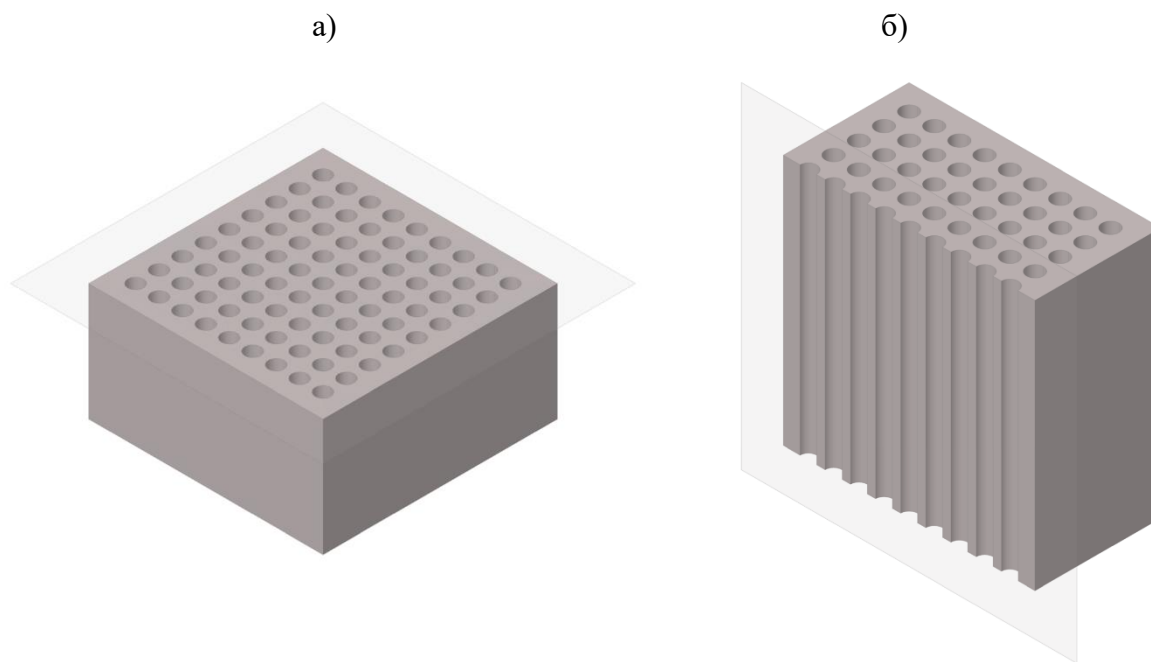


Рисунок 3.4 – Горизонтальный (а) и вертикальный (б) разрезы модели 6 (исследуемые области)

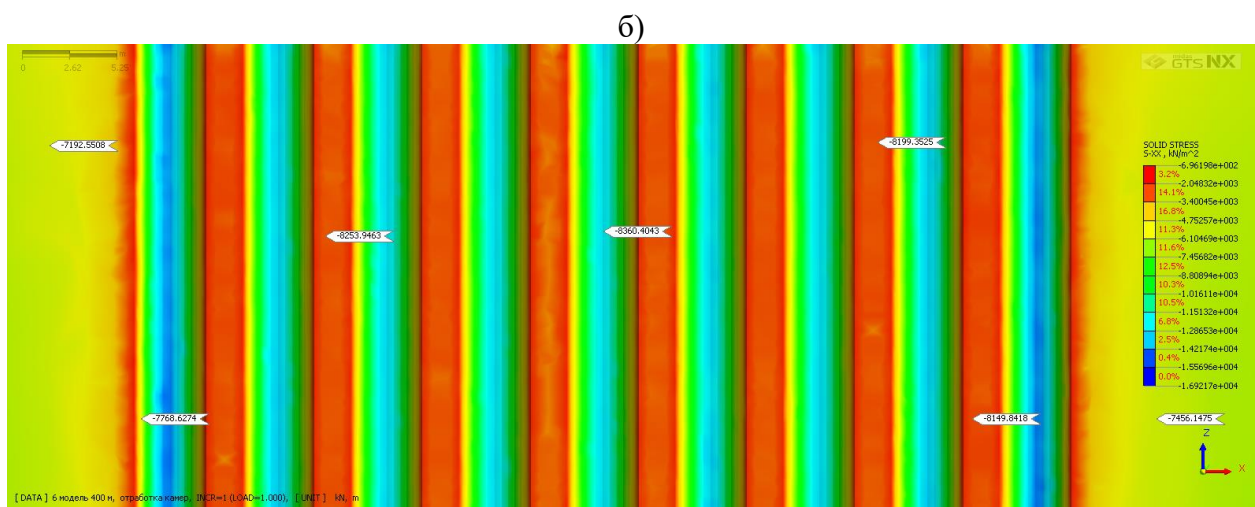
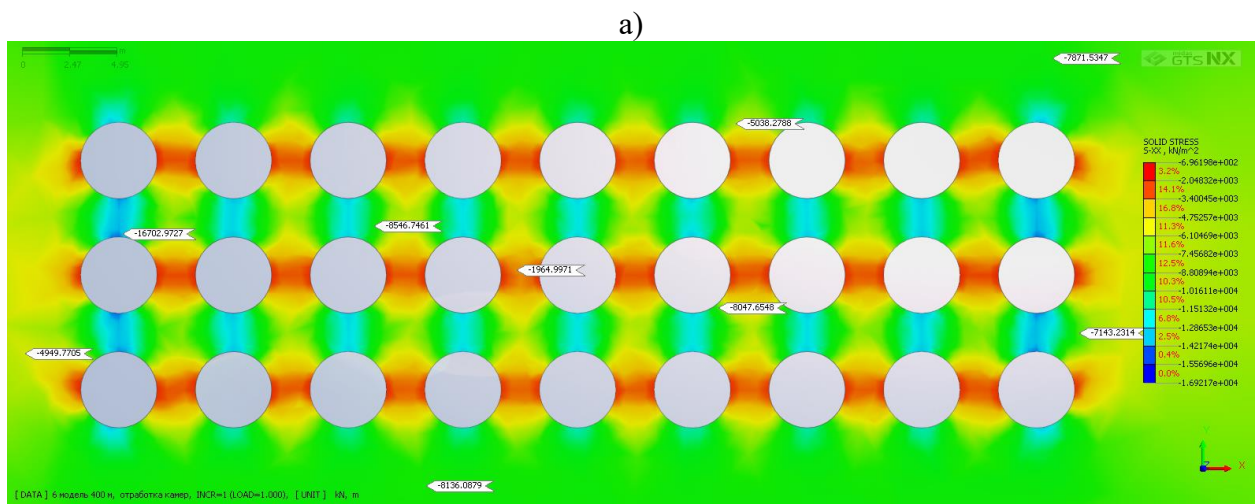
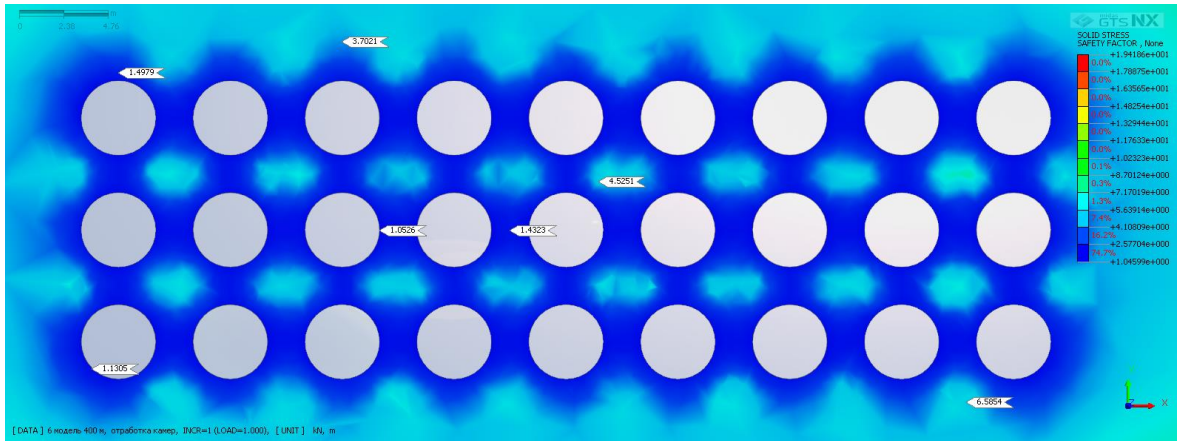


Рисунок 3.5 – Результаты численного моделирования в программе Midas НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением максимальных напряжений во вмещающем массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0,696 \div 16,922$ МПа; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

а)



б)

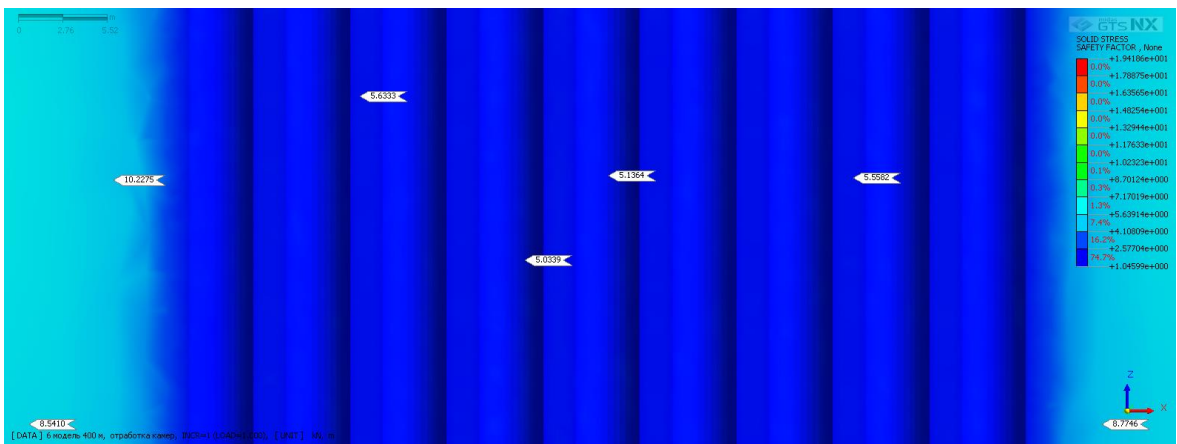
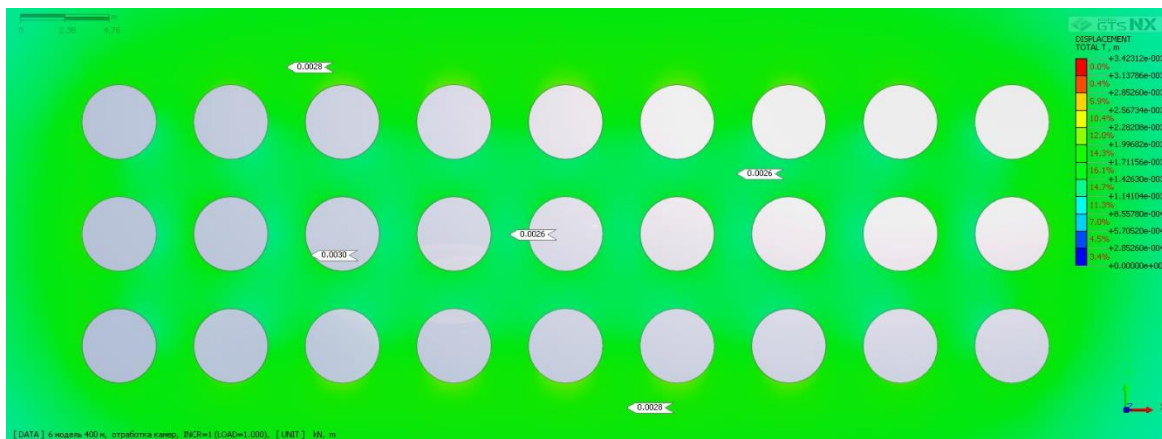


Рисунок 3.6 – Результаты численного моделирования НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением КЗП вмещающего массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП 1,04÷19,4; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

а)



б)

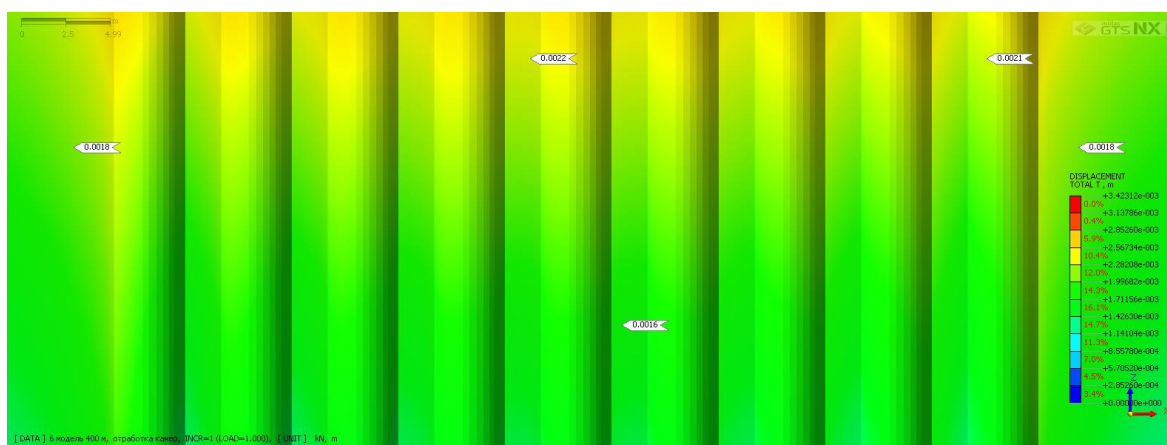
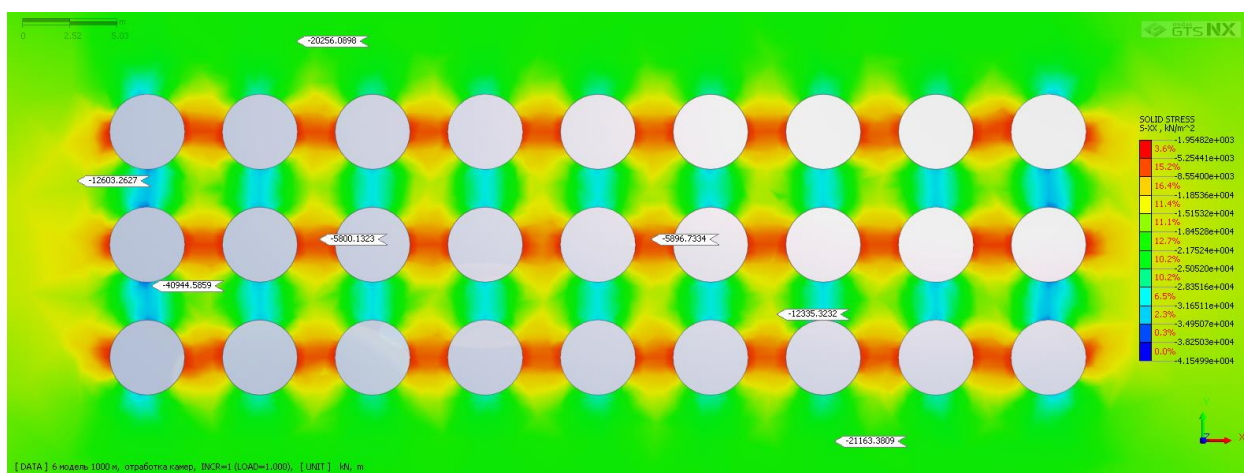


Рисунок 3.7 – Результаты численного моделирования НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением максимальных смещений вмещающего массива на глубине Н=400 м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений 0.00000÷0.00342 м; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

а)



б)

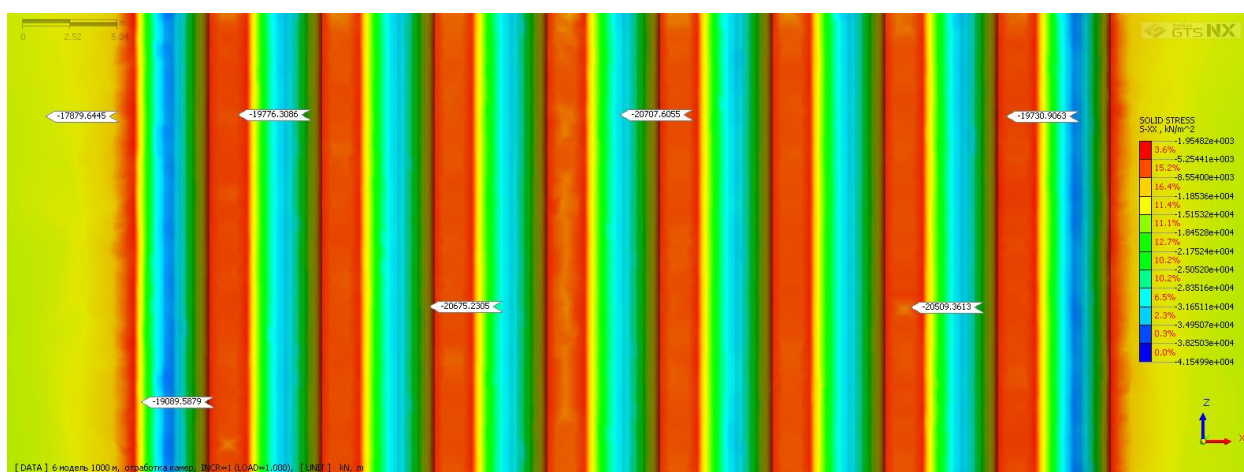
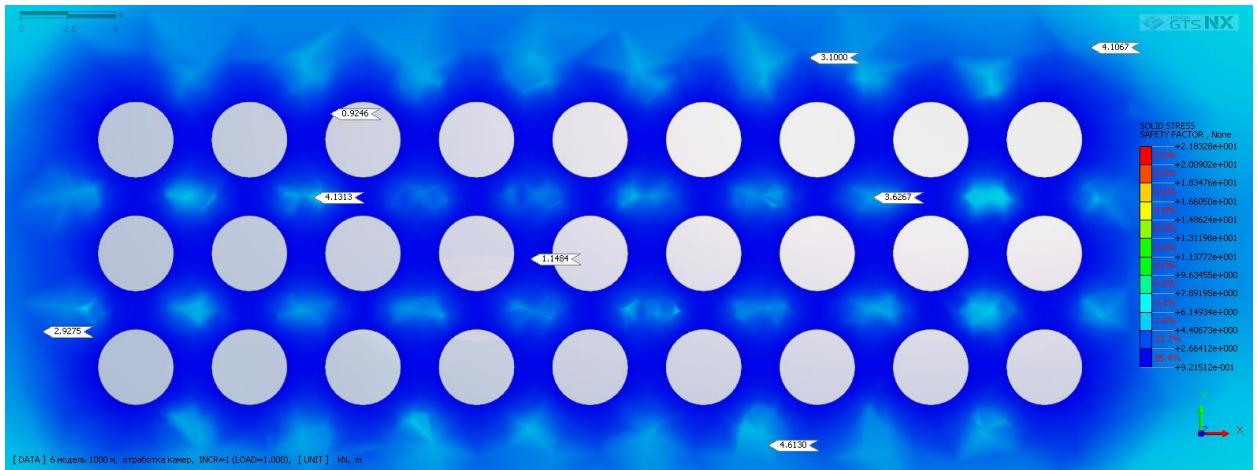


Рисунок 3.8 – Результаты численного моделирования в программе Midas НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением максимальных напряжений во вмещающем массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S_{-XX} – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0,027\div 66,216$ МПа; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

а)



б)

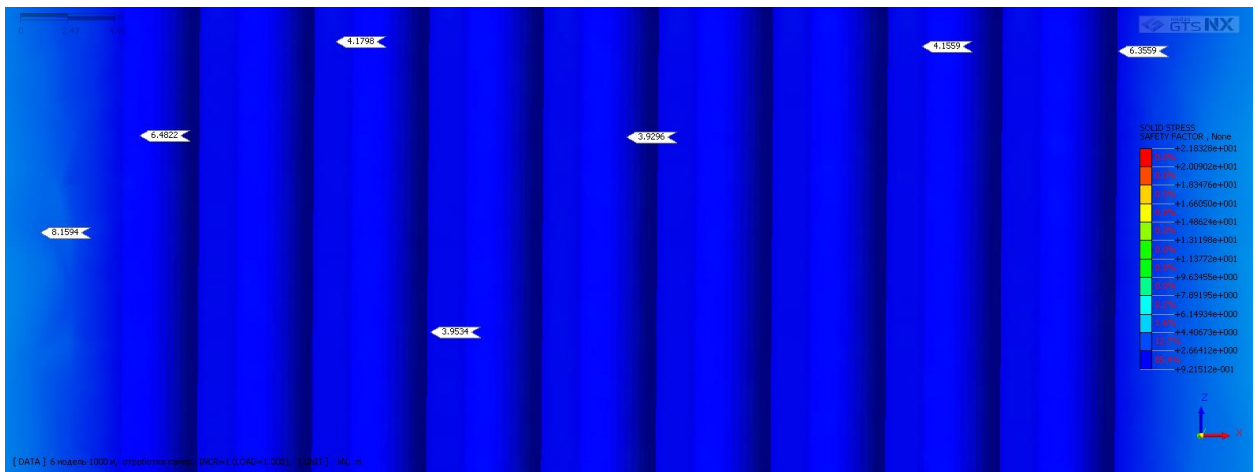
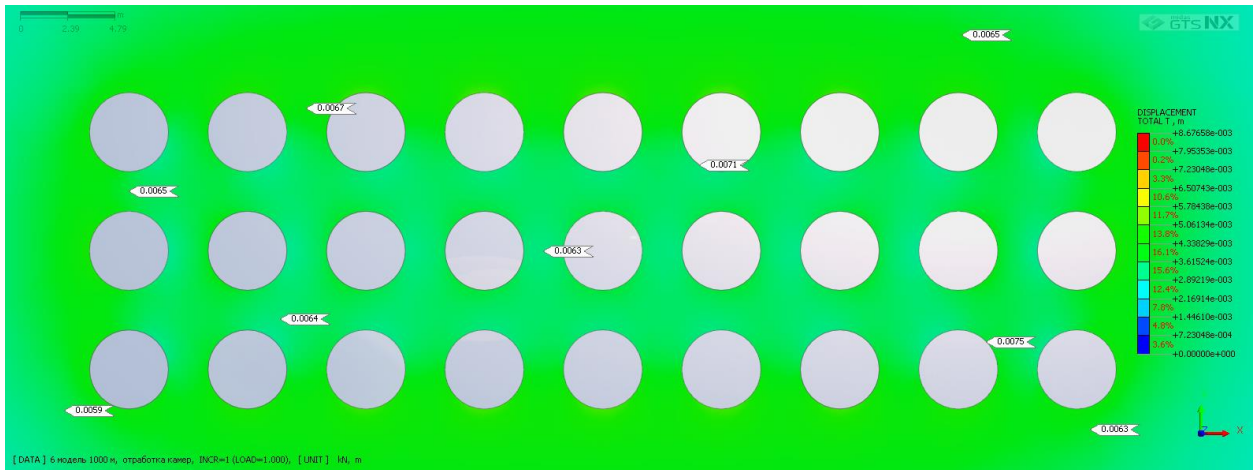


Рисунок 3.9 – Результаты численного моделирования НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением КЗП вмещающего массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0,81\div 42,19$; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

а)



б)

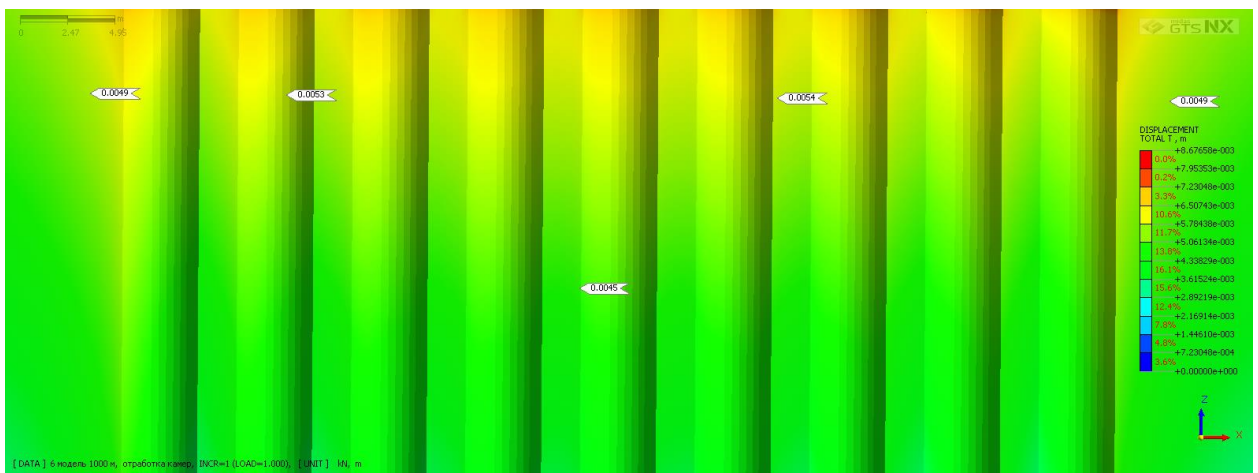


Рисунок 3.10 – Результаты численного моделирования НДС сотовой горной конструкции (модель б) с определением максимальных смещений вмещающего массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00867$ м; маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки.

В таблице 3.4 представлены диапазоны изменения количественных значений критериев численной оценки НДС сотовых горных конструкций (напряжение σ_{max} (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности вмещающего массива и целиков КЗП, смещение массива X) по моделям 1-10 (рисунки 3.5-3.10 и в Приложении А) для рассматриваемых глубин 250÷310, 400÷460, 600÷660 и 1000÷1060 м, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы.

В таблице 3.4 курсивом выделены те значения критериев оценки, которые определяют массив как неустойчивый: $\sigma_{max} \geq \sigma_{сж}$; $КЗП \leq 1$ и $X = 0.0141 \div > > 0.65$. В процессе проведения интерпретации результатов численного моделирования установлено:

1. Значения $\sigma_{max} \geq \sigma_{сж}$ ($\sigma_{сж} = 35$ МПа) регистрируются в численных моделях 1-10 на глубине 1000 м. На данной глубине не рекомендуется применение сотовых горных конструкций с заданными параметрами моделей, необходимо уменьшить высоту камер или увеличить ширину целиков, или выполнить и то и другое одновременно.

2. $КЗП \leq 1$ регистрируется в численных моделях 1-10 на глубинах 400, 600 и 1000 м, но их процентное соотношение со значениями $КЗП > 1$ предельно мало, на глубине 400 м от 0,1 до 0,25%, на глубине 600 м от 0,2 до 0,5%, на глубине 1000 м в моделях 1-6 от 0,3 до 0,6%, при этом глубина нарушенного горным давлением массива также предельно мала и не нарушает целостности МКЦ. На глубине 1000 м в моделях 7-10 регистрируется глубина нарушенного горным давлением массива достаточная для нарушения целостности МКЦ, не рекомендуется применение сотовых горных конструкций с заданными параметрами моделей 7-10 на глубине 1000 м, необходимо уменьшить высоту камер или увеличить ширину целиков, или выполнить то и другое одновременно.

3. Во всех моделях регистрируются значения смещения $X < 0.0141$, что соответствует устойчивому состоянию массива.

4. 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.

Таблица 3.4 – Диапазоны изменения количественных значений критериев численной оценки НДС сотовых горных конструкций по моделям 1-10

Модель 1				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.829÷11.410	0.303÷18.300	0.691÷27.486	0.952÷45.439
КЗП	1.00÷37.77	0.91÷36.41	0.91÷24.72	0.91÷26.91
X, м	0.00000÷0.00188	0.00000÷0.00299	0.00000÷0.00449	0.00000÷0.00759
Модель 2				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.319÷10.800	0.568÷17.317	1.068÷26.090	2.124÷43.400
КЗП	1.12÷20.80	0.95÷23.57	0.92÷26.35	0.92÷30.03
X, м	0.00000÷0.00143	0.00000÷0.00227	0.00000÷0.00341	0.00000÷0.00572
Модель 3				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.819÷11.862	1.344÷19.045	2.247÷28.604	0.976÷45.088
КЗП	1.09÷17.70	0.94÷18.95	0.91÷20.04	0.91÷20.93
X, м	0.00000÷0.00230	0.00000÷0.00366	0.00000÷0.00549	0.00000÷0.00950
Модель 4				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.848÷10.800	1.422÷17.318	0.219÷26.102	1.868÷42.201
КЗП	1.14÷19.02	0.97÷20.90	0.92÷22.66	0.92÷24.83
X, м	0.00000÷0.00183	0.00000÷0.00291	0.00000÷0.00436	0.00000÷0.00736
Модель 5				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.863÷11.195	1.449÷17.932	0.139÷26.933	0.889÷43.447
КЗП	1.13÷16.46	0.97÷17.26	0.91÷17.93	0.91÷18.58
X, м	0.00000÷0.00275	0.00000÷0.00437	0.00000÷0.00655	0.00000÷0.01128
Модель 6				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.384÷10.537	0.696÷16.921	1.195÷25.467	1.954÷41.549
КЗП	1.24÷18.17	1.04÷19.41	0.94÷20.44	0.92÷21.83
X, м	0.00000÷0.00215	0.00000÷0.00342	0.00000÷0.00513	0.00000÷0.00867
Модель 7				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.717÷10.841	1.342÷17.426	2.137÷26.224	0.684÷42.475
КЗП	1.16÷14.66	0.99÷14.89	0.91÷15.03	0.91÷15.15
X, м	0.00000÷0.00311	0.00000÷0.00494	0.00000÷0.00740	0.00000÷0.01259
Модель 8				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.314÷10.398	0.592÷16.699	1.129÷25.167	1.975÷41.144
КЗП	1.28÷17.03	1.06÷18.03	0.95÷18.86	0.92÷19.74
X, м	0.00000÷0.00240	0.00000÷0.00380	0.00000÷0.00570	0.00000÷0.00967
Модель 9				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м
σ_1 , МПа	0.009÷10.730	0.014÷17.258	0.038÷25.963	0.649÷42.393
КЗП	1.18÷13.88	0.96÷13.76	0.86÷13.63	0.91÷14.57
X, м	0.00000÷0.00327	0.00000÷0.00520	0.00000÷0.00780	0.00000÷0.01341
Модель 10				
	H =250 м	H=400 м	H=600 м	H=1000 м

σ_1 , МПа	0.293÷10.065	0.529÷16.180	0.875÷24.375	1.453÷40.203
КЗП	1.31÷17.78	1.08÷19.21	0.96÷20.40	0.92÷21.53
X, м	0.00000÷0.00271	0.00000÷0.00430	0.00000÷0.00644	0.00000÷0.01084

Проектирование параметров горнотехнических систем необходимо проводить по результатам численного моделирования с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель при условии, что $KЗП \geq 1,5$. Разработан график (рисунок 3.11), 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 [40, 41, 64-67].

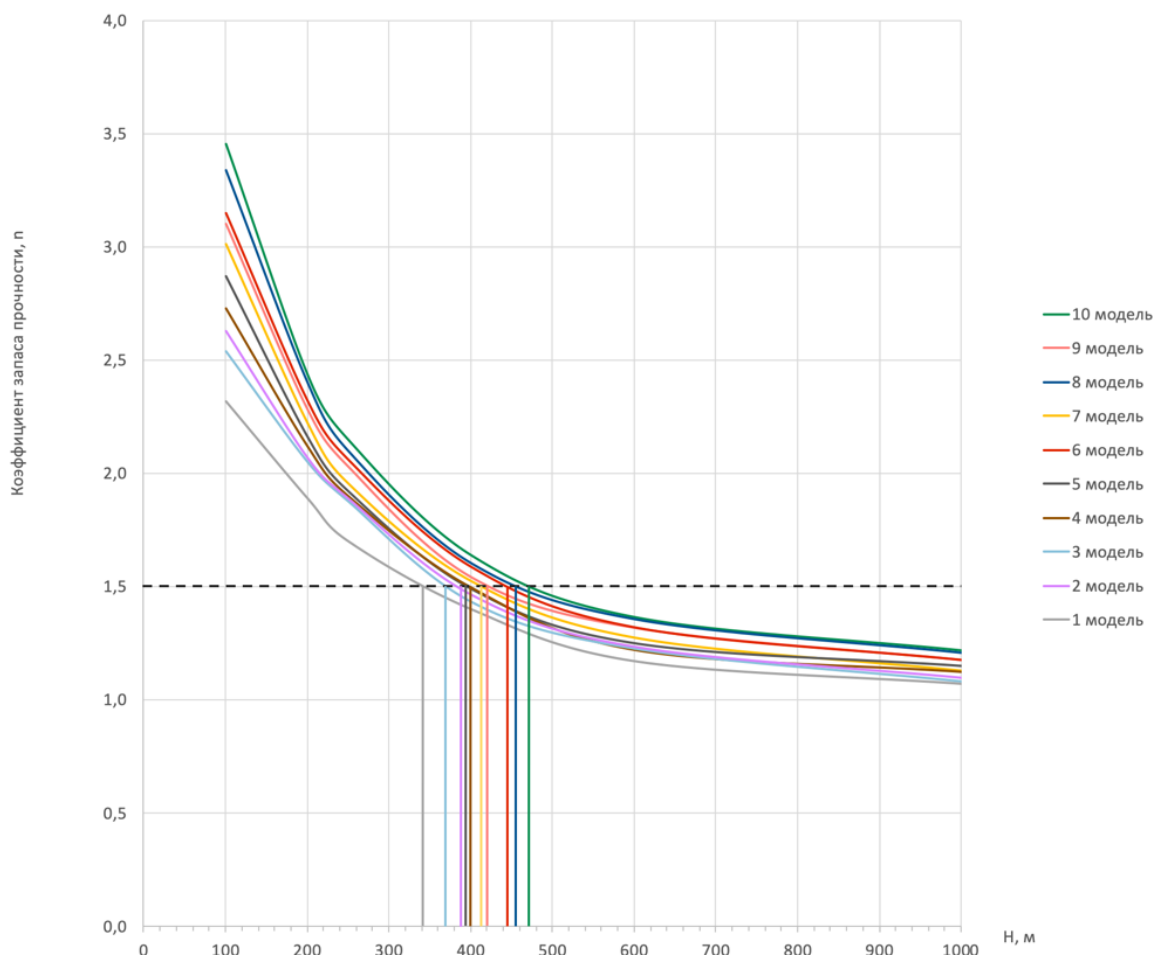


Рисунок 3.11 – График изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимая глубина применения моделей №№1-10. $KЗП \geq 1,5$ – допустимый предел проектирования горнотехнических систем с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель.

Все вышеуказанное позволяет обосновать второе положение «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».

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 2.4). Установлена закономерность распределения устойчивости численных моделей к действующим нагрузкам, представленная в таблице 3.5 и на рисунке 3.12: 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 [40, 41, 64-67]. При этом закономерно регистрируется при меньшей ширине целика меньшие значения несущей способности моделей.

Таблица 3.5 – Рейтинг численных моделей по устойчивости при различных соотношениях ширины камер и целиков

№ модели	Нагрузка на модель P_n ($n \geq 1,5$), кН/м ²	Рейтинг модели по устойчивости от 1 (максимально устойчивый) до 10 (минимально устойчивый)	Ширина камеры $b_{к}$, 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

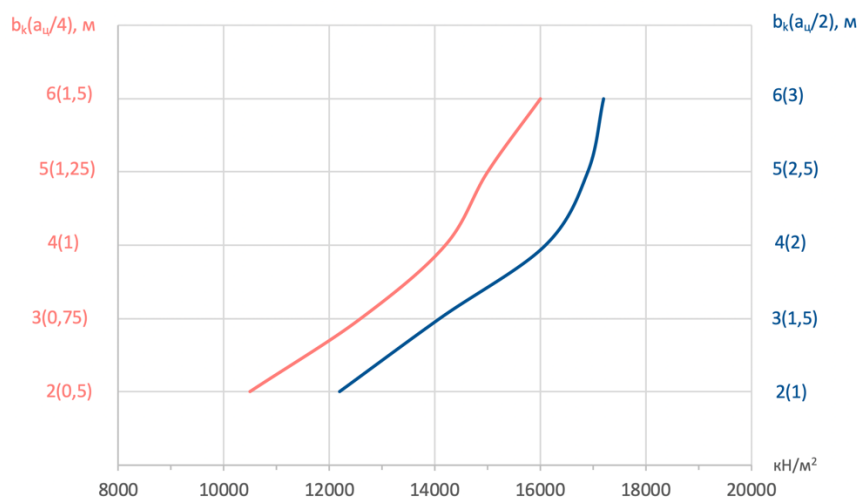


Рисунок 3.12 – Изменение действующих нагрузок на численную модель при $n \geq 1,5$ (P_n , кН/м²) при изменении ширины камер b_k и целиков a_c . Синяя кривая – при ширине целика в два раза меньшей чем ширина камеры; Красная кривая – при ширине целика в четыре раза меньшей чем ширина камеры.

Все вышеуказанное позволяет обосновать третье положение «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».

Выводы по третьей главе

1. Исследованы возможности решения задач определения устойчивости МКЦ как конструктивных элементов традиционных камерных систем разработки с оставлением целиков и новых систем, включающих сотовые горные конструкции с использованием численного моделирования.

2. Определены критерии оценки результатов численного моделирования для определения устойчивости целиков и вмещающего массива выработок: напряжение σ_{max} (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности вмещающего массива и целиков КЗП, смещение массива X .

3. Для определения устойчивости вмещающего массива выработок на основе численных расчетов максимальных смещений X использован критерий неустойчивости вмещающего массива, применяемый к численным моделям и разработанный компанией Abaqus на основе большого количества шахтных наблюдений.

4. Разработаны десять 3D численных моделей сотовых горных конструкций, включающие вертикальные камеры цилиндрической формы с изменяющимися параметрами системы (диаметр описанной окружности камеры, форма и размеры целиков) для оценки их НДС на глубинах 250÷310, 400÷460, 600÷660 и 1000÷1060 м в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли.

5. Представлены результаты численных расчетов несущей способности десяти моделей сотовых горных конструкций, расположенных на глубинах 250÷310, 400÷460, 600÷660 и 1000÷1060 м в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы с изменяющимися параметрами системы. Результаты численного моделирования определялись по двум разрезам по каждой модели: горизонтальному и вертикальному в центральной части блоков.

6. Проведена оценка НДС десяти 3D численных моделей сотовых горных конструкций, расположенных на глубинах 250÷310, 400÷460, 600÷660 и 1000÷1060 м по критериям: напряжение σ_{max} (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), коэффициент запаса прочности вмещающего массива и целиков КЗП и смещение массива X .

7. Для проектирования горнотехнической системы рудника установлены критические глубины применения сотовых горных конструкций для условий разработки Илецкого месторождения каменной соли, включающих вертикальные камеры цилиндрической формы, при различных соотношениях минимальной ширины целиков и диаметров камер, подтвержденные результатами численного моделирования.

8. Установлена закономерность распределения устойчивости численных моделей к действующим нагрузкам: с увеличением ширины камеры b_k 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. На основе численного моделирования обоснованы параметры целиков для условий подземной разработки Илецкого месторождения каменной соли вертикальными камерами цилиндрической формы и подготовлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций.

9. 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.

Глава 4. Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

4.1 Условия разработки Илецкого месторождения каменной соли

Краткая информация о горно-геологических и горнотехнических условиях освоения Илецкого месторождения каменной соли подземным способом представлена в Главе 1 (раздел 1.1.1) диссертационной работы.

Безопасное и эффективное освоение запасов месторождения ввиду наличия затопленного рудника №1 и первого дорабатываемого, второго и третьего отрабатываемого этажа рудника №2 предполагает решение ряда геомеханических задач (рисунок 4.1): охрана месторождения от затопления; предотвращение проникновения воды в горные выработки; обеспечение сохранности поверхностных объектов для их безопасной и безаварийной эксплуатации; недопущение больших потерь каменной соли [4].

Защита Соль-Илецкого рудника от затопления и охрана объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных горных работ являются первостепенными задачами и требованиями по обеспечению безопасных условий разработки Илецкого месторождения каменной соли.

«Указания по защите шахты ЦДПС Илецксоля ООО «Руссоля» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок в условиях Илецкого месторождения каменной соли» [5] являются нормативным документом, регламентирующим проектирование, ведение горных и геологоразведочных работ, меры защиты рудника от затопления и меры охраны подрабатываемых объектов от вредного влияния подземных горных выработок.

Указания разработаны на основе «Указаний по безопасной эксплуатации Илецкого месторождения каменной соли» [68], исследований выполненных в области геомеханики [6, 13, 14, 69-71], в т.ч. на Илецком месторождении [72-78], а также с использованием нормативных документов по калийным [79-82] и угольным [83, 84] месторождениям и мирового опыта эксплуатации калийных и соляных месторождений [85-87].

В современные Указания (разработаны в 2021 г.) дополнительно включен раздел по оценке состояния массива целиков различного назначения и ВЗТ мощностью 130 м с использованием численного метода 3D моделирования НДС горнотехнической системы рудника №2 и в целом геомеханической системы разрабатываемого Илецкого месторождения, а также последующей калибровки численной модели.

Изучены все известные сведения об Илецком месторождении каменной соли и существующая нормативно-методическая база; проанализированы ранее выполненные проектные решения и геомеханические исследования, отчеты, заключения; сделан анализ [88]: результатов инструментальных наблюдений за конвергенцией камер и скоростями смещения контура камер и приконтурных пород за все известные периоды наблюдений; суммарных деформаций целиков и скоростей их развития во времени; динамики деформирования МКЦ; состояния ВЗТ; деформаций стволов шахты; состояния массива горных пород и соляной залежи над рудником №1 и затопленными камерами; карстообразования и провалов земной поверхности в периоды отработки месторождения; скоростей деформирования закладочного материала в заложенных транспортных ортах и сбоях в МКЦ; развития отдельных трещин в ортах и сбоях значений приращений деформаций растяжения и сжатия; изменений оседаний земной поверхности по реперам; сдвижений земной поверхности и изменений оседаний по реперам в районе промышленных зданий промплощадки и др.

Геомеханическое обеспечение освоения Илецкого месторождения каменной соли состоит в обосновании и выборе камерной системы разработки и порядка ведения горных работ, взаимного расположения выработок, способов управления горным давлением и других параметров технологических процессов, при которых деформации в толще горных породах и на земной поверхности будут развиваться в заданных пределах [4].

Равномерное сдвижение налегающей соляной толщи обеспечивается применением обоснованных параметров камерной системы разработки, оставлением потолчины между добычными горизонтами мощностью 25 м, соосным расположением МКЦ на смежных этажах, а также закладкой участков, отработанных с просечными МКЦ, подверженных интенсивным деформациям [4].

Определение условий безопасной подработки объектов и выбор мер их охраны производится на основе сравнения расчетных деформаций земной поверхности с допустимыми для охраняемых объектов. Охрана подрабатываемых объектов осуществляется путем отдельного или совместного применения горных, конструктивных, ремонтно-наладочных мер и оставления предохранительных целиков необходимых размеров.

При проектировании горных работ традиционно используются два основных подхода для геомеханического обоснования параметров систем разработки: с помощью численных методов определяют возможность разрушения массива горных пород под действием напряжений; эмпирические методы применяют для оценки устойчивости выработок (камер) на основе классификации массивов [4].

В настоящее время (сентябрь 2024-сентябрь 2025 гг.) в Горном институте НИТУ МИСИС для ООО «Руссо́ль» выполняется научно-исследовательская работа на тему: «Геомеханическое обоснование параметров отработки запасов ниже гор. (отм.) -270м Илецкого месторождения каменной соли с учетом влияния выработок и отработанных камер верхних горизонтов и этажей рудников №1 и №2», в которой будет представлено геомеханическое обоснование применения сотовых горных конструкций с различными параметрами конструктивных элементов системы в условиях освоения запасов Илецкого месторождения каменной соли.

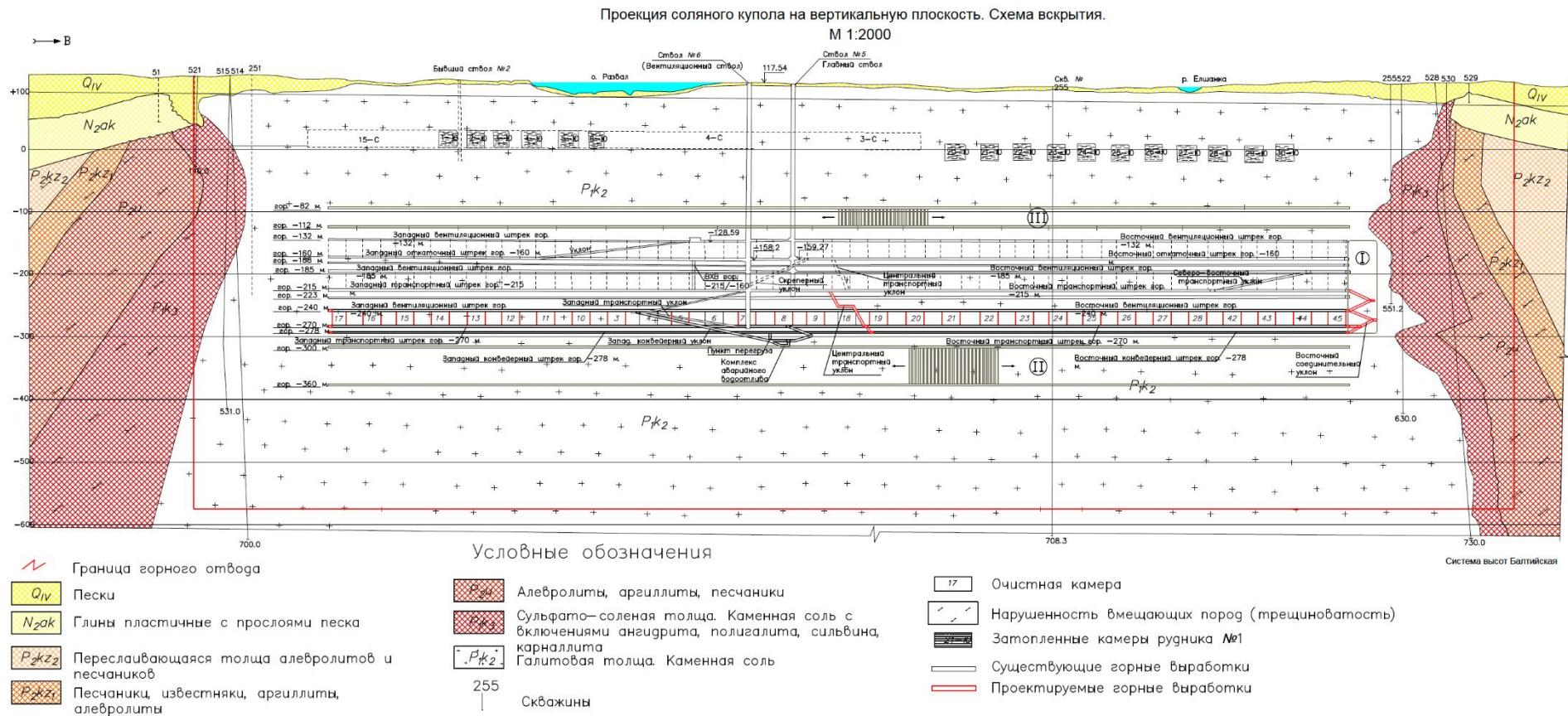


Рисунок 4.1 – Схема вскрытия Илецкого месторождения каменной соли. I – нефункциональные целики на Восточном фланге Илецкого месторождения каменной соли в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности; II – запасы ниже гор. -270 м мощностью 60 м (отм. $-300 \div -360$ 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.

4.2 Сравнение результатов, полученных с применением разработанной методики аналитических расчетов, с результатами численного моделирования

Сравнение результатов, полученных с применением разработанной методики аналитических расчетов, представленными в Главе 2 (таблица 2.5), с результатами численного моделирования, представленными в Главе 3 (см. таблица 4.1 в Главе 4), позволили выявить следующие зависимости для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли:

H=250 м

1. Модель 1, H=250 м – при n=2 минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/4 ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 341 м. При n=3 минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/4 ширины камеры.

2. Модель 2, H=250 м – при n=2 минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 6 раз меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/2 ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 387 м. При n=3 минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/2 ширины камеры.

3. Модель 3, H=250 м – при n=2 минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/4 ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 368 м. При n=3 минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/4 ширины камеры.

4. Модель 4, H=250 м – при n=2 минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 6 раз меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/2 ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 400 м. При n=3 минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/2 ширины камеры.

5. Модель 5, H=250 м – при n=2 минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная 1/4 ширины камеры. Критическая глубина

применения системы, рассчитанная численным методом, равна 393 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры.

6. Модель 6, $H=250$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 6 раз меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 442 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

7. Модель 7, $H=250$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 415 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры.

8. Модель 8, $H=250$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 6 раз меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 458 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

9. Модель 9, $H=250$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 420 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры.

10. Модель 10, $H=250$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 6 раз меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 474 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

Результаты аналитических расчетов по разработанной методике, представленной в Главе 1, минимальной ширины целика $a_{ц}$ на глубине $H=250$ м ведения очистных работ

при $n=2$ показывают в 3 раза меньшую ее ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/4$ ширины камеры и в 6 раз меньшую ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/2$ ширины камеры; при $n=3$ минимальная ширина целика примерно на 10 % больше чем заложенная в численные расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры и примерно в 2 раза меньше чем заложенная в численные расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

Критическая глубина применения моделей 1-10 сотовой горной конструкции значительно превышает расчетную глубину $H=250$ м и изменяется в пределах 341-474 м.

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

H=400 м

1. Модель 1, $H=400$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно на 15% больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 341 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 4 раза больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры.

2. Модель 2, $H=400$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 387 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 4 раза больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

3. Модель 3, $H=400$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно на 15% больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 368 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 4 раза больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры.

4. Модель 4, $H=400$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза меньше, чем заложенная в расчеты

10. Модель 10, $H=400$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза меньше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 474 м. При $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 4 раза больше чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

Результаты аналитических расчетов по разработанной методике, представленной в Главе 1, минимальной ширины целика $a_{ц}$ на глубине $H=400$ м ведения очистных работ при $n=2$ показывают на 15% большую ее ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/4$ ширины камеры и в 4 раза большую ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/2$ ширины камеры; при $n=3$ минимальная ширина целика примерно в 2 раза меньше чем заложенная в численные расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры и примерно в 4 раза больше чем заложенная в численные расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры.

Критическая глубина применения моделей 1-10 сотовой горной конструкции приближена к расчетной глубине $H=400$ м и изменяется в пределах 341-474 м.

Увеличить глубину ведения очистных работ можно за счет уменьшения высоты камер или увеличения минимальной ширины целика, или одновременно двумя этими способами.

Численные расчеты являются более 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.

$H=600$ м

1. Модель 1, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3,5 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 341 м.

2. Модель 2, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 1,8 раз больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 387 м.

3. Модель 3, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3,5 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 368 м.

4. Модель 4, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 1,8 раз больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 400 м.

5. Модель 5, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3,5 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 400 м.

6. Модель 6, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 1,8 раз больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 442 м.

7. Модель 7, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3,5 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 415 м.

8. Модель 8, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 1,8 раз больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 458 м.

9. Модель 9, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 3,5 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 420 м.

10. Модель 10, $H=600$ м – при $n=2$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 1,8 раз больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 474 м.

Результаты аналитических расчетов, по разработанной методике, представленной в Главе 1, минимальной ширины целика $a_{ц}$ на глубине $H=600$ м ведения очистных работ при $n=2$ показывают в 3,5 раза большую ее ширину, чем заложенную в расчеты

минимальную ширину целика равную $1/4$ ширины камеры и в 1,8 раза большую ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/2$ ширины камеры. С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено аналитической расчетной формулой $n=0\div 2.4$.

Критическая глубина применения моделей 1-10 сотовой горной конструкции меньше чем расчетная глубина $H=600$ м и изменяется в пределах 341-474 м.

Увеличить глубину ведения очистных работ можно за счет уменьшения высоты камер или увеличения минимальной ширины целика, или одновременно двумя этими способами.

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

H = 1000 м

1. Модель 1, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 341 м.

2. Модель 2, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно одинаковая с заложенной в расчеты минимальной ширины целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 387 м.

3. Модель 3, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 368 м.

4. Модель 4, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно одинаковая с заложенной в расчеты минимальной ширины целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 400 м.

5. Модель 5, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 400 м.

6. Модель 6, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно одинаковая с заложенной в расчеты минимальной ширины целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 442 м.

7. Модель 7, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 415 м.

8. Модель 8, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно одинаковая с заложенной в расчеты минимальной ширины целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 458 м.

9. Модель 9, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно в 2 раза больше, чем заложенная в расчеты минимальная ширина целика равная $1/4$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 420 м.

10. Модель 10, $H=1000$ м – при $n=1$ минимальная ширина целика, рассчитанная аналитическим методом, примерно одинаковая с заложенной в расчеты минимальной ширины целика равная $1/2$ ширины камеры. Критическая глубина применения системы, рассчитанная численным методом, равна 474 м.

Результаты аналитических расчетов, по разработанной методике, представленной в Главе 1, минимальной ширины целика $a_{ц}$ на глубине $H=1000$ м ведения очистных работ при $n=1$ показывают в 2 раза большую ее ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/4$ ширины камеры и примерно одинаковую ширину, чем заложенную в расчеты минимальную ширину целика равную $1/2$ ширины камеры. С глубины $H=600$ м допустимое значение коэффициента запаса прочности МКЦ ограничено аналитической расчетной формулой $n=0 \div 1.5$.

Критическая глубина применения моделей 1-10 сотовой горной конструкции на много меньше чем расчетная глубина $H=1000$ м и изменяется в пределах 341-474 м.

Увеличить глубину ведения очистных работ можно за счет уменьшения высоты камер или увеличения минимальной ширины целика, или одновременно двумя этими способами.

Численные расчеты являются более 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.

4.3 Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

В разделе представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций с представленными в диссертационной работе параметрами в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли. 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 (рисунок 4.1). Рекомендуются 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.

На основе разработанного графика (рисунок 2.11) изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимой глубины применения моделей №№1-10 включающих целики с минимальной шириной $a_{ц}$ в таблице 4.1 представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли.

В условиях применения сотовой горной конструкции потери полезного ископаемого изменяются в диапазоне $50,62 \div 68,69\%$ (таблица 1.3) с оставлением оконтуривающего блок целика шириной 1,5-4,5 м (таблица 1.3). Оконтуривающий целик значительно увеличивает эксплуатационные потери полезного ископаемого при отработке очистного блока размером $60 \times 60 \times 60$ м в диапазоне $9,75 \div 27,75\%$ 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 в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли позволит извлечь $8,6 \div 13,8$ тыс. т запасов каменной соли расположенных на Восточном фланге в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ 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 4.1 – Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

№ модели	Ширина камеры b_k , м	Минимальная ширина целика a_c , 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	
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÷–340 м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
8	5	2,5	458	
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÷–270м на глубине 250-388 м; запасы ниже гор. –270 м в отм. –300÷–340 м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
----	---	---	-----	--

При необходимости увеличить глубину ведения очистных работ можно двумя способами – уменьшить высоту камер или увеличить минимальную ширину целика, или одновременно двумя этими способами. При этом для геомеханического обоснования новых параметров сотовых горных конструкций необходимо провести дополнительные расчеты.

«Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли» рассмотрены и одобрены на заседании кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС (Протокол №2 от 25 сентября 2024 года) и утверждены проректором по науке и инновациям НИТУ МИСИС, д.т.н. проф. М.Р. Филоновым (Приложение Б).

В Приложении В представлена Справка об использовании результатов диссертационной работы на тему: «Геомеханическое обоснование формы и размеров целиков при подземной разработке соляных месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы» в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли и о том, что «Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли» приняты к использованию на ЦДПС Илецксоль ООО «Руссоль» (Соль-Илецкий рудник).

Выводы по четвертой главе

1. Рассмотрены безопасные условия разработки Илецкого месторождения каменной соли.

2. Представлено сравнение результатов, полученных с применением разработанной методики аналитических расчетов, с результатами численного моделирования.

3. Разработаны «Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли», по освоению запасов расположенных на Восточном фланге в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности; 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; 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-магниевого 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.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Дзенс-Литовский А.И., Карегунова Г.В., Орлянкин О.М., Мажерова Е.И.** Илецкое месторождение каменной соли и его гидрогеологические условия. Оренбург. – 1939. – 358 с.
2. **Соловьев В.А., Константинова С.А., Аптуков В.Н.** Охрана горных выработок в соляных породах. Теория и практика. Изд-во Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 412 с.
3. **Еременко В.А., Мясков А.В., Галченко Ю.П., Ромеро Барренечеа Мойсес Эсау, Лагутин Д.В.** Обоснование параметров конвергентной геотехнологии в условиях отработки Илецкого месторождения каменной соли // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2018. – Т 5. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2018. – С. 37-48.
4. **Еременко В.А., Косырева М.А.** Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли // *Научный вестник Арктики.* – 2017. – № 2 (2). – С. 5-18.
5. **Указания** по защите шахты ЦДПС Илецксоля ООО «Руссоля» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок в условиях Илецкого месторождения каменной соли / СФ АО «ВНИМИ». – 2020. – 207 с.
6. **Андреичев А.Н.** Разработка калийных месторождений. – М.: Недра, 1966.
7. **Соловьев В.А., Секунцов А.И.** Разработка калийных месторождений: практикум / Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун.-та, 2013. – 265 с.
8. **Кудряшов А.И.** Верхнекамское месторождение солей. М.: Эпсилон Плюс; 2013. – 429 с.
9. **Соловьев В.А., Секунцов А.И., Чернопазов Д.С.** Разработка и применение технологии выемки сильвинитовых пластов с регулярным оставлением столбчатых целиков на Верхнекамском месторождении калийных солей // *Известия Уральского государственного горного университета.* – 2013. – № 4(32). – С. 41-46.
10. **Временные указания** по защите рудника от затопления и поверхностных объектов от вредного влияния горных работ в условиях Гремячинского месторождения калийных солей (Технологический регламент) / ОАО «Галургия». — Пермь, 2011. – 147 с.
11. **Отчет** «Геомеханическая модель Нивенского месторождения калийно-магниевых солей» / КФ АО «ВНИМИ». — Кемерово, 2020.
12. **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.

13. **Шевяков Л.Д.** О расчете прочных размеров и деформаций целиков // Известия АН СССР. ОТН. – 1941, №№ 7-9.

14. **Слесарев В.Д.** Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. – М.: Углетехиздат, 1948.

15. **Борщ-Компониец В.И.** Практическая механика горных пород. – М.: Издательство «Горная книга», 2013. – 322 с.

16. **Макаров А.Б.** Практическая геомеханика. – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 391 с.

17. **LIU Hao, ZUO Yu-jun, SUN Wen-ji-bin, WU Zhong-hu and ZHENG Lu-jing.** Reasonable Width of Narrow Coal Pillars Along Gob-side Driving Entries in Gas Outburst Coal Seams: Simulation and Experiment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020, № 570 052042.

18. **Qin Zhongcheng, Cao Bin, Li Tan, Liu Yongle and Guo Xin.** Surrounding rock control technology for the fault passing of mining face by removing gangue in advance from excavation roadways // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020, № 570 052005.

19. **Singh A.K., Kumar A., Kumar D., Singh R., Ram S., Kumar R., Singh A.K.** Coal Pillar Extraction Under Weak Roof // Mining, Metallurgy and Exploration – 2020. – Vol. 37 – Issue 5 – pp. 1451-1459.

20. **Барышников В.Д., Гахова Л.Н.** Геомеханическая оценка параметров камерно-целиковой системы разработки верхней части трубки «Ботуобинская» // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 2. – № 2. – С. 134-138.

21. **Уфатова З.Г.** Обоснование параметров камерной выемки с закладкой для подработанных залежей рудников Норильского промышленного района // Научный вестник Арктики. – 2020. – № 8. – С. 49-52.

22. **Дарбинян Т.П., Фендер П.С., Гузанов С.Н.** Опыт внедрения камерных систем разработки при отработке медистых руд рудника «Октябрьский» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 121-125.

23. **Савич И.Н., Лифарь-Лаптев А.А., Яковлев А.М., Сыренов М.О., Карасев Г.А.** Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки с закладкой на Корбалихинском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S25. – С. 3-14.

24. **Map3D:** <http://www.map3d.com/>.

25. **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.
26. **Еременко В.А., Галченко Ю.П., Высотин Н.Г., Лейзер В.И., Косырева М.А.** Прочностные, деформационные и акустические характеристики физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. – С. 93-104.
27. **Hoek E. and Brown E.T.** Underground excavations in rock, London: Institute of Mining and Metallurgy. – 1980.
28. **Fairhurst C. and Cook N.G.W.** The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface, in Proceedings 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, September 25 – October 1, Vol. 1. – 1966. – pp. 687–692.
29. **Barton N.** Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses. Workshop on Norwegian Method of Tunneling. – New Delhi, 1993. – pp. 66-84.
30. **Khazhyylai Ch.V., Kosyрева M.A., Eremenko V.A., Umarov A.R.** 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.
31. **Galchenko Yu.P., Eremenko V.A., Kosyрева 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.
32. **Захаров В.Н., Еременко В.А., Федоров Е.В., Лагутин Д.В.** Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении // Горный журнал. – № 2 – 2018. – С. 41-47.
33. **Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П.** Природоподобная геотехнология комплексного освоения недр: проблемы и перспективы. М.: Научтехлитиздат. – 2020. – 368 с.
34. **Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П.** Геоэкология освоения недр и экогеотехнология разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат. – 2015. – 360 с.
35. **Галченко Ю.П., Еременко В.А.** Природно-технические системы подземной разработки рудных месторождений на основе конвергентных горных технологий:

Монография. 2-е изд., доп. и перераб. / Отв. редактор академик РАН В. Н. Захаров. – М.: Издательство «Горная книга», 2023. – 288 с.

36. **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.

37. **Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М.** Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / *Машиностроение*. – 1986. – 200 с.

38. **Трубецкой К.Н., Мясков А.В., Галченко Ю.П., Еременко В.А.** Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // *Горный журнал*. - №5. – 2019. – С. 6-13.

39. **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 В сборнике: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020*. № 523 012030.

40. **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*. – №1. – 2024. – С. 29-38.

41. **Eremenko V.A., Vinnikov V.A., Pugach A.S., Kosyreva M. A.** 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.

42. **Шевяков Л.Д.** Разработка месторождений полезных ископаемых. – М.: Углетехиздат, 1953.

43. **Гулевич Г.Е.** Рациональный порядок расположения и оптимальные размеры поддерживающих целиков при камерно-столбовой системе разработки. – М.: ОБНТИ Гипроцветмет, 1958.

44. **Мор Ф.** Измерение горного давления // *Mine and Quarry Engineering*. – 1956. - Май.

45. **Nast N.** The measurement of rock pressure in mines // *Sver. Geol. Undersokhr. Ser. C-Stokholm*. – 1958. – Vol. 52 - № 3 – P. 183.

46. **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-01 ноября 2019 г. – Москва: ИПКОН РАН, 2019. – С. 60-63.

47. **Лушников В.Н., Сэнди М.П., Еременко В.А., Коваленко А.А., Иванов И.А.** Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 11-16.
48. **Высотин Н.Г., Косырева М.А., Лейзер В.И., Аксенов З.В.** Обоснование создания комплексного стенда для физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений в условиях разработки месторождений конвергентными горными технологиями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 131-145.
49. **Sandy M., Sharrock G., Albrecht J. and Vakili A.** Managing the transition from low stress to high stress conditions. In Proc. 2nd Australasian Ground Control in Mining Conference. Sydney, 23-24 November 2010.
50. **Wiles T.D.** Evidence based model calibration for reliable predictions. In Proc. 4th Int Sem on Deep and High Stress Mining. Perth, November 7-9. – 2007.
51. **Terzaghi K. and Peck R.B.** Soil mechanics in engineering practice. Wiley, New York. – 1967.
52. **Coulomb C.A.** Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture, Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers savans, Vol. 7. – 1779. – pp. 343-382.
53. **Griffith A.A.** Theory of rupture, in Proceedings 1 st International Congress of Applied Mechanics, (Delft Biezeno, C. B. and Burges, J. M., eds). – 1924. – pp. 55-63.
54. **Sheorey P.R., Biswas A.K. and Choubey V.D.** An empirical failure criterion for rocks and jointed rock masses, Engineering Geology, Vol. 26. – 1989. – pp. 141-159.
55. **Kuijpers J.** Fracturing around highly stressed excavations in brittle rock, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 100. – 2000. – pp. 325-332.
56. **Ndlovu X. and Stacey T.R.** Observations and analyses of roof guttering in a coal mine, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 107. – 2007. – pp. 477-491.
57. **Stacey T.R.** A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 18. – 1981. – pp. 469-474.
58. **Умаров А.Р., Еременко В.А.** Развитие вторичного поля напряжений в условиях применения каркасной горной конструкции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 77-92.

59. **Косырева М.А., Еременко В.А., Сухорукова М.А., Шерматова С.С.** Разработка метода количественной оценки устойчивости техногенно измененного массива // Сборник 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – 2021. – С. 50-54.

60. **Еременко В.А., Галченко Ю.П., Косырева М.А., Умаров А.Р.** О структуре техногенно измененных недр как нового литосферного объекта // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – №1. – С. 60-65.

61. **Еременко В.А., Аксенов З.В., Пуль Э.К., Захаров Н.Е.** Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». – №5. – 2020. – С. 91-104.

62. **Нгуен Ван Минь, Еременко В.А., Сухорукова М.А., Шерматова С.С.** Оценка влияния формы выработки и действующих напряжений в массиве на формирование зоны растягивающих деформаций на глубине свыше 1 км // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». – №6. – 2020. – С. 67-75.

63. **Протосеня А.Г., Вербило П.Э.** Оценка прочности блочного массива методом численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 47-54.

64. **Kosyрева M.A., Eremenko V.A.** Numerical stress–strain modeling of honeycomb mine structures with vertical stopes of cylindrical form. Eurasian mining. – 2024. – No. 1. – pp. 36-39.

65. **Косырева М.А., Еременко В.А.** Обоснование параметров междукамерных целиков при разработке соляных месторождений вертикальными очистными камерами цилиндрической формы // Сборник 6 конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». 17-21 июня 2024 г. – Москва, ИПКОН РАН, 2024. – С. 46-49.

66. **Галченко Ю.П., Лейзер В.И., Высотин Н.Г., Якушева Е.Д.** Обоснование методики лабораторных исследований вторичного поля напряжений при создании и применении конвергентной горной технологии подземной разработки каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». – №11. – 2019. – С. 35-47.

67. **Galchenko Yu.P., Eremenko V.A., Vysotin N.G., Kosyрева 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.

68. **Указания** по безопасной эксплуатации Илецкого месторождения каменной соли / ООО «Галургия». – 2014. –119 с.

69. **Руппенейт К.В.** Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1963.

70. **Стаматиу М.** Расчет целиков на соляных рудниках. – М.: Недра, 1966.

71. **Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А.** Сдвигение и разрушение горных пород. – М.: Наука, 2005, 277 с.

72. **Программа геомеханического мониторинга** этажа 185/215 м Соль-илецкого рудника: Отчет о НИР/ОАО «Галургия». – рук. Марakov В.Е., дог. № 055/2008. – Пермь-Березники, 2008.

73. **Заключение** по геомеханическому сопровождению горных работ на предприятии ООО «Руссоль»: Отчет о НИР/ОАО «Галургия». – договор № 308Д – 2010 – этап 2. – Березники, 2010.

74. **Анализ инструментальных наблюдений** по Илецкому месторождению каменной соли: за проседанием земной поверхности, деформацией целиков камер, стволов шахты, конвергенцией камер, зданиями и сооружениями на поверхности горного отвода, анализ работы закладки: Отчет о НИР/ОАО «Галургия». – Березники, 2006 – 2012.

75. **Отчет о НИР** разработка «Указаний по защите шахты ЦДПС Илецксоль ООО «Руссоль» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок в условиях Илецкого месторождения каменной соли» и «Мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок в условиях Илецкого месторождения каменной соли» Этап 1 «Выполнить анализ результатов инструментальных наблюдений на Илецком месторождении каменной соли: за конвергенцией камер, проседанием земной поверхности, деформацией целиков, стволов шахты, зданий и сооружений на поверхности горного отвода». – Москва: ООО «РМС Майнинг», 2020.

76. **Отчет о НИР** по теме: «Обоснование вариантов и условий отработки запасов соли ниже этажа -185/-215 м на Илецком месторождении каменной соли», ООО «Руссоль», ИПКОН РАН, г. Москва, 2016 г.

77. **Дополнение к отчету о НИР** по теме: «Обоснование вариантов и условий отработки запасов соли ниже этажа -185/-215 м на Илецком месторождении каменной соли», ООО «Руссоль», ИПКОН РАН, г. Москва, 2016 г.

78. **Отчет о НИР** по теме: «Проведение сравнительного анализа результатов инструментальных наблюдений по Илецкому месторождению соли за 2017 год с результатами за 2012 и 2007 годы, проведение сравнительной оценки оседания целиков и

их напряженного состояния с предельно допустимым, прогноз (моделирование) дальнейшего развития геомеханической системы месторождения. Геомеханическое сопровождение горных работ с выдачей рекомендаций по проведению горных работ по запросам предприятия», ООО «Руссоль», ИПКОН РАН, г. Москва, 2017 г.

79. **Указания** по охране зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок и по охране рудников от затопления в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. – Л.: ВНИИГ, 1985.

80. **Указания** по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей / утв. Проматомнадзором при МЧС РБ 03.04.2001. – Солигорск-Минск, 2001.

81. **Указания** по защите рудника от затопления и охране подрабатываемых объектов для условий Талицкого участка ВКМКС (Технологический регламент) / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2012. – 107 с.

82. **Временные указания** по защите рудника от затопления и поверхностных объектов от вредного влияния горных работ в условиях Гремячинского месторождения калийных солей (Технологический регламент) / ОАО «Галургия». – Пермь, 2011. – 147 с.

83. **Правила** охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М.: Недра, 1981.

84. **ПБ 07-269-98 Правила** охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – С. – Петербург, 1998.

85. **Кратч Г.** Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. – М.: Недра, 1978.

86. **Spackeler G/ Lehrbuch des Kali u. Salzbergbau/ - Halle, 1957.**

87. **Серата Ш.** Серата Геомеханике, Инк.: Доклад для научно-технического семинара / ВНИИГ. – Л., 27 февраля – 8 марта 1989.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Модель 1 (H=250 м)

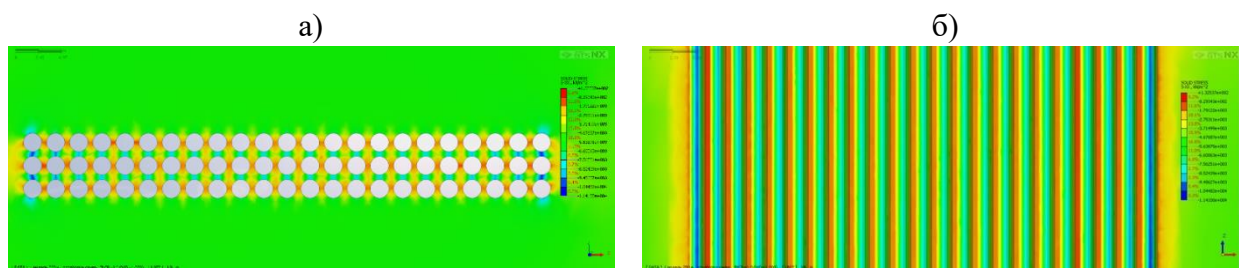


Рисунок 1.1 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.829 \div 11.410$ МПа.

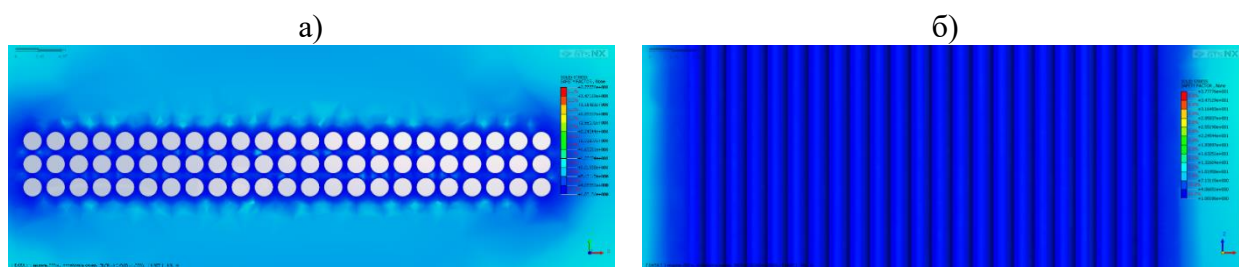


Рисунок 1.2 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.00 \div 37.77$.

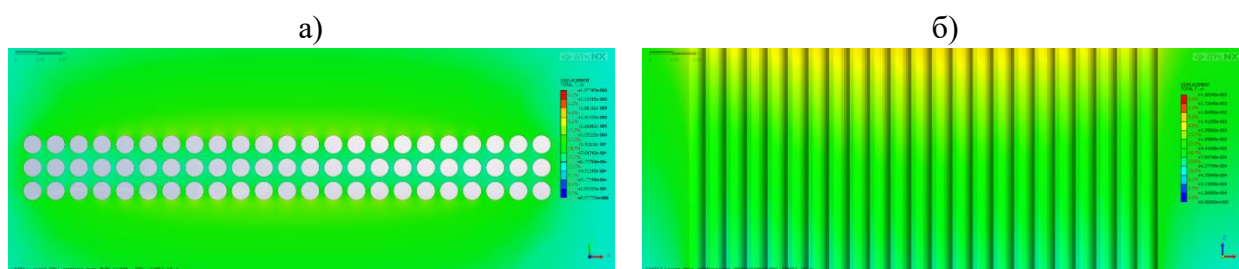


Рисунок 1.3 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00188$ м.

Модель 2 (H=250 м)

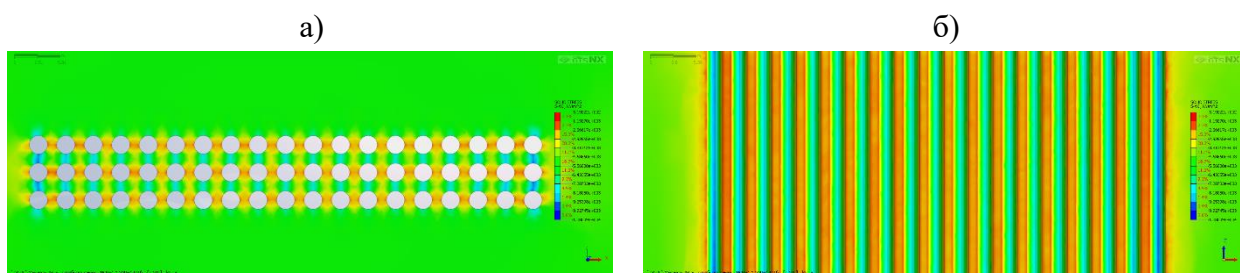


Рисунок 2.1 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.319 \div 10.800$ МПа.

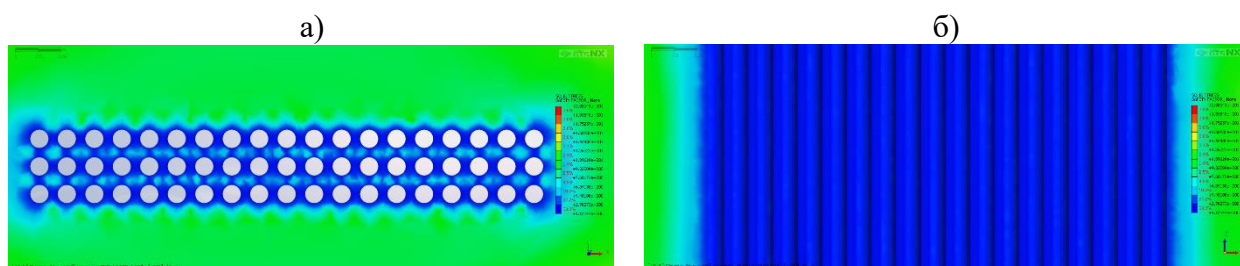


Рисунок 2.2 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.12 \div 20.80$.

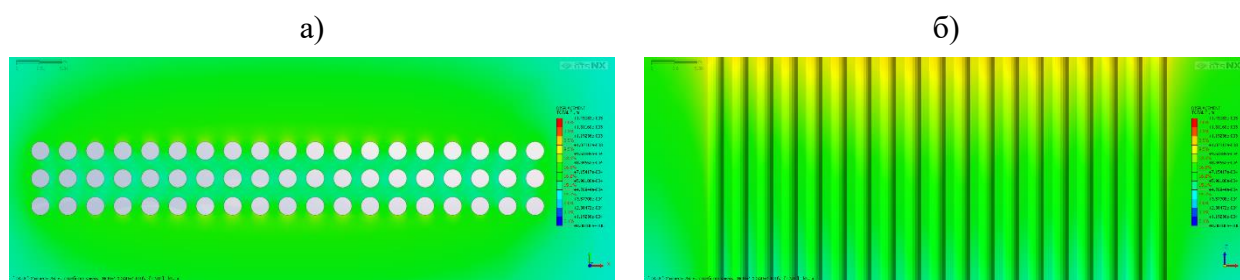


Рисунок 2.3 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00143$ м.

Модель 3 (H=250 м)

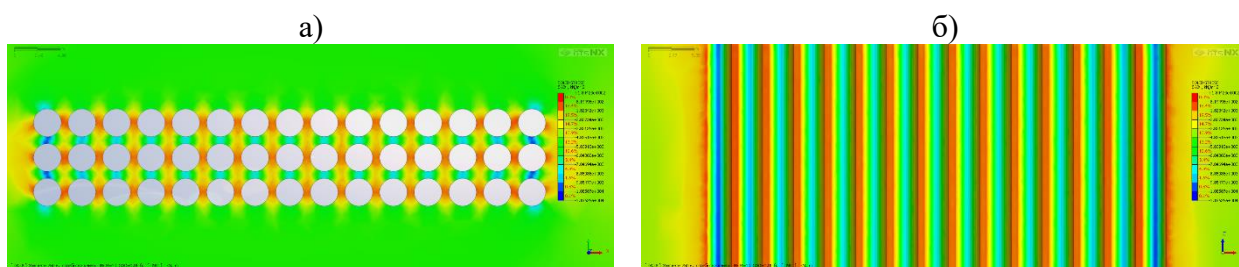


Рисунок 3.1 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.819 \div 11.862$ МПа.

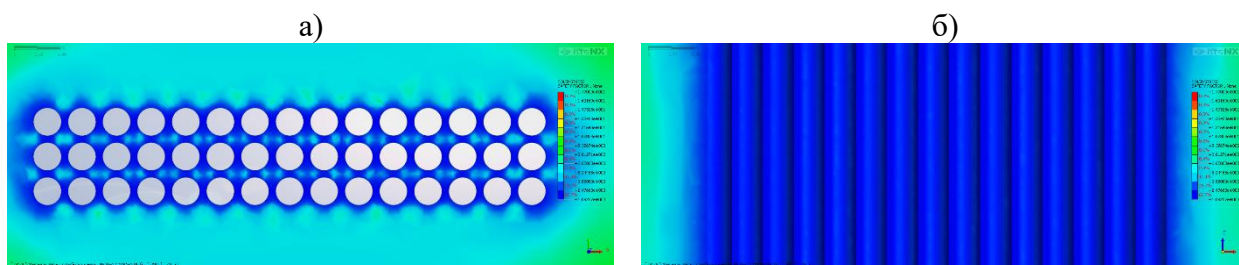


Рисунок 3.2 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.09 \div 17.70$.

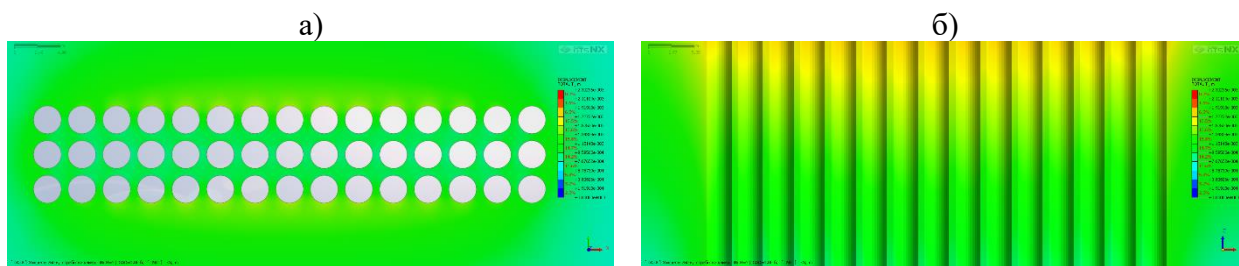


Рисунок 3.3 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00230$ м.

Модель 4 (H=250 м)

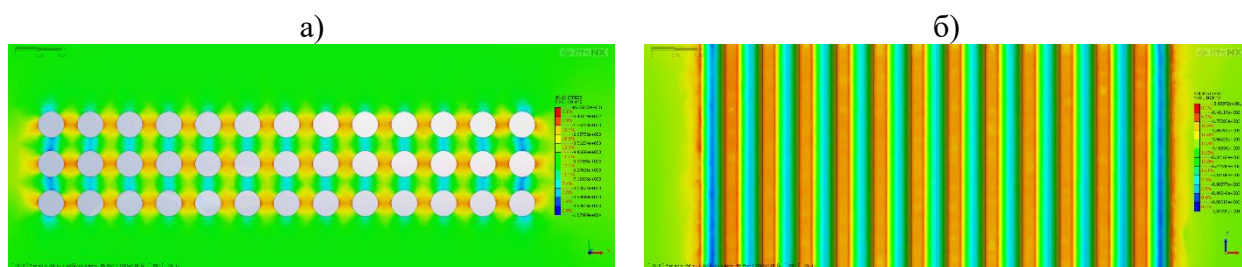


Рисунок 4.1 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.848 \div 10.800$ МПа.

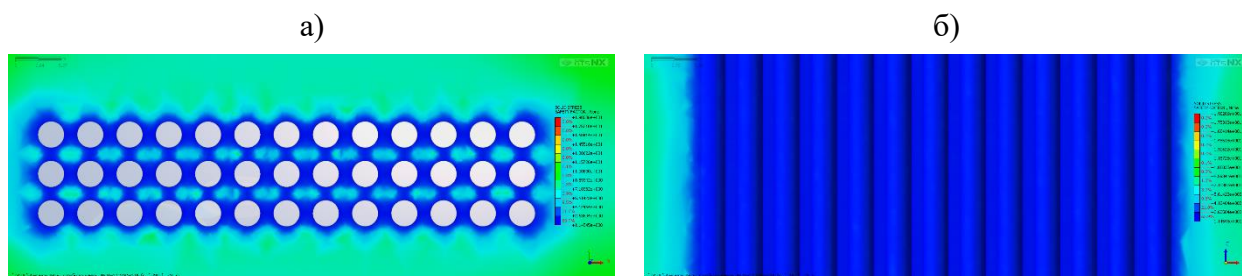


Рисунок 4.2 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.14 \div 19.02$.

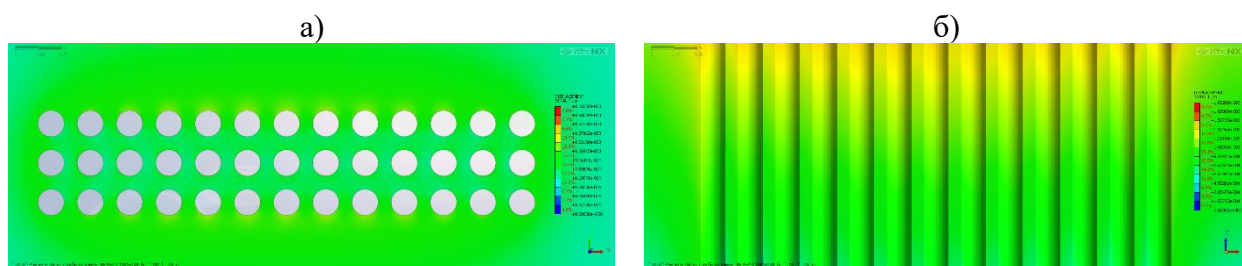


Рисунок 4.3 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00183$ м.

Модель 5 (H=250 м)

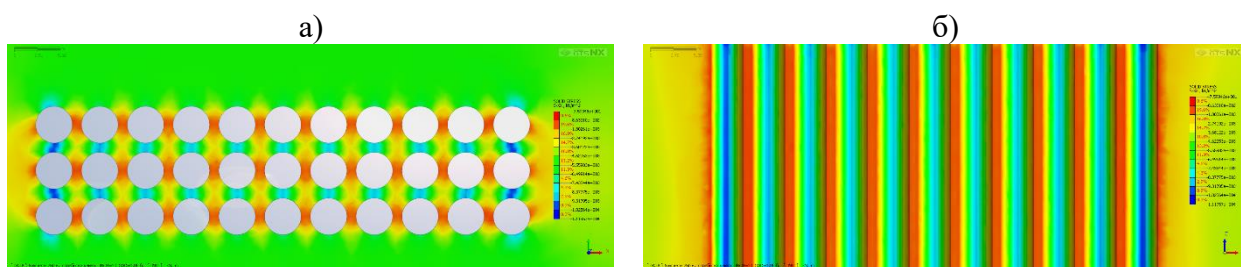


Рисунок 5.1 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.863 \div 11.195$ МПа.

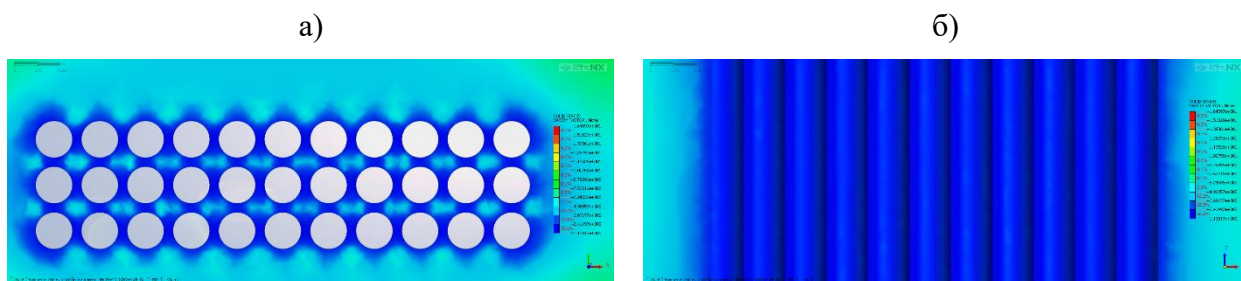


Рисунок 5.2 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.13 \div 16.46$.

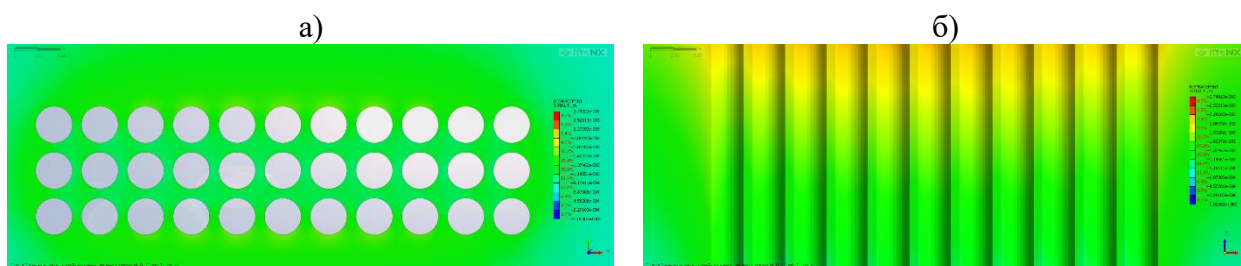


Рисунок 5.3 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00275$ м.

Модель 6 (H=250 м)

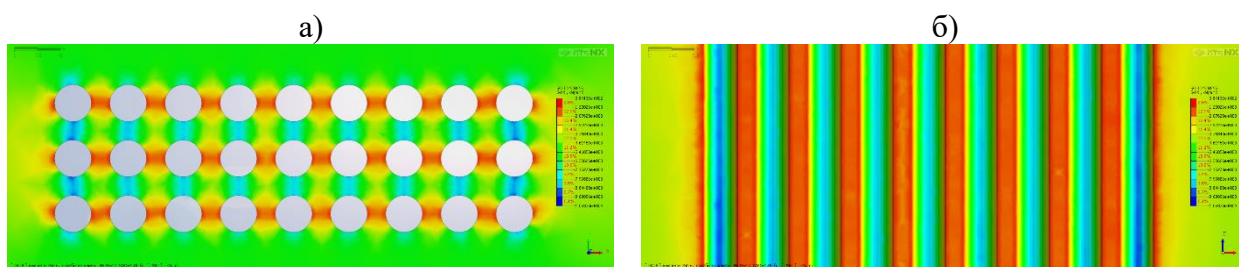


Рисунок 6.1 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.384 \div 10.537$ МПа.

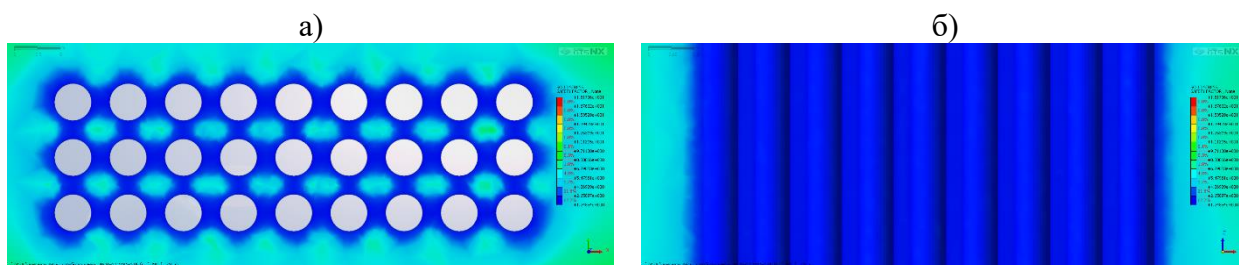


Рисунок 6.2 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.24 \div 18.17$.

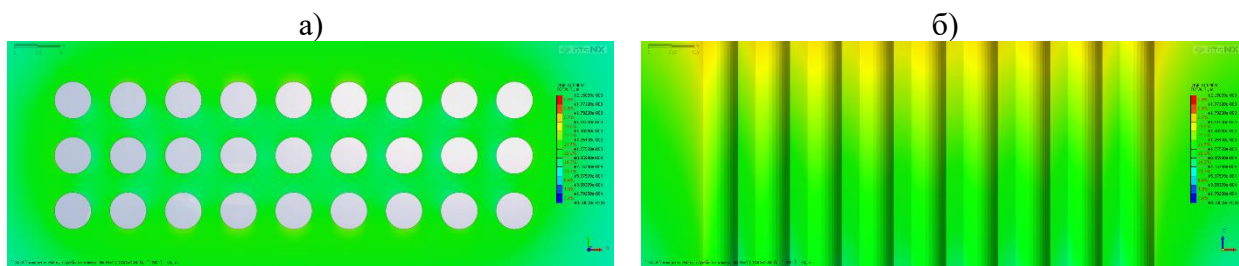


Рисунок 6.3 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00215$ м.

Модель 7 (H=250 м)

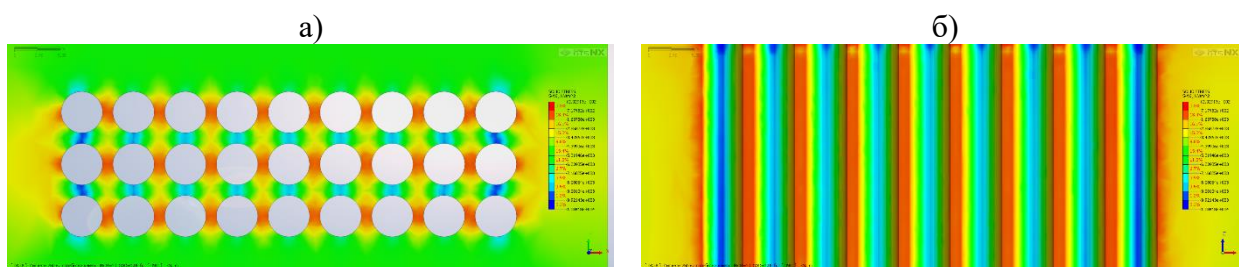


Рисунок 7.1 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.717 \div 10.841$ МПа.

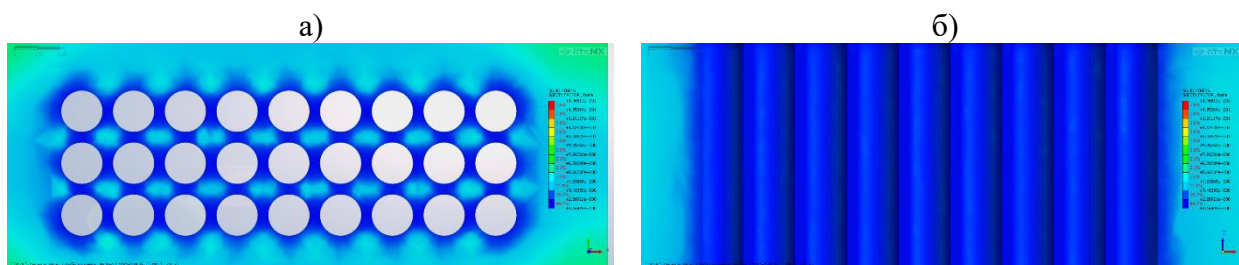


Рисунок 7.2 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.16 \div 14.66$.

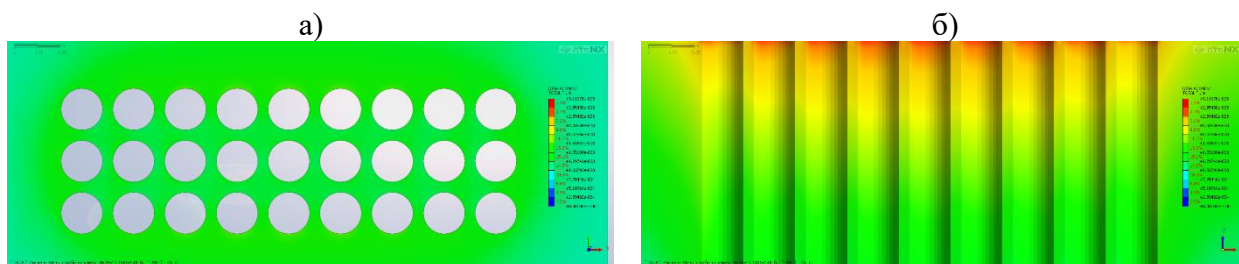


Рисунок 7.3 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00311$ м.

Модель 8 (H=250 м)

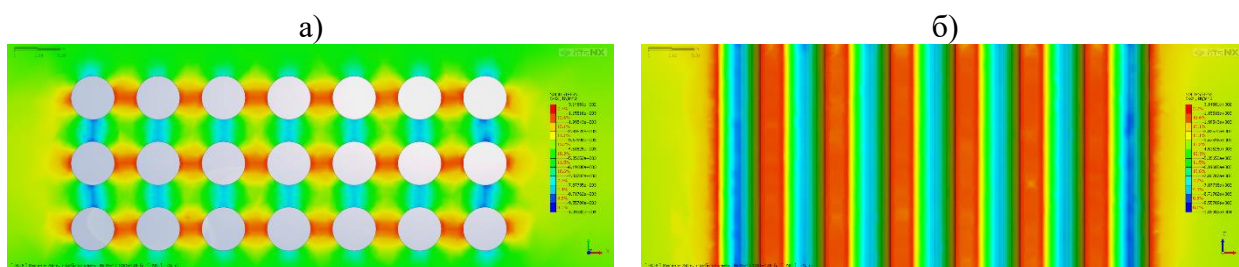


Рисунок 8.1 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.314 \div 10.398$ МПа.

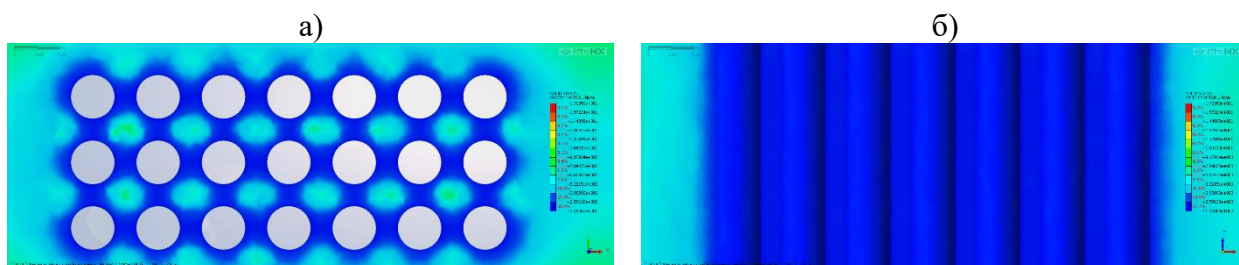


Рисунок 8.2 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.28 \div 17.03$.

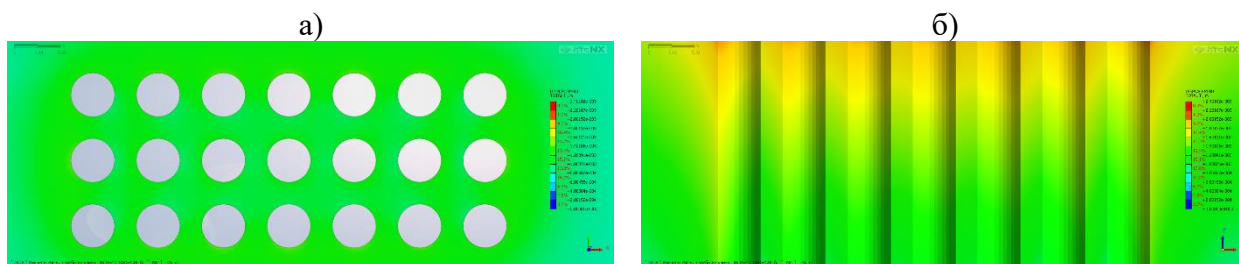


Рисунок 8.3 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00240$ м.

Модель 9 (H=250 м)

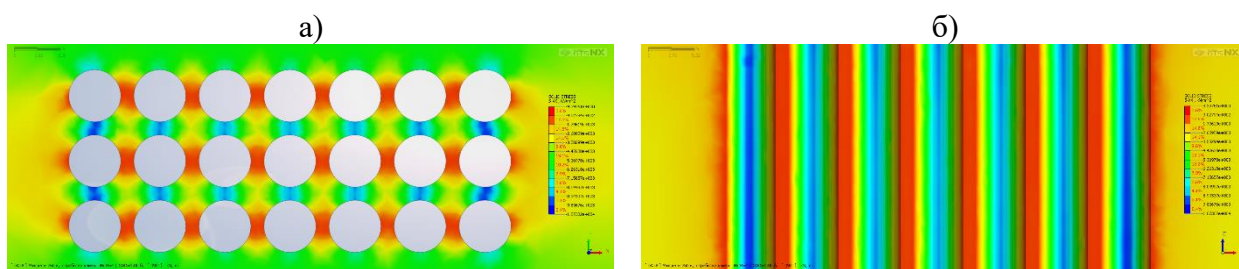


Рисунок 9.1 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.009 \div 10.730$ МПа.

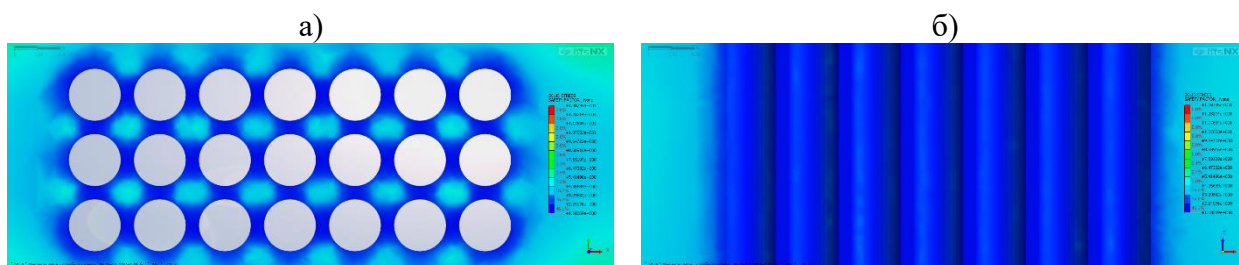


Рисунок 9.2 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.18 \div 13.88$.

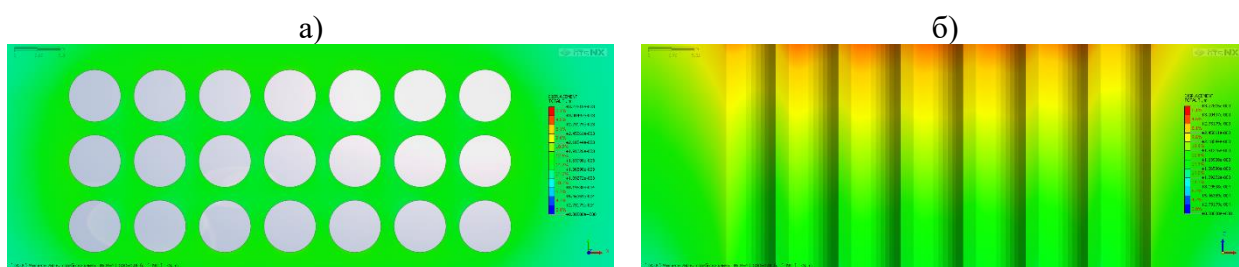


Рисунок 9.3 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00327$ м.

Модель 10 (H=250 м)

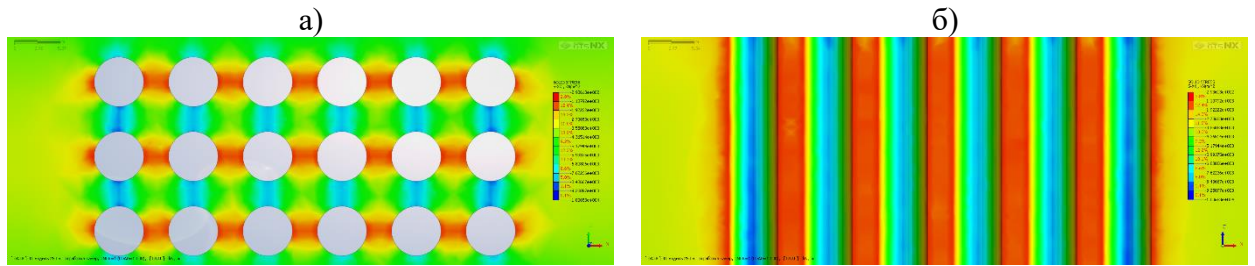


Рисунок 10.1 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.293 \div 10.065$ МПа.

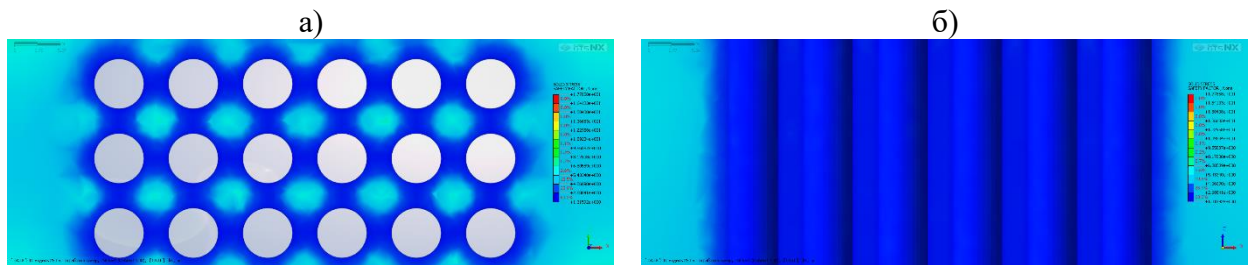


Рисунок 10.2 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.31 \div 17.78$.

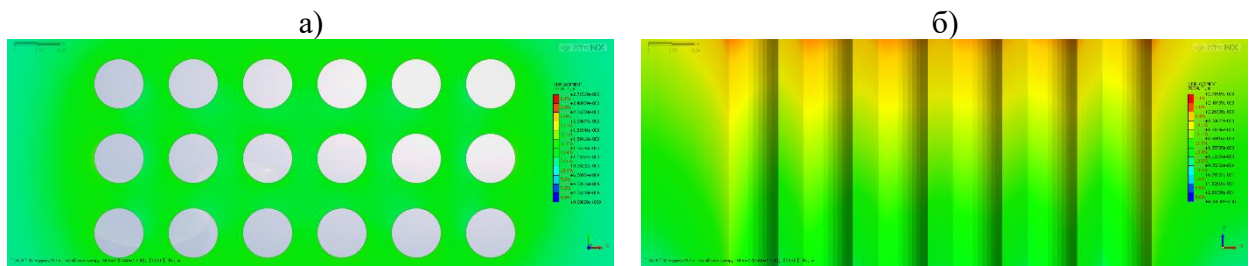


Рисунок 10.3 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=250$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00271$ м.

Модель 1 (H=400 м)

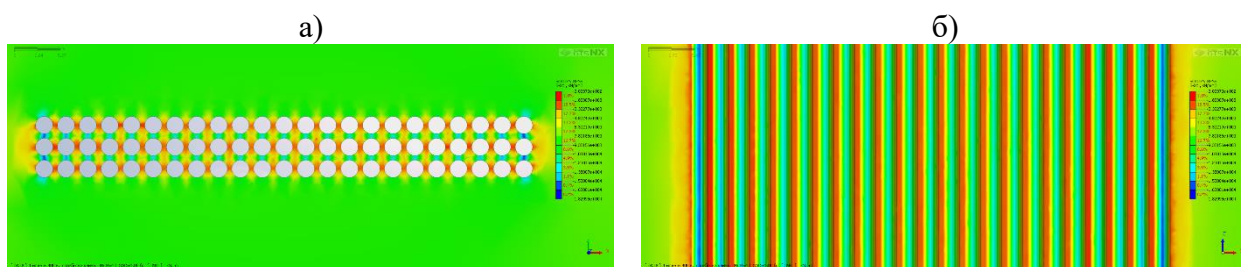


Рисунок 11.1 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.303 \div 18.300$ МПа.

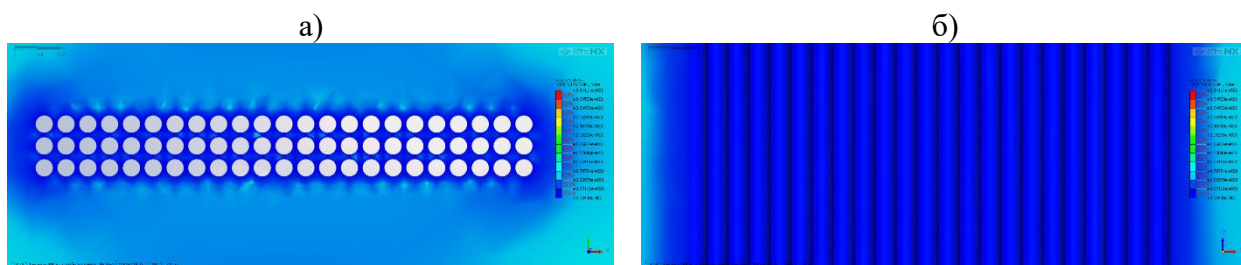


Рисунок 11.2 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 36.41$.

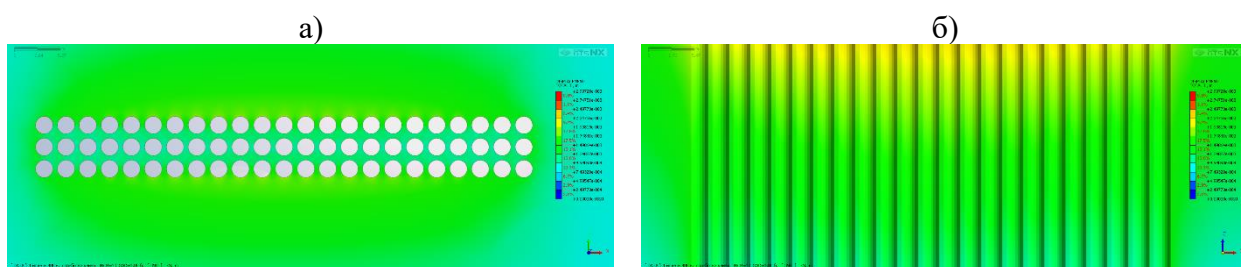


Рисунок 11.3 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00299$ м.

Модель 2 (H=400 м)

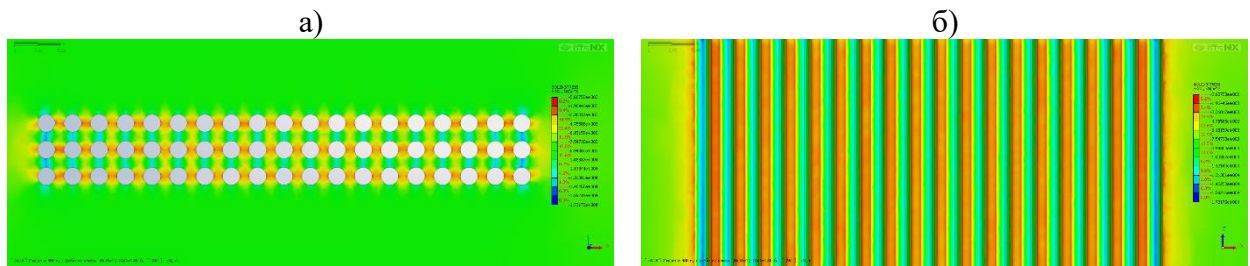


Рисунок 12.1 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.568 \div 17.317$ МПа.

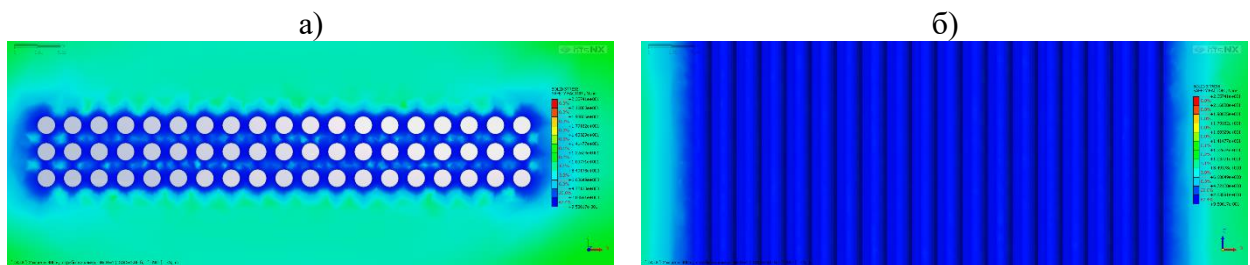


Рисунок 12.2 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.95 \div 23.57$.

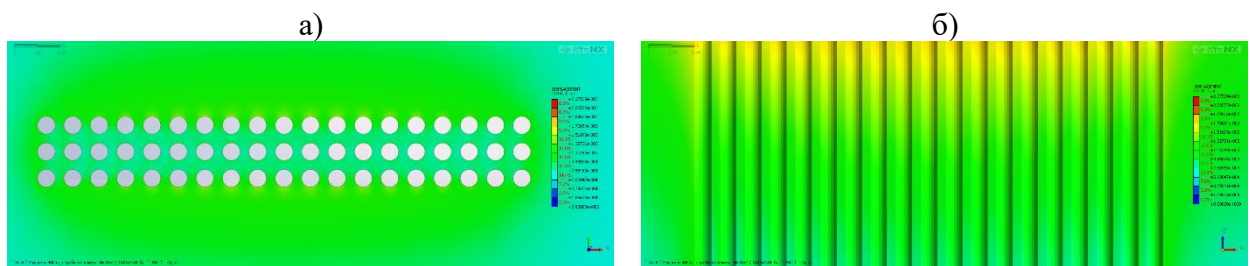


Рисунок 12.3 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00227$ м.

Модель 3 (H=400 м)

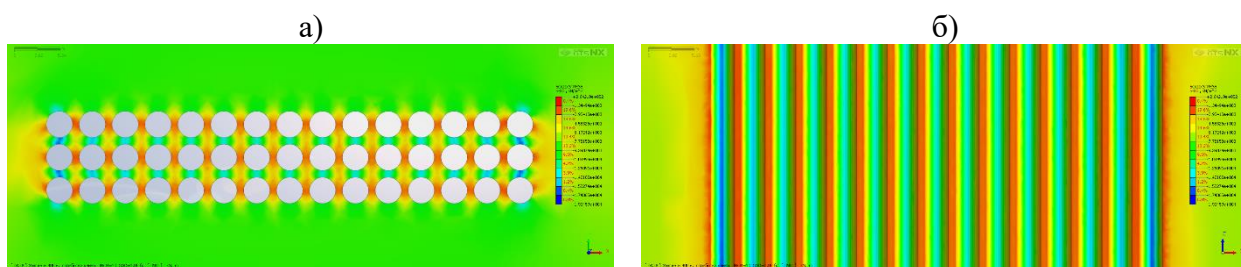


Рисунок 13.1 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.344 \div 19.045$ МПа.

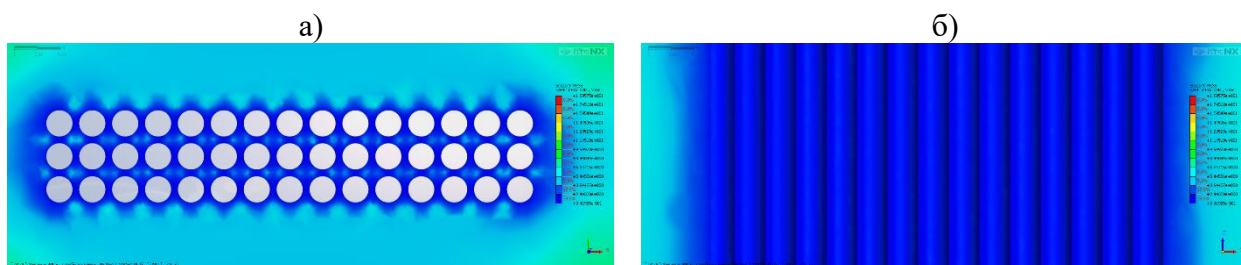


Рисунок 13.2 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.94 \div 18.95$.

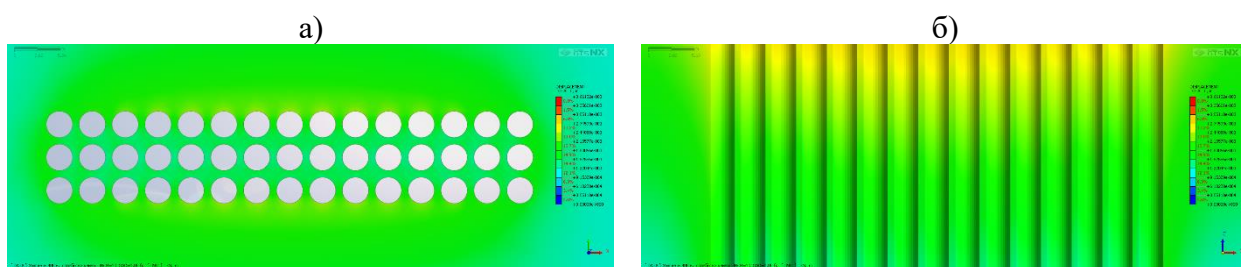


Рисунок 13.3 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00366$ м.

Модель 4 (H=400 м)

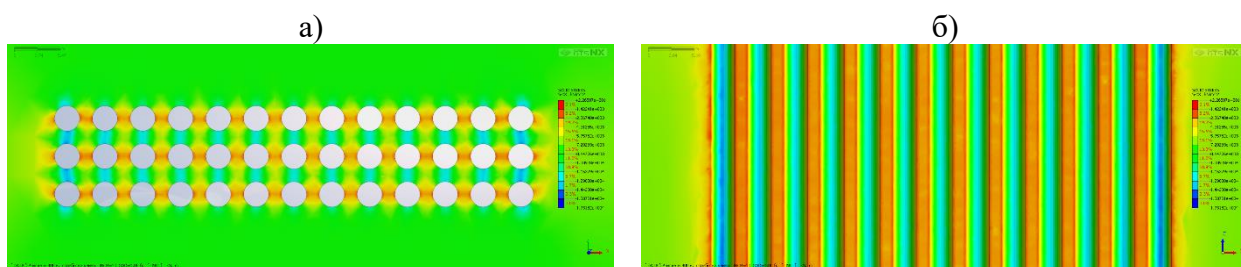


Рисунок 14.1 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.422 \div 17.318$ МПа.

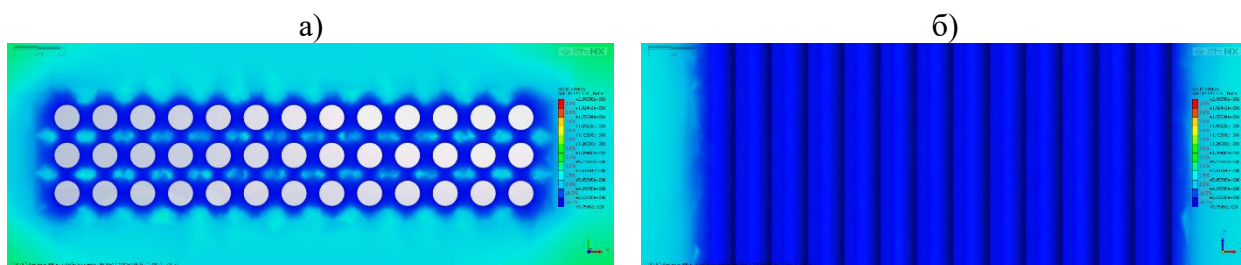


Рисунок 14.2 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.97 \div 20.90$.

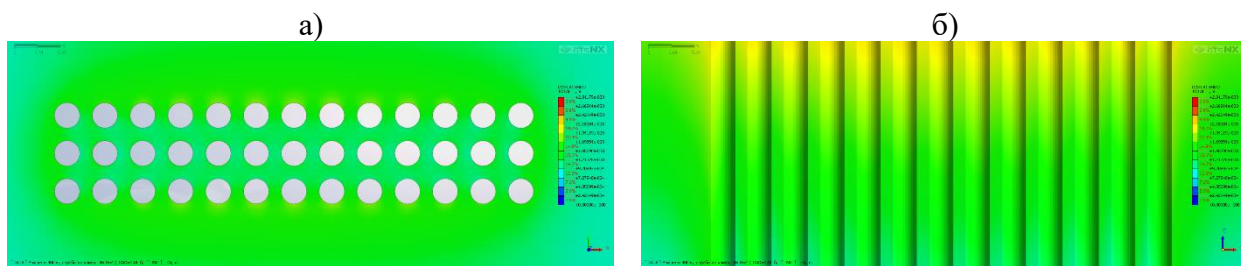


Рисунок 14.3 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00291$ м.

Модель 5 (H=400 м)

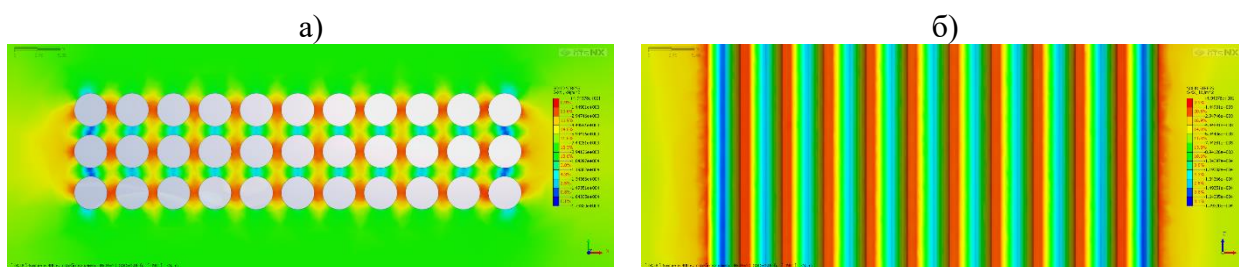


Рисунок 15.1 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.449 \div 17.932$ МПа.

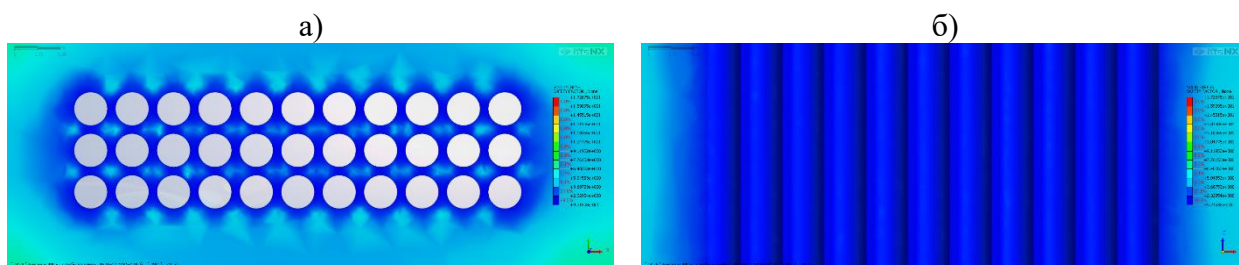


Рисунок 15.2 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.97 \div 17.26$.

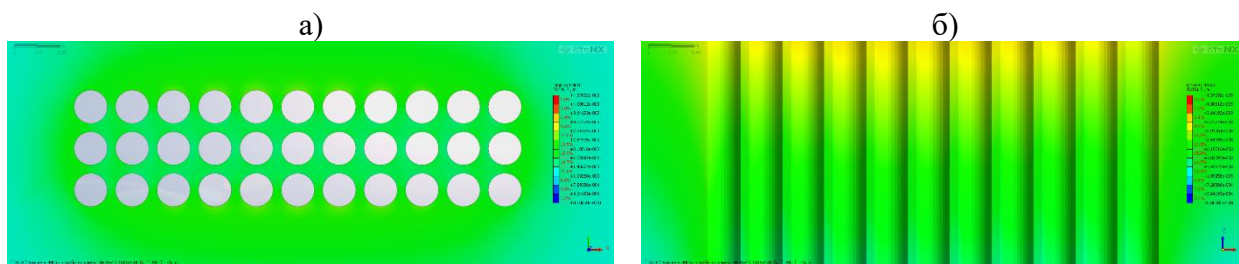


Рисунок 15.3 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00437$ м.

Модель 6 (H=400 м)

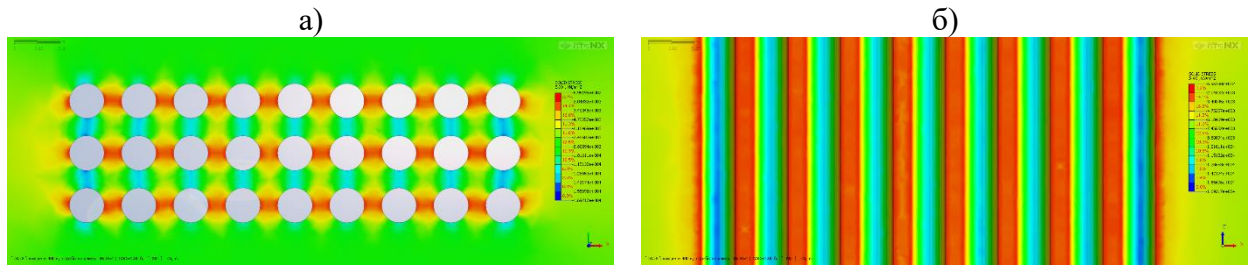


Рисунок 16.1 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.696 \div 16.921$ МПа.

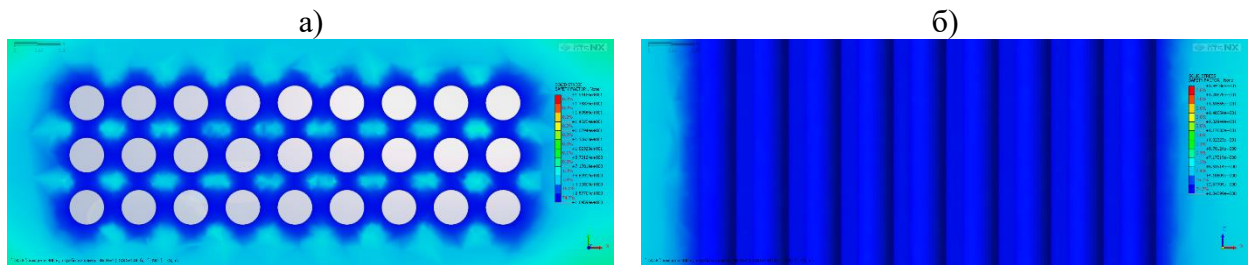


Рисунок 16.2 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.04 \div 19.41$.

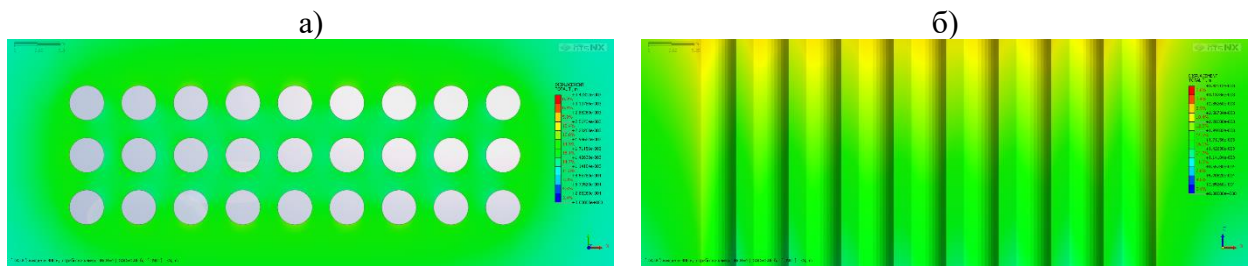


Рисунок 16.3 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00342$ м.

Модель 7 (H=400 м)

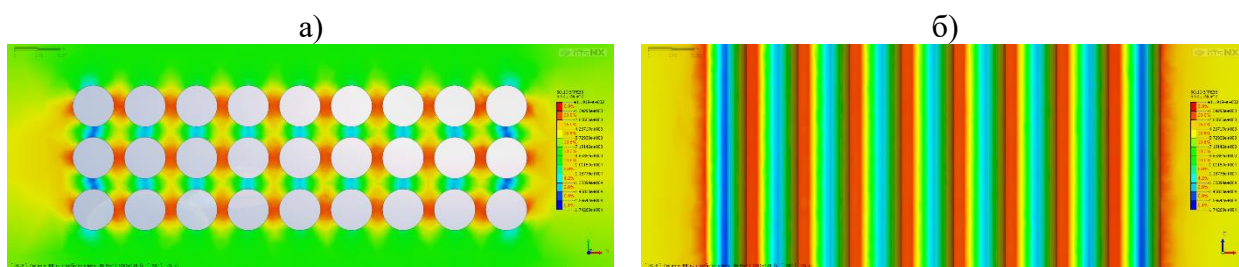


Рисунок 17.1 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.342 \div 17.426$ МПа.

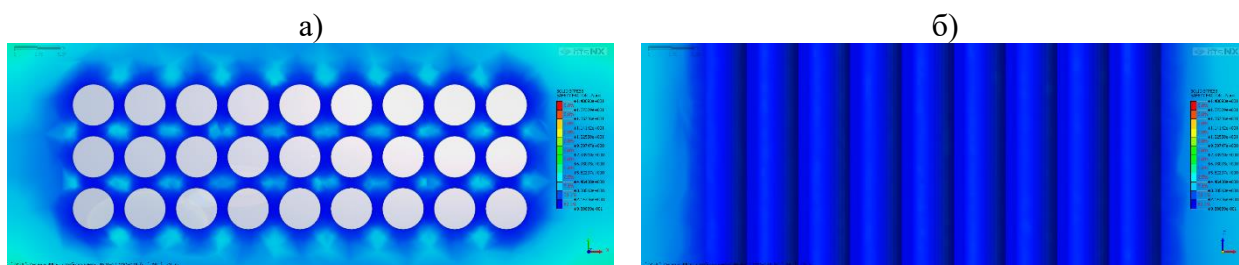


Рисунок 17.2 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.99 \div 14.89$.

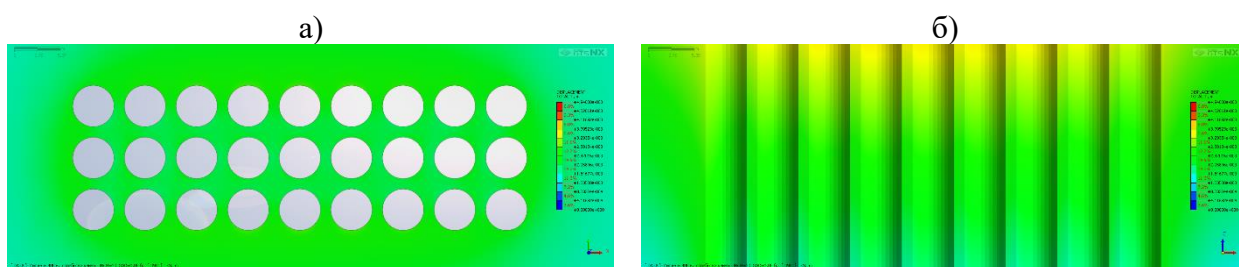


Рисунок 17.3 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00494$ м.

Модель 8 (H=400 м)

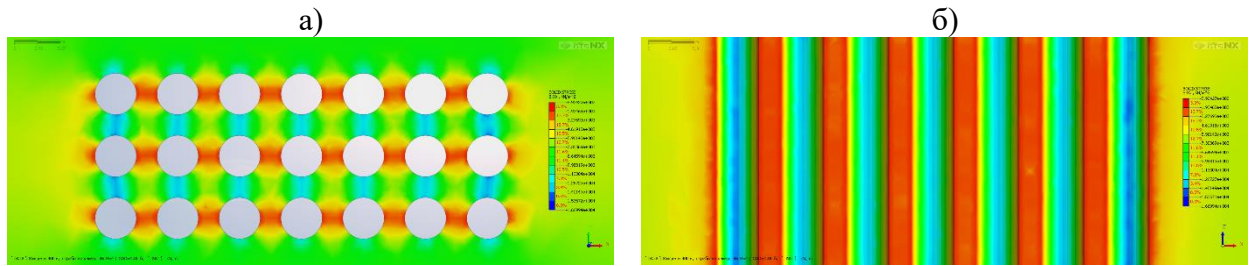


Рисунок 18.1 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.592 \div 16.699$ МПа.

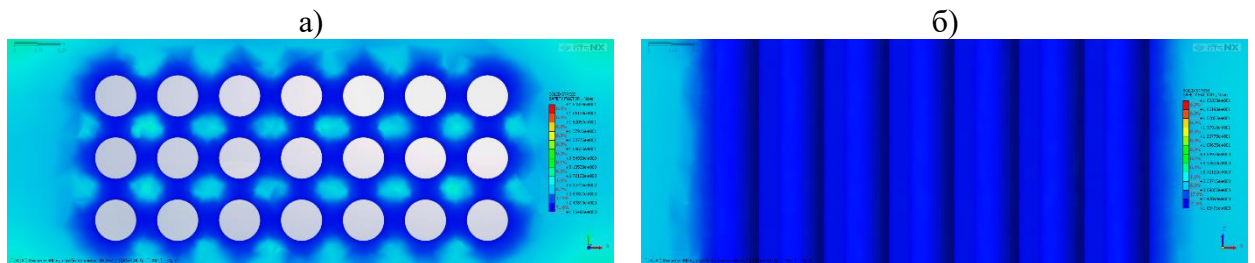


Рисунок 18.2 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.06 \div 18.03$.

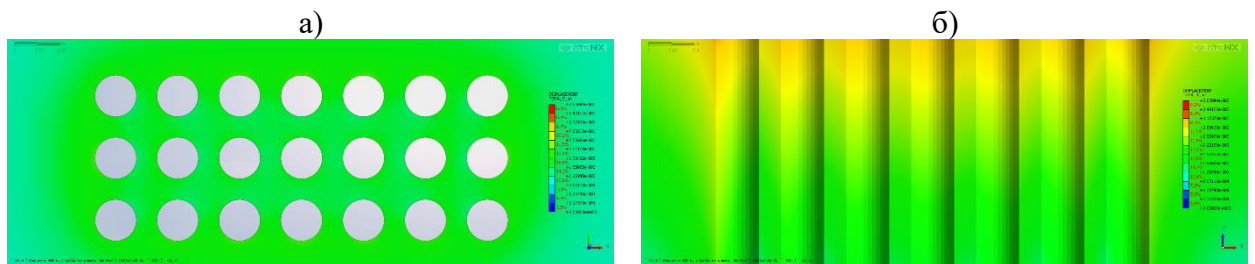


Рисунок 18.3 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00380$ м.

Модель 9 (H=400 м)

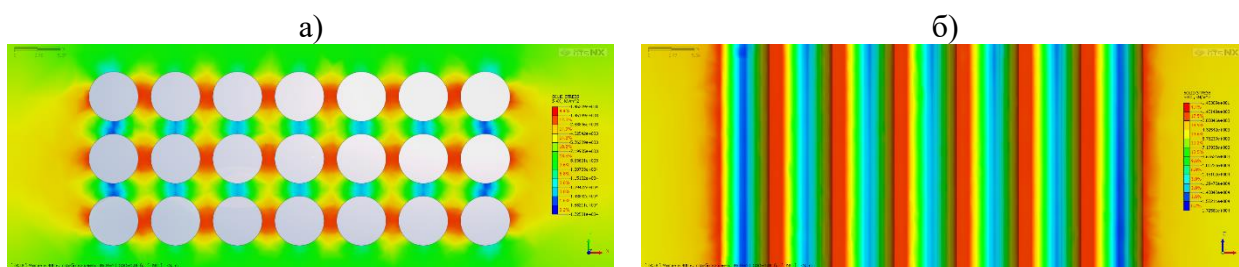


Рисунок 19.1 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.014 \div 17.258$ МПа.

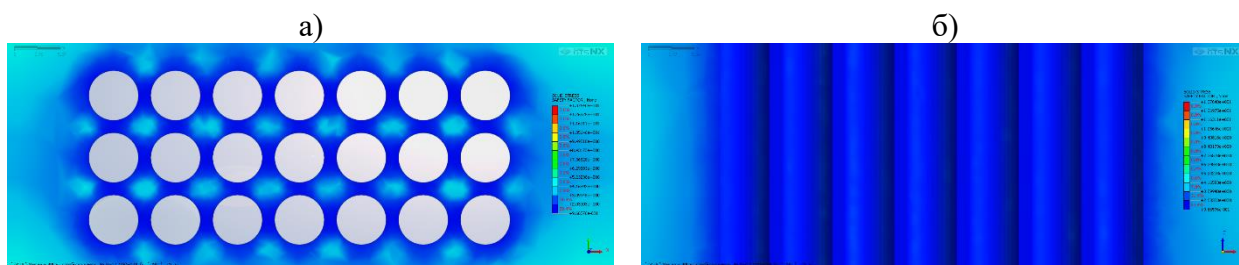


Рисунок 19.2 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.96 \div 13.76$.

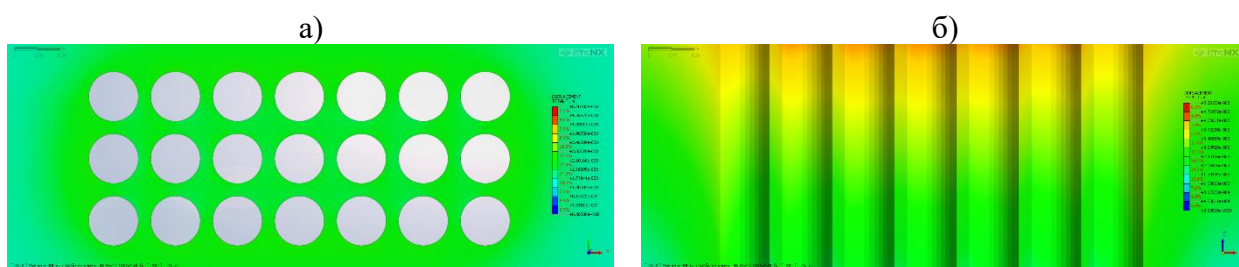


Рисунок 19.3 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00520$ м.

Модель 10 (H=400 м)

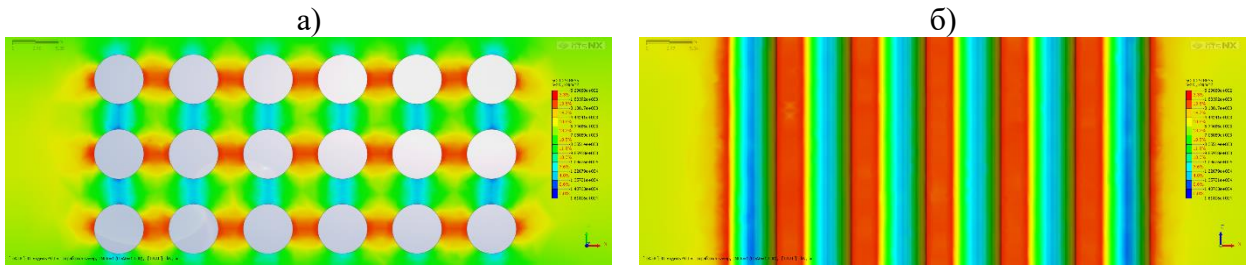


Рисунок 20.1 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.529 \div 16.180$ МПа.

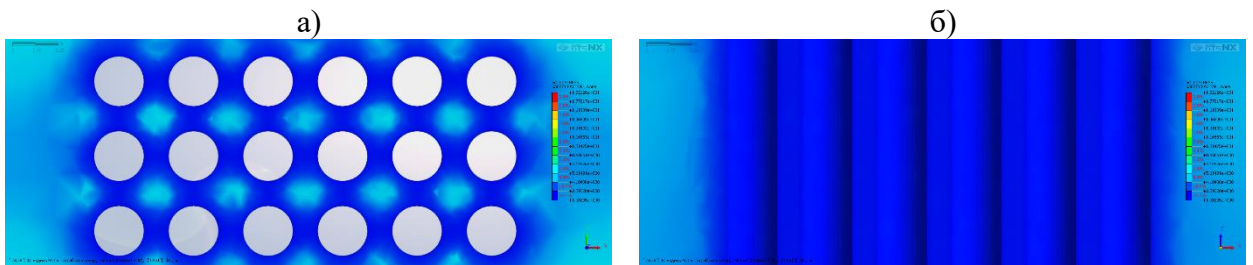


Рисунок 20.2 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $1.08 \div 19.21$.

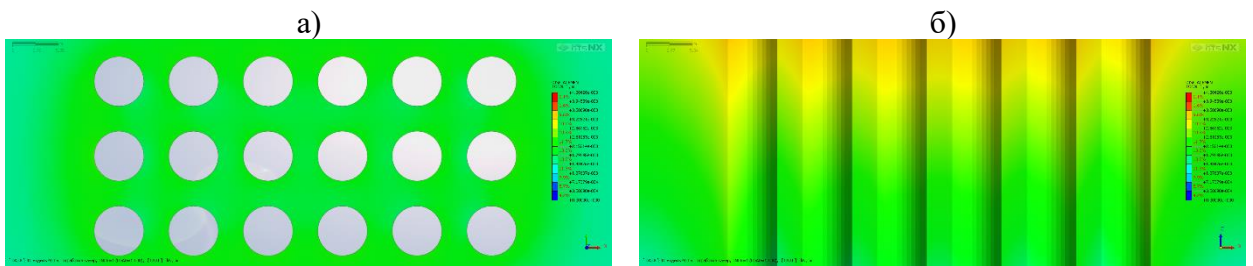


Рисунок 20.3 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=400$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00430$ м.

Модель 1 (H=600 м)

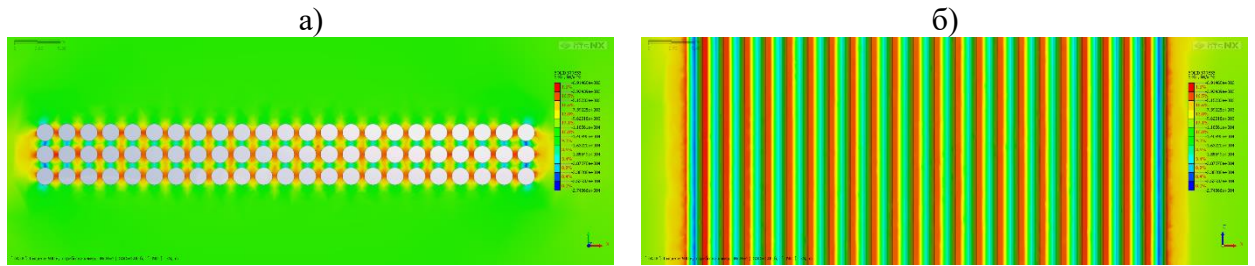


Рисунок 21.1 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.691 \div 27.486$ МПа.

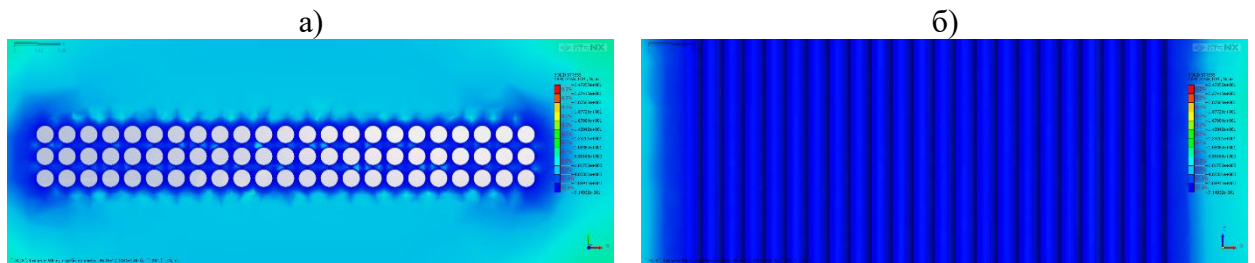


Рисунок 21.2 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 24.72$.

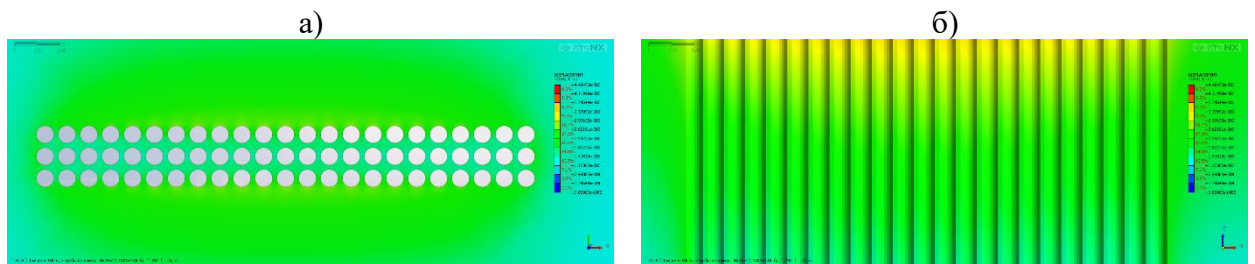


Рисунок 21.3 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00449$ м.

Модель 2 (H=600 м)

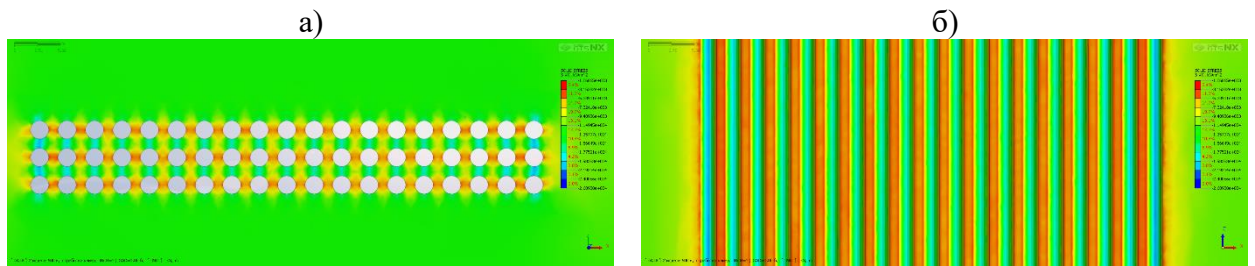


Рисунок 22.1 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.068 \div 26.090$ МПа.

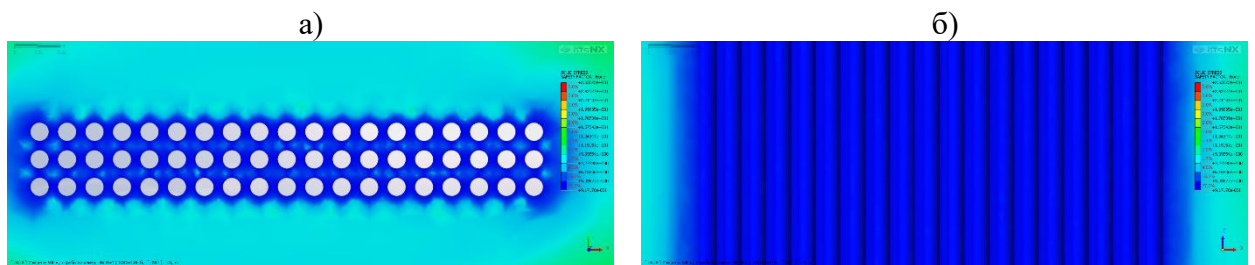


Рисунок 22.2 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 26.35$.

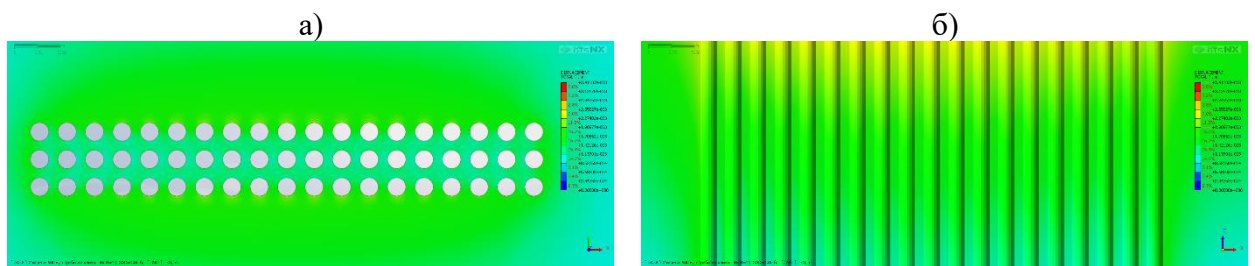


Рисунок 22.3 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00341$ м.

Модель 3 (H=600 м)

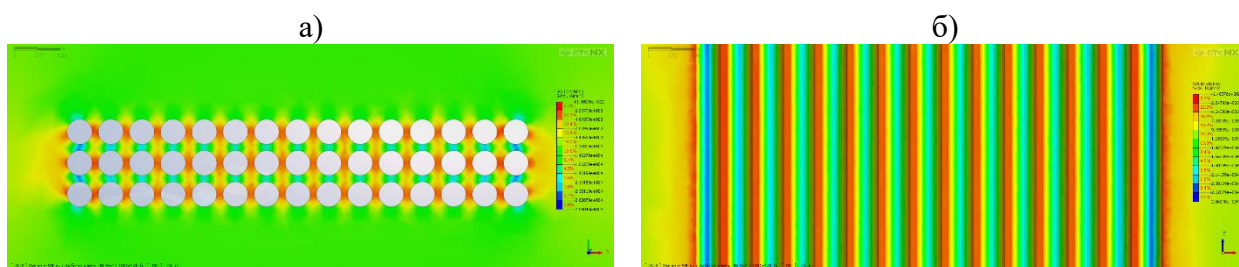


Рисунок 23.1 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений 2.247÷28.604 МПа.

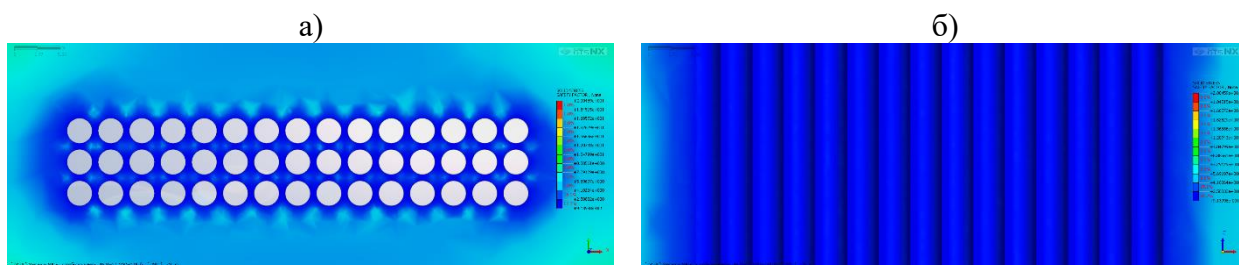


Рисунок 23.2 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП 0.91÷20.04.

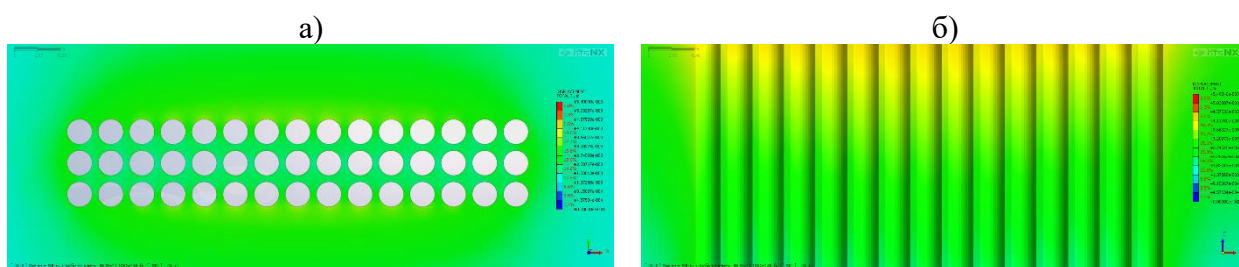


Рисунок 23.3 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений 0.00000÷0.00549 м.

Модель 4 (H=600 м)

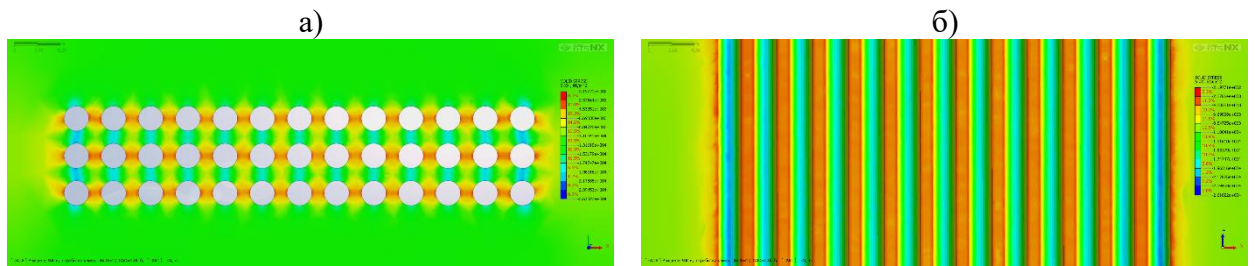


Рисунок 24.1 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.219 \div 26.102$ МПа.

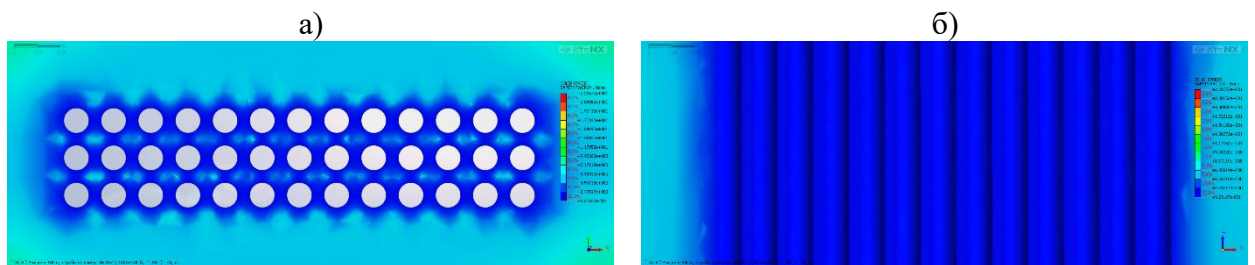


Рисунок 24.2 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 22.66$.

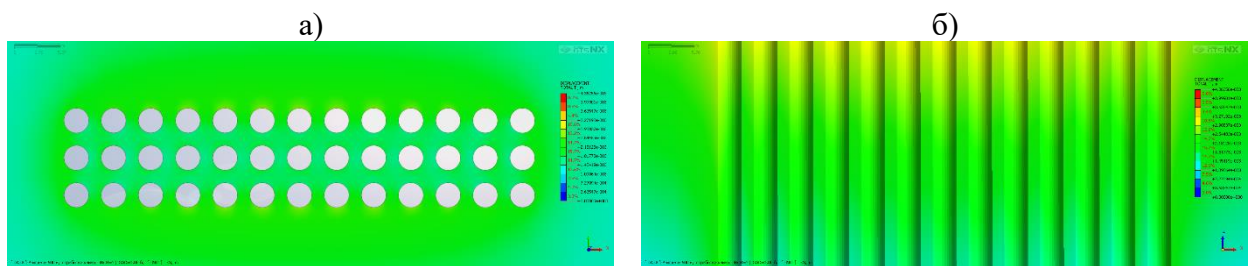


Рисунок 24.3 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00436$ м.

Модель 5 (H=600 м)

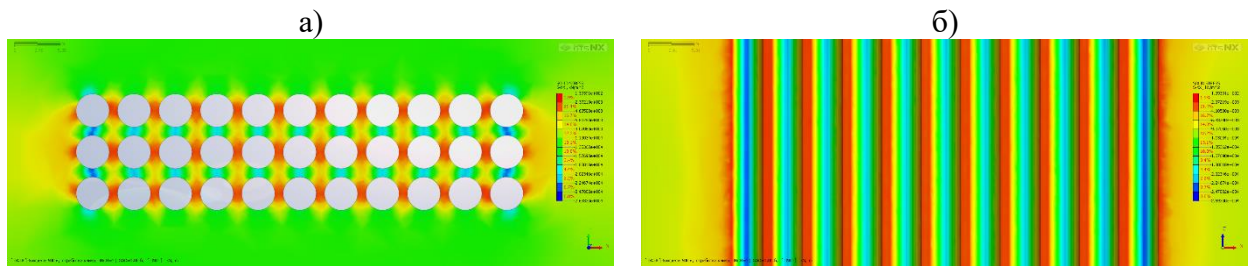


Рисунок 25.1 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.139 \div 26.933$ МПа.

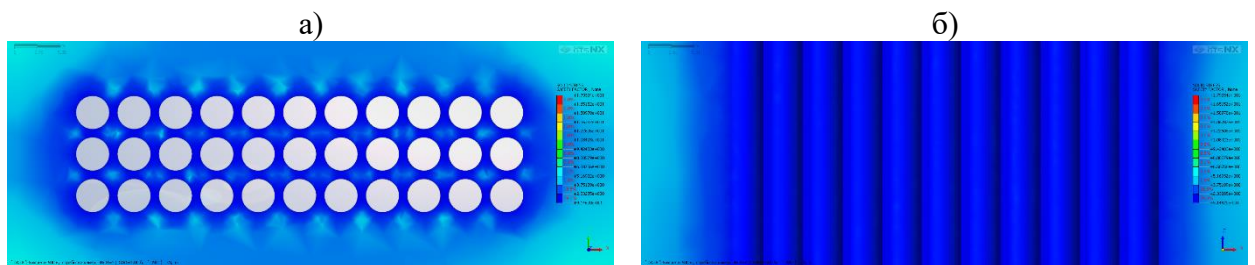


Рисунок 25.2 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 17.93$.

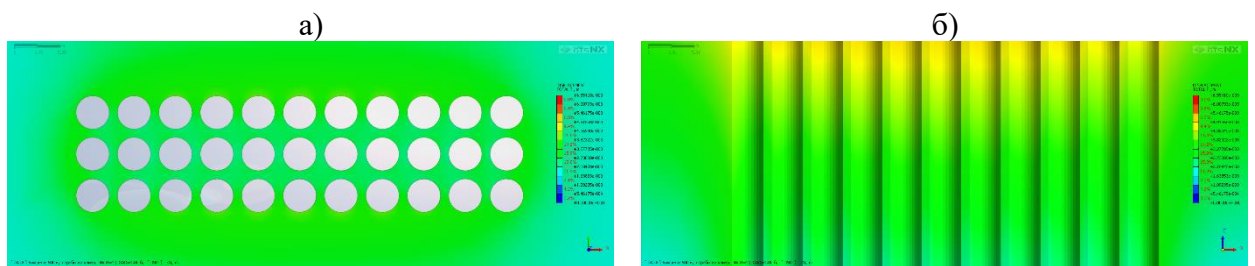


Рисунок 25.3 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00655$ м.

Модель 6 (H=600 м)

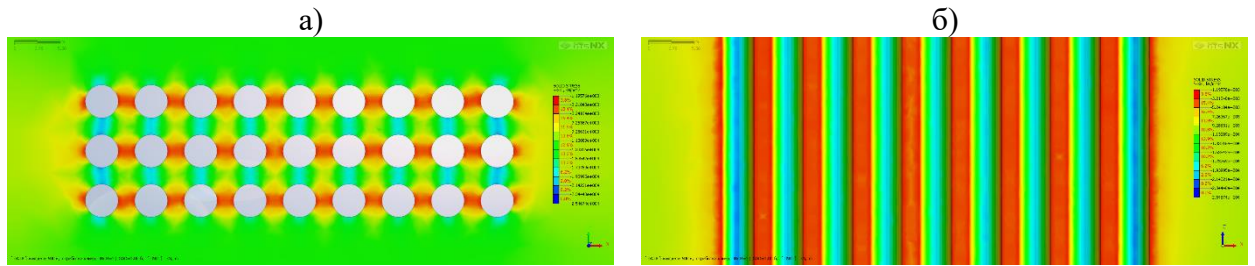


Рисунок 26.1 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений 1.195÷25.467 МПа.

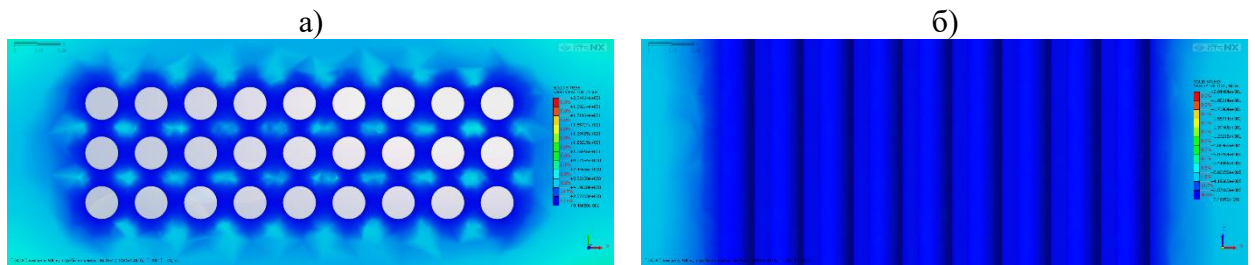


Рисунок 26.2 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП 0.94÷20.44.

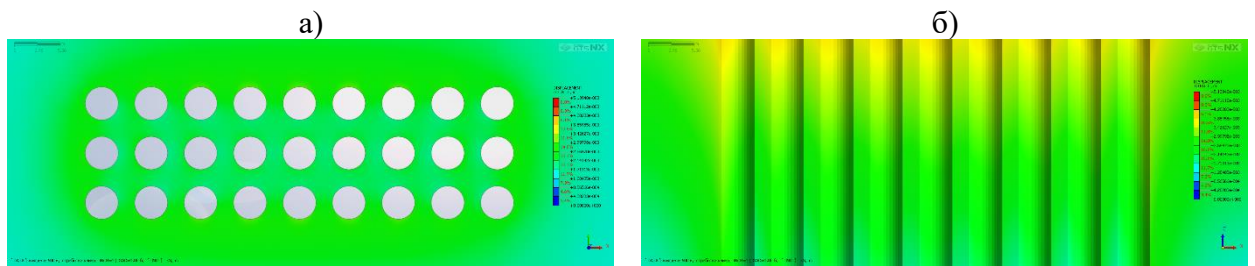


Рисунок 26.3 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений 0.00000÷0.00513 м.

Модель 7 (H=600 м)

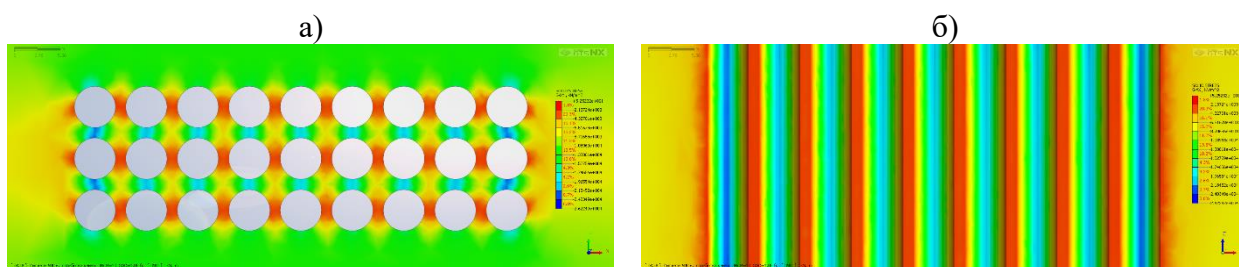


Рисунок 27.1 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений 2.137÷26.224 МПа.

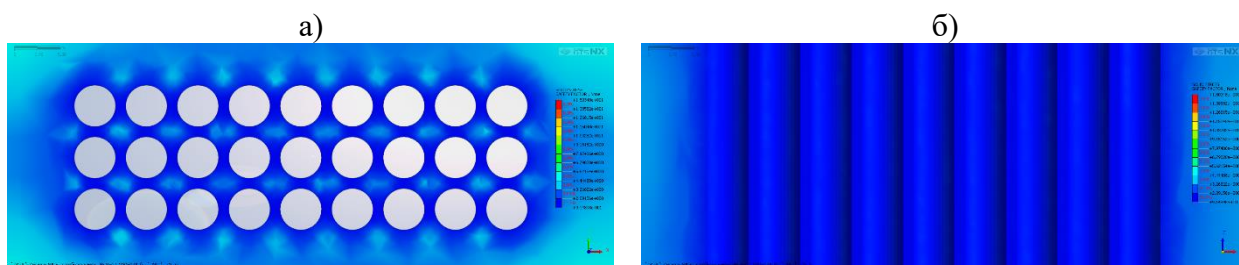


Рисунок 27.2 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП 0.91÷15.03.

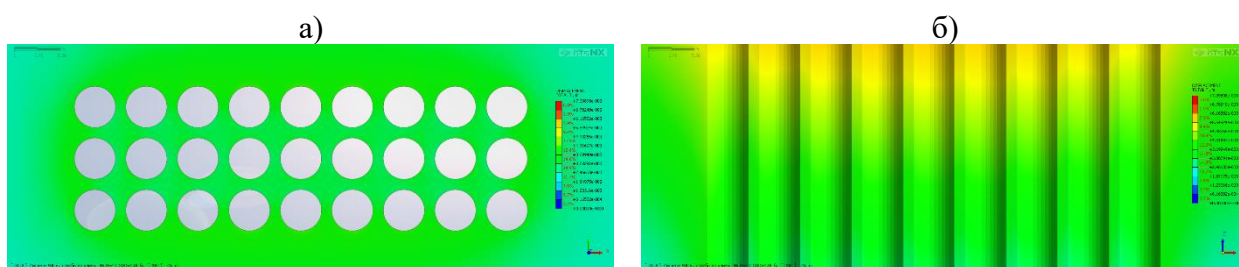


Рисунок 27.3 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений 0.00000÷0.00740 м.

Модель 8 (H=600 м)

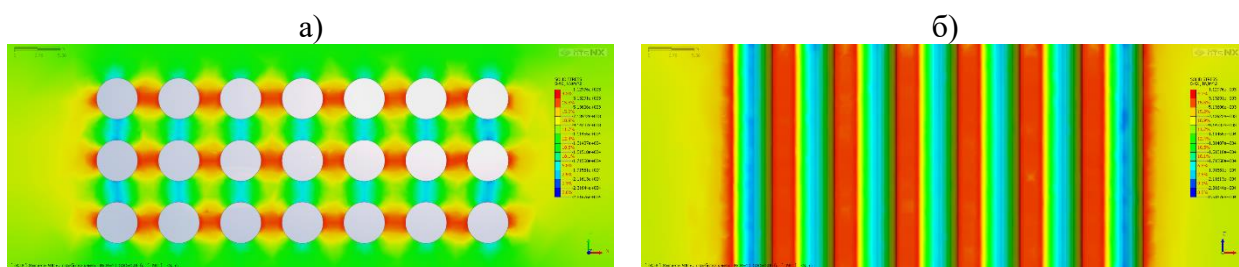


Рисунок 28.1 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.129\div 25.167$ МПа.

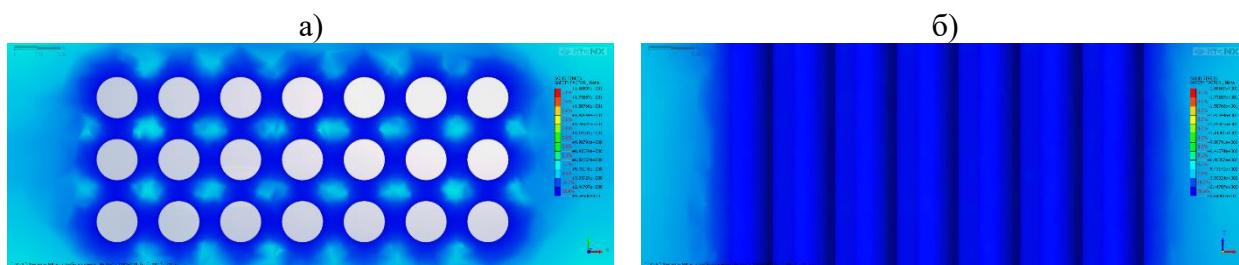


Рисунок 28.2 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.95\div 18.86$.

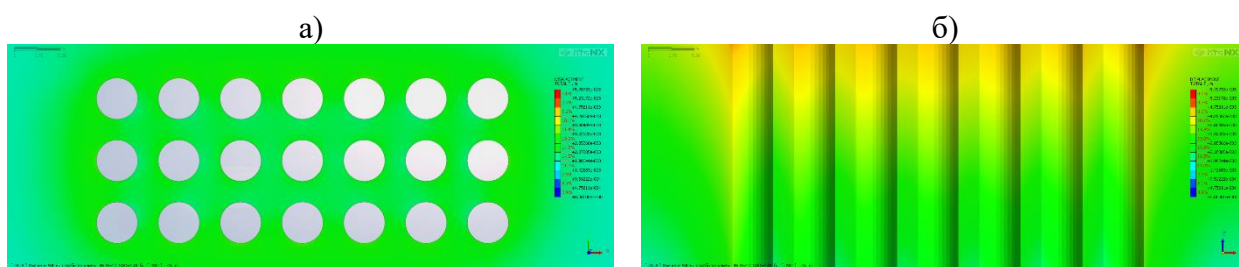


Рисунок 28.3 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000\div 0.00570$ м.

Модель 9 (H=600 м)

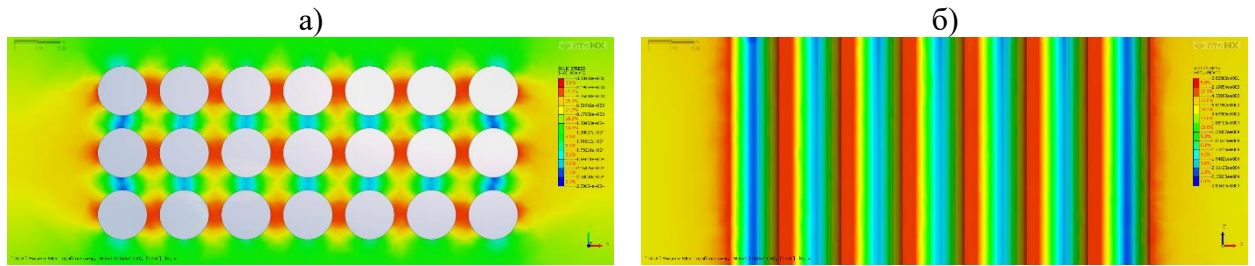


Рисунок 29.1 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.038 \div 25.963$ МПа.

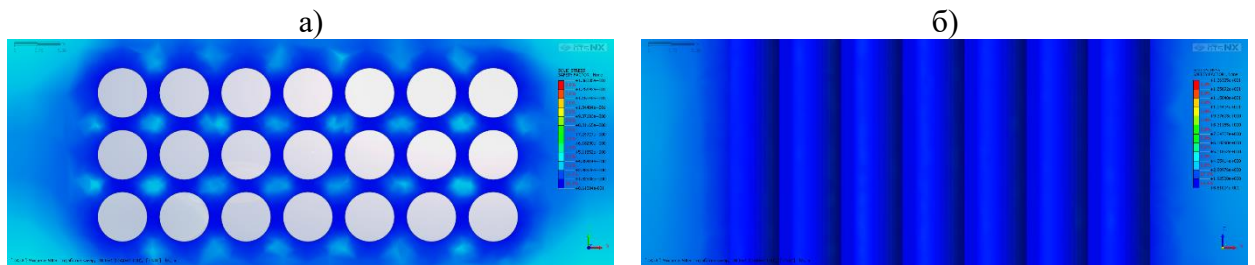


Рисунок 29.2 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.86 \div 13.63$.

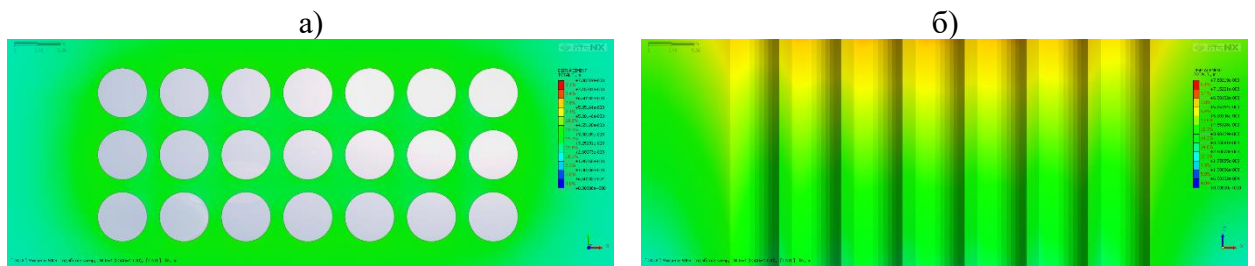


Рисунок 29.3 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00780$ м.

Модель 10 (H=600 м)

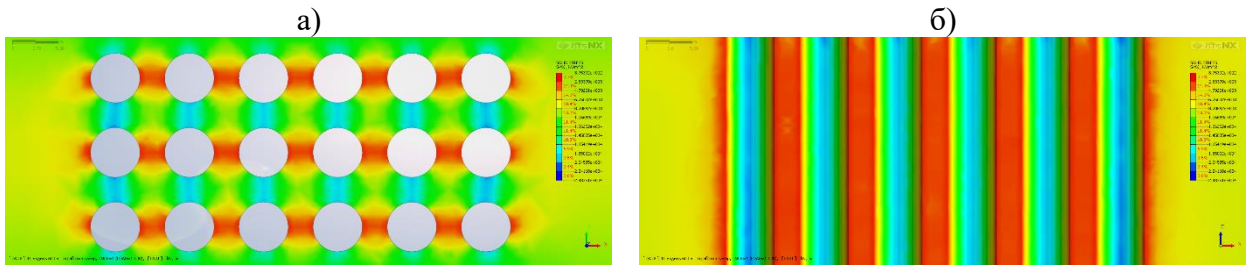


Рисунок 30.1 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.875 \div 24.375$ МПа.

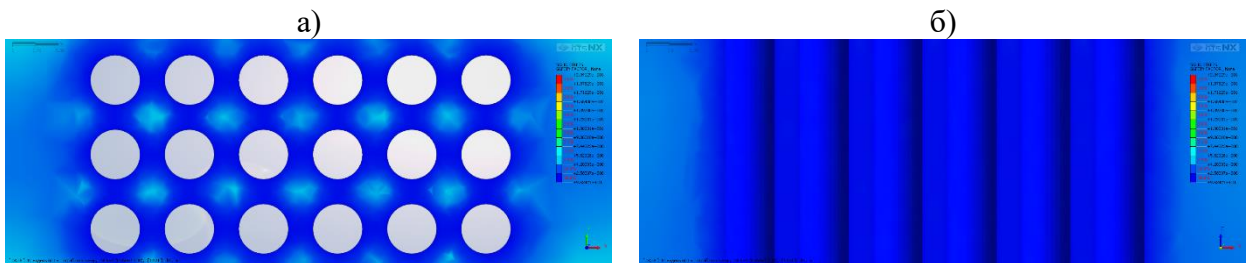


Рисунок 30.2 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.96 \div 20.40$.

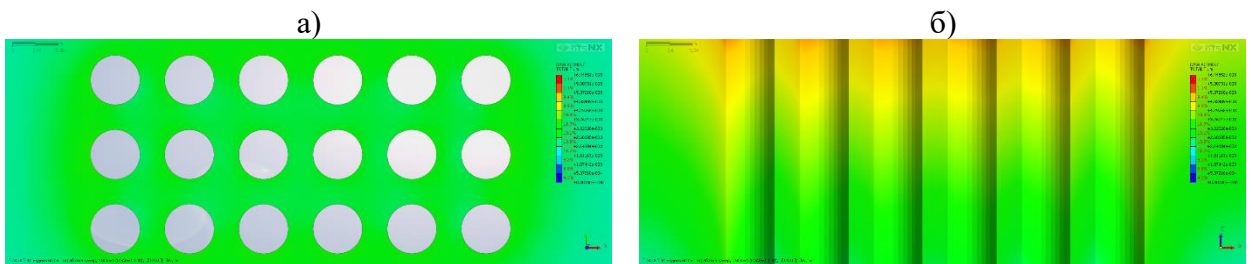


Рисунок 30.3 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=600$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00644$ м.

Модель 1 (H=1000 м)

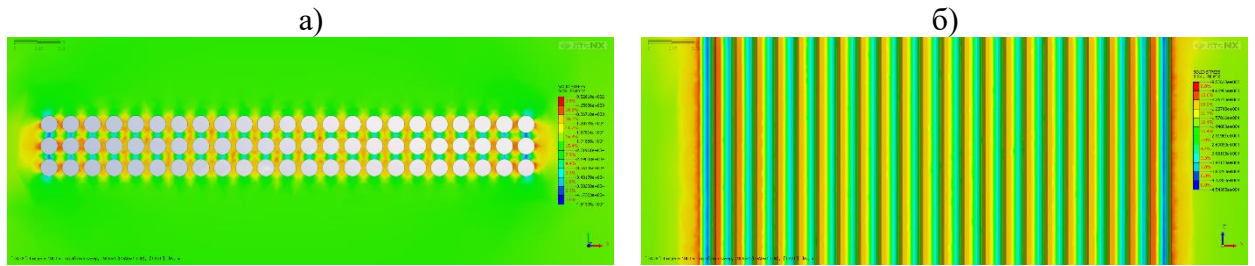


Рисунок 31.1 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.952 \div 45.439$ МПа.

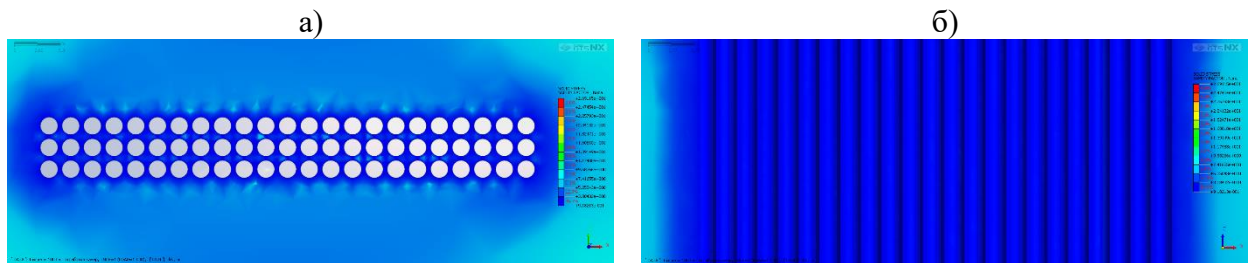


Рисунок 31.2 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 26.91$.

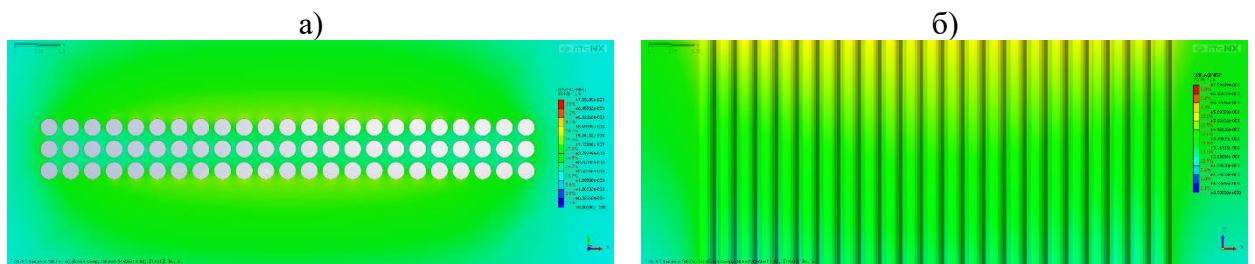


Рисунок 31.3 – Результаты численного моделирования (модель 1) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00759$ м.

Модель 2 (H=1000 м)

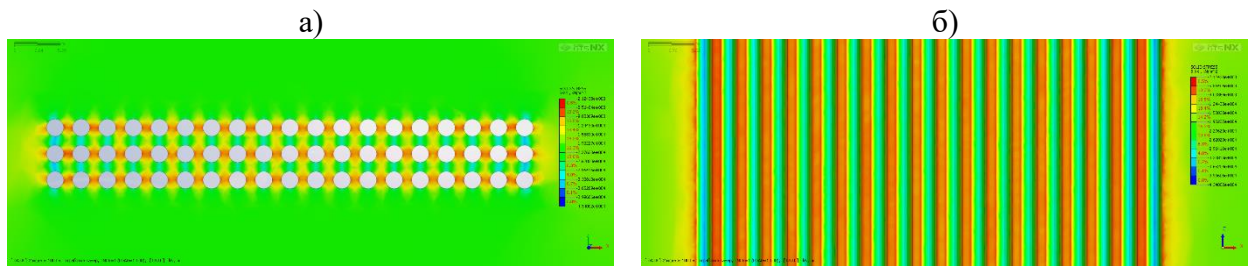


Рисунок 32.1 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $2.124 \div 43.400$ МПа.

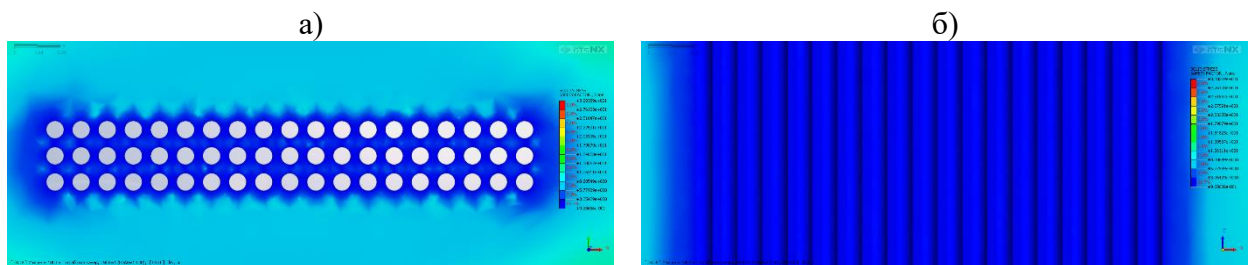


Рисунок 32.2 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 30.03$.

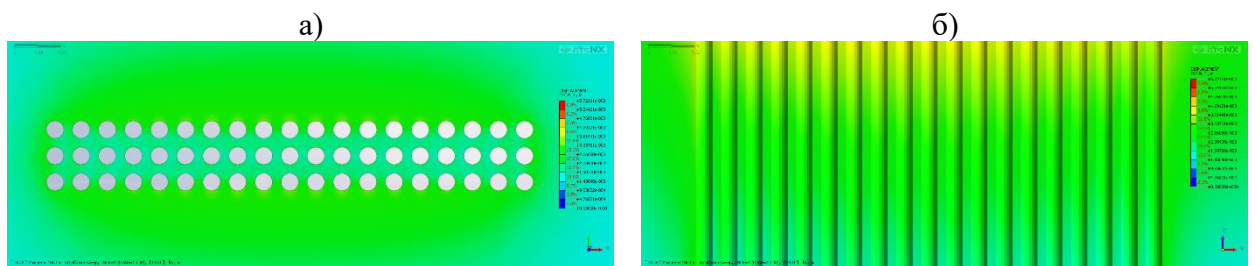


Рисунок 32.3 – Результаты численного моделирования (модель 2) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00572$ м.

Модель 3 (H=1000 м)

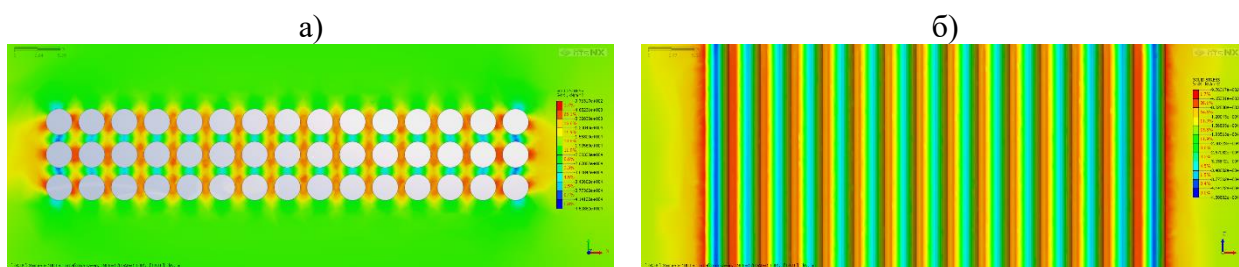


Рисунок 33.1 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.976 \div 45.088$ МПа.

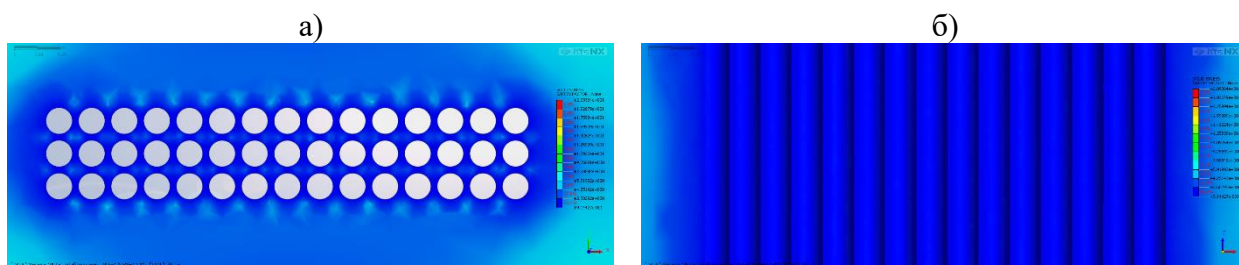


Рисунок 33.2 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 20.93$.

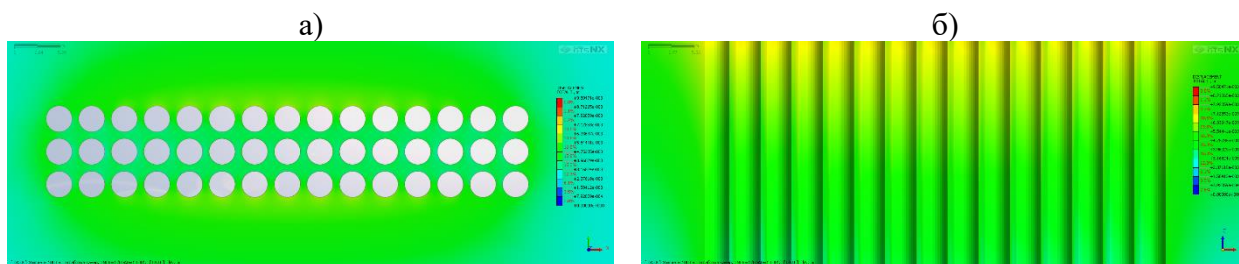


Рисунок 33.3 – Результаты численного моделирования (модель 3) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00950$ м.

Модель 4 (H=1000 м)

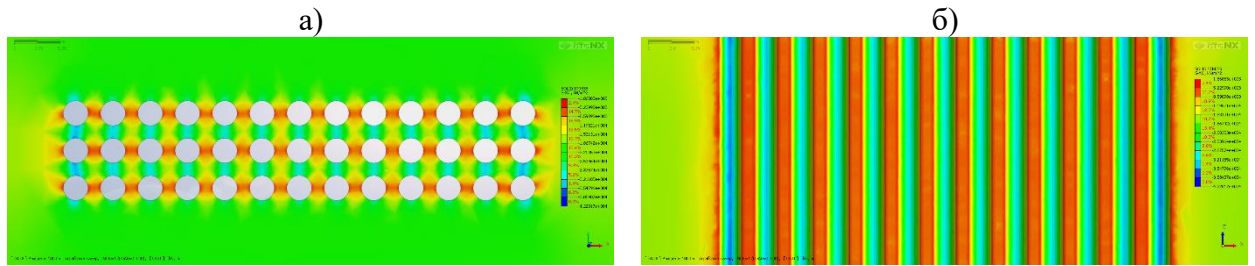


Рисунок 34.1 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.868 \div 42.201$ МПа.

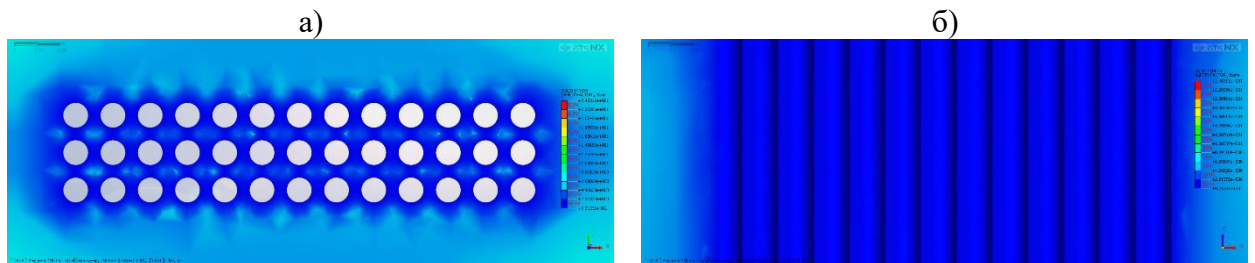


Рисунок 34.2 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 24.83$.

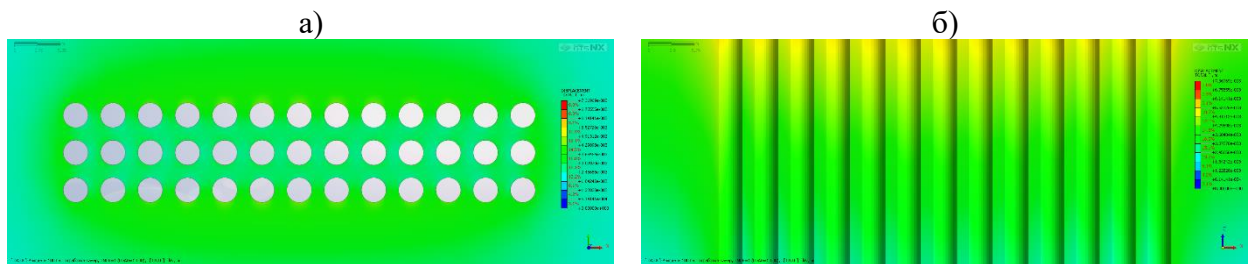


Рисунок 34.3 – Результаты численного моделирования (модель 4) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00736$ м.

Модель 5 (H=1000 м)

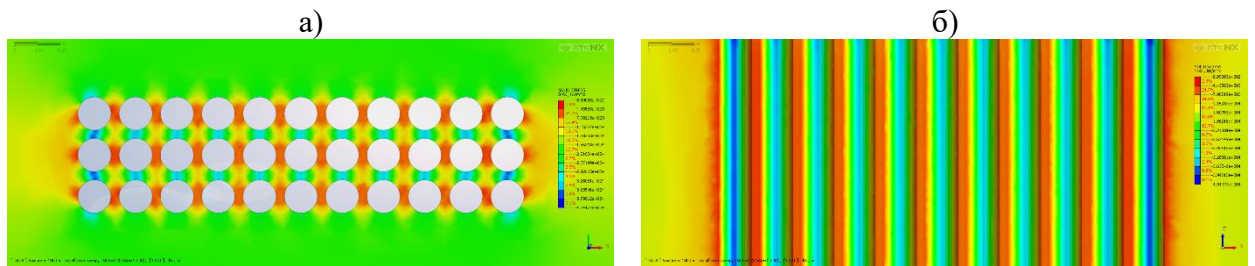


Рисунок 35.1 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.889 \div 43.447$ МПа.

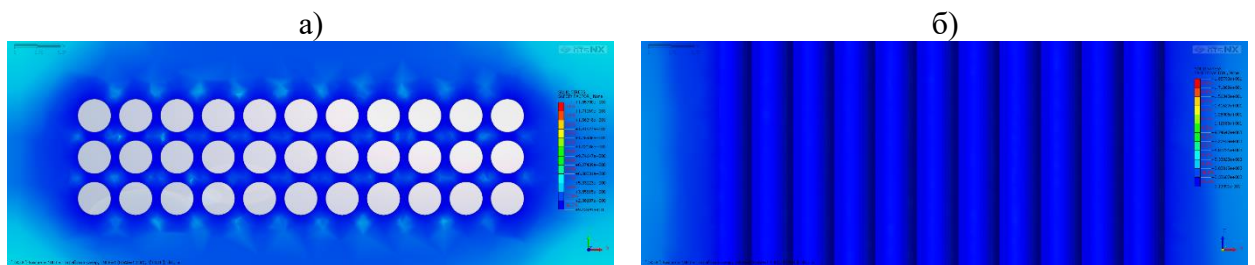


Рисунок 35.2 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 18.58$.

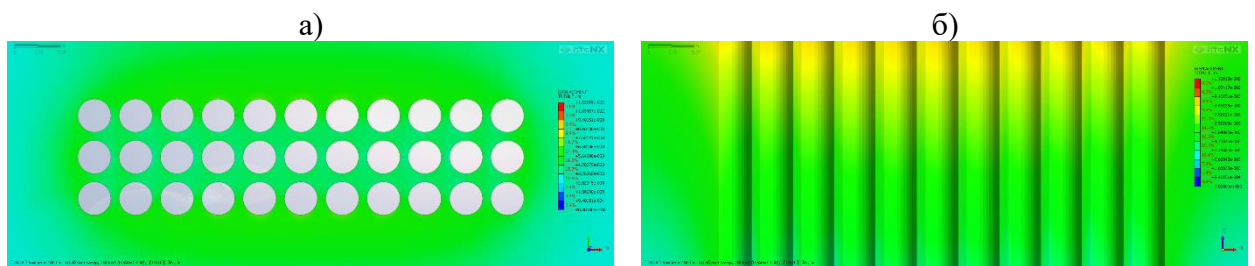


Рисунок 35.3 – Результаты численного моделирования (модель 5) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.01128$ м.

Модель 6 (H=1000 м)

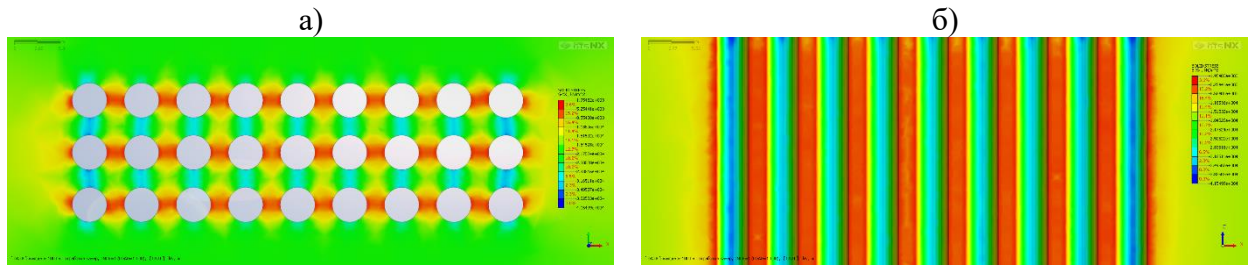


Рисунок 36.1 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.954\div 41.549$ МПа.

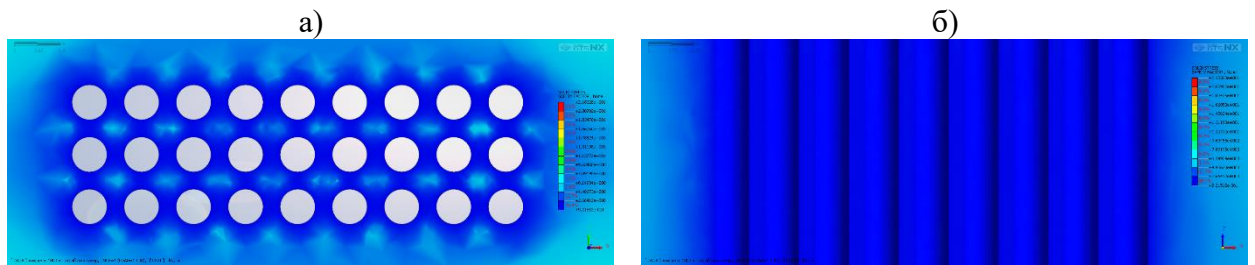


Рисунок 36.2 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92\div 21.83$.

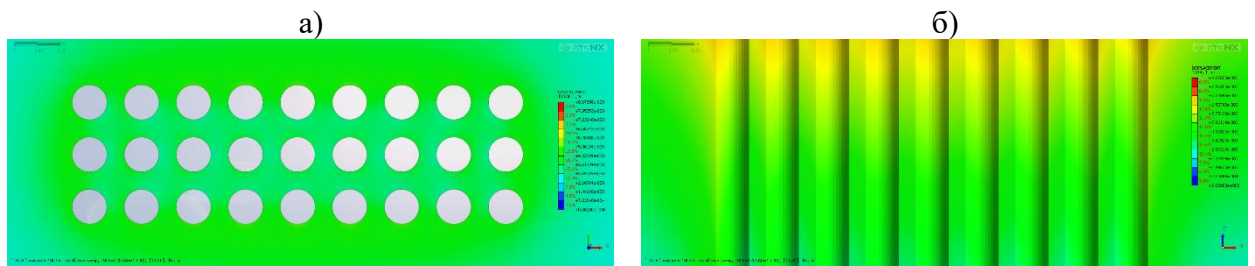


Рисунок 36.3 – Результаты численного моделирования (модель 6) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000\div 0.00867$ м.

Модель 7 (H=1000 м)

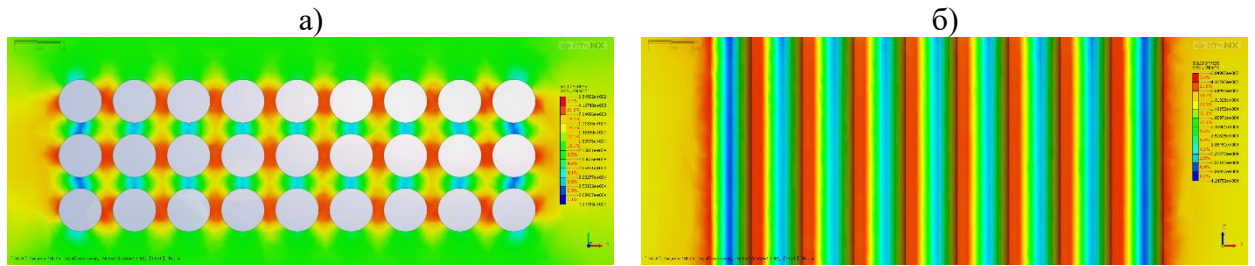


Рисунок 37.1 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.684 \div 42.475$ МПа.

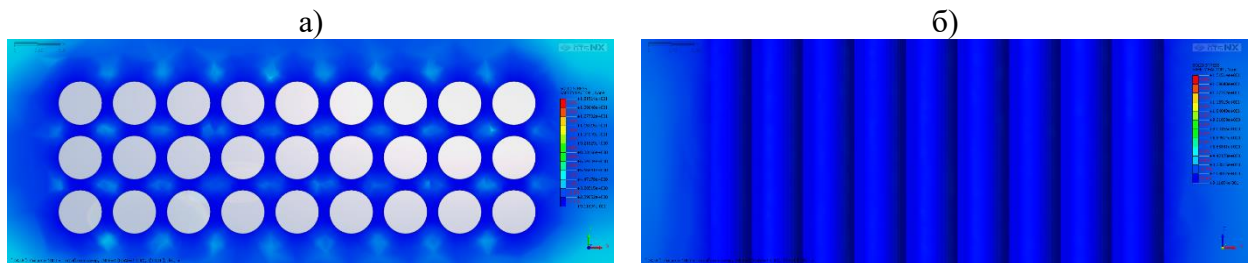


Рисунок 37.2 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 15.15$.

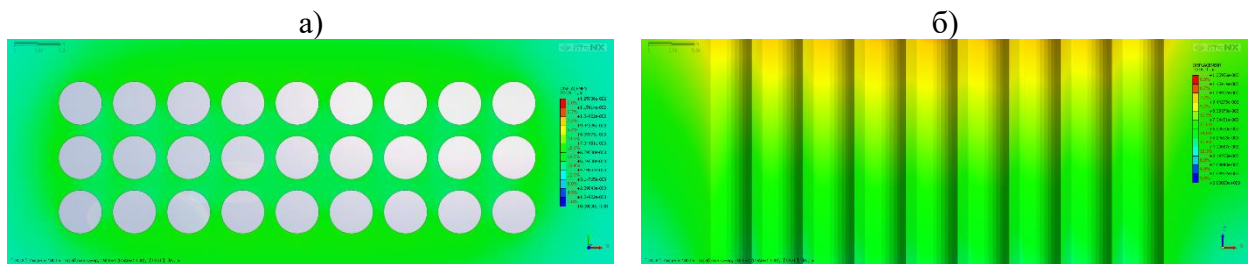


Рисунок 37.3 – Результаты численного моделирования (модель 7) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.01259$ м.

Модель 8 (H=1000 м)

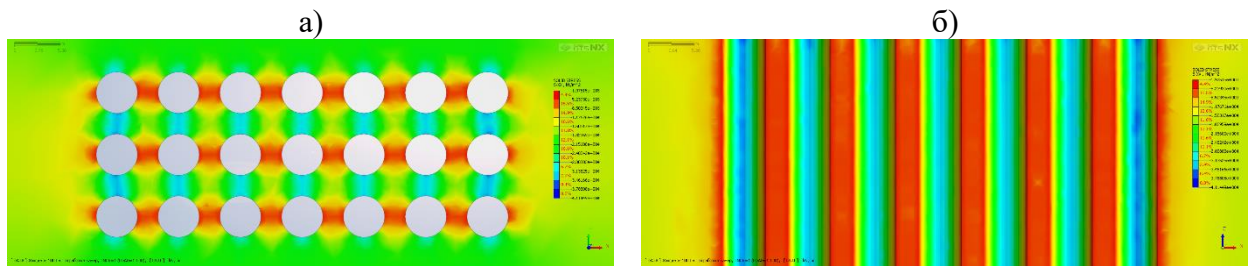


Рисунок 38.1 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.975 \div 41.144$ МПа.

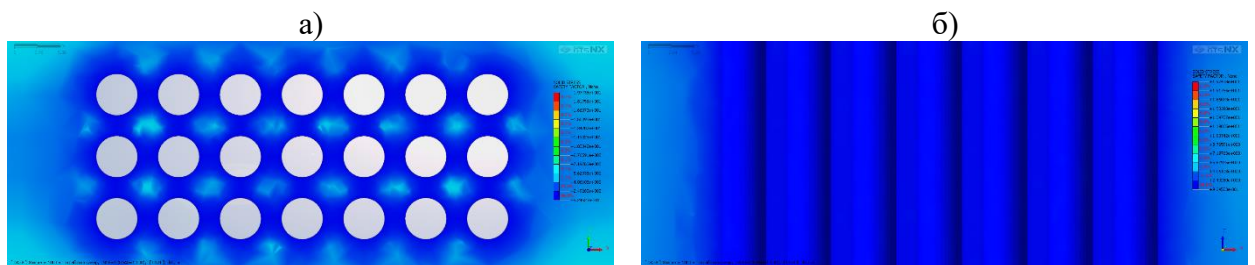


Рисунок 38.2 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 19.74$.

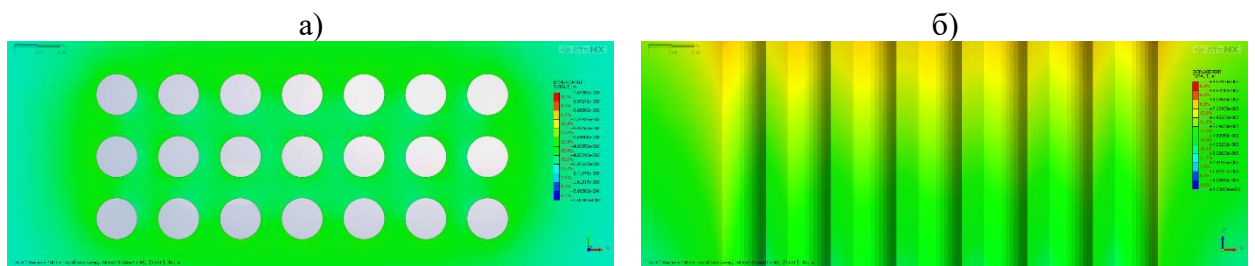


Рисунок 38.3 – Результаты численного моделирования (модель 8) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.00967$ м.

Модель 9 (H=1000 м)

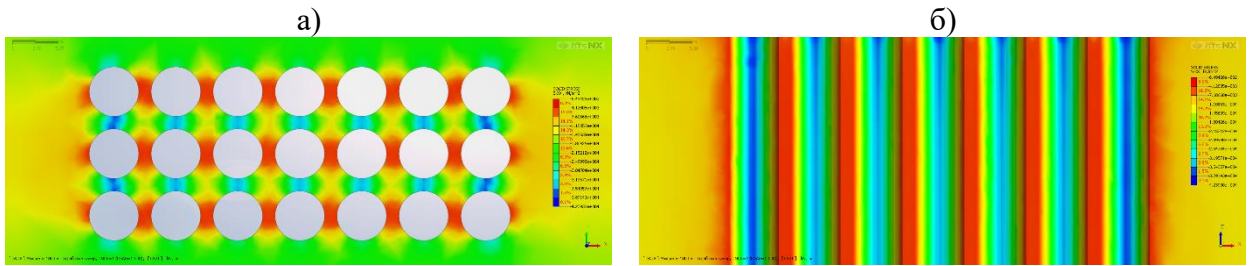


Рисунок 39.1 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $0.649 \div 42.393$ МПа.

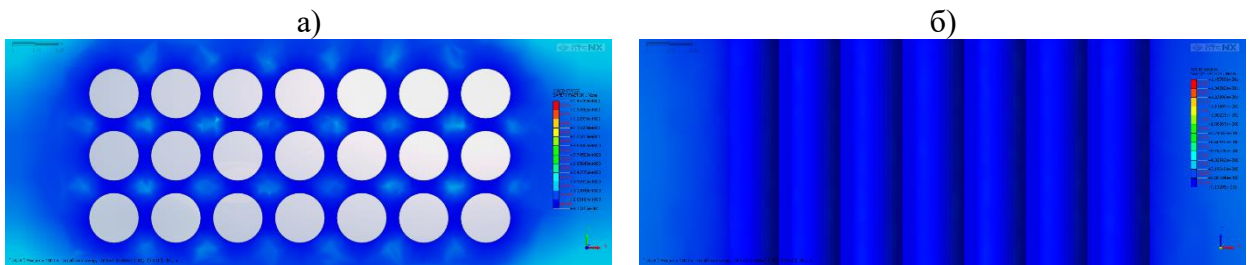


Рисунок 39.2 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.91 \div 14.57$.

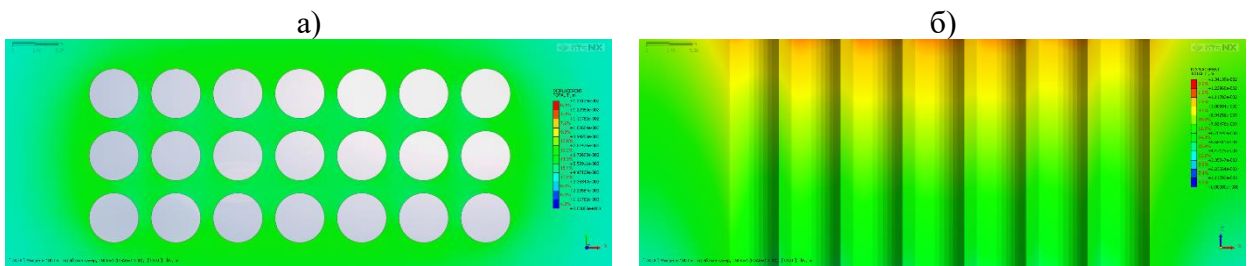


Рисунок 39.3 – Результаты численного моделирования (модель 9) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.01341$ м.

Модель 10 (H=1000 м)

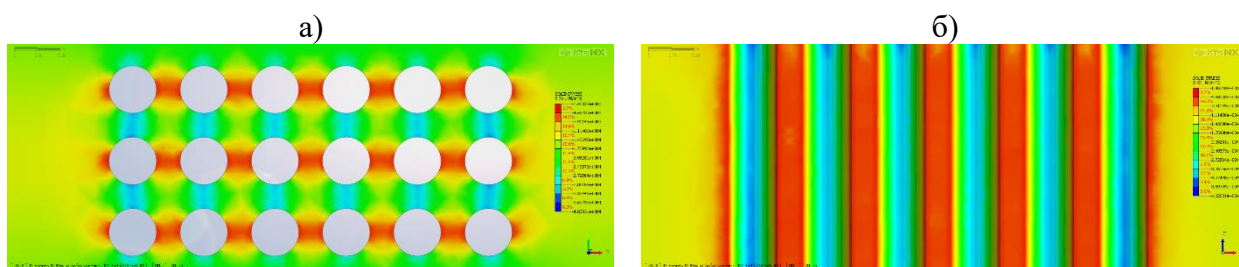


Рисунок 40.1 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных напряжений во вмещающем вертикальные камеры цилиндрической формы массиве на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез блока/модели; б – вертикальный разрез). S-XX – максимальные напряжения на завершающей расчетной стадии: диапазон напряжений $1.453 \div 40.203$ МПа.

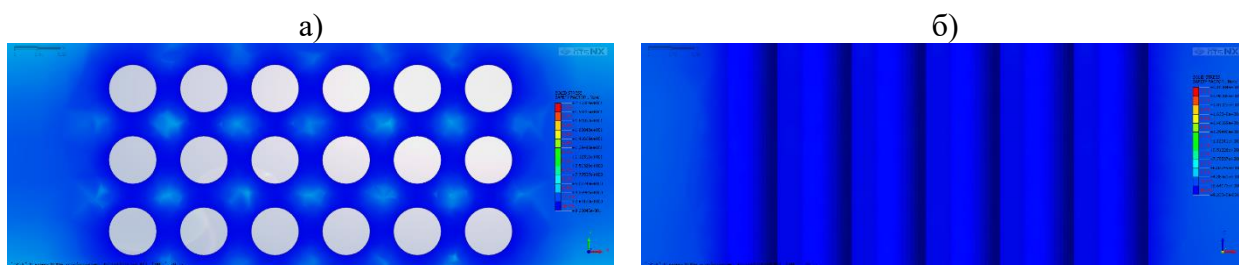


Рисунок 40.2 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением КЗП МКЦ на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). SAFETY FACTOR – максимальный КЗП на завершающей расчетной стадии: диапазон КЗП $0.92 \div 21.53$.

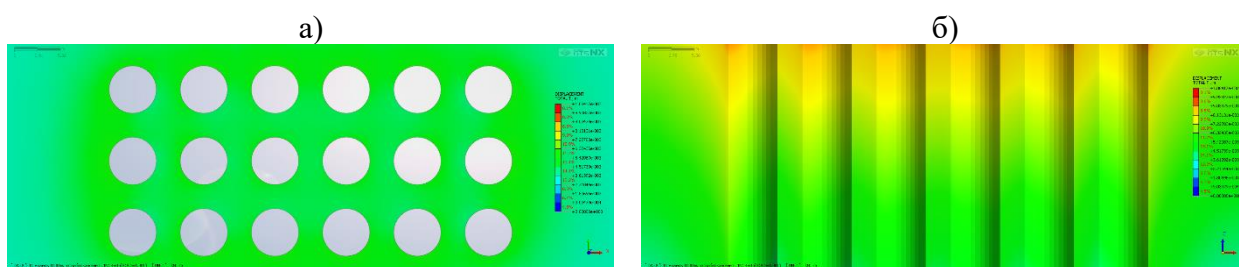


Рисунок 40.3 – Результаты численного моделирования (модель 10) с определением максимальных смещений вмещающего вертикальные камеры цилиндрической формы массива на глубине $H=1000$ м (а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез). DISPLACEMENT TOTAL T – максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.00000 \div 0.01084$ м.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
НИТУ МИСИС, д.т.н., проф.



М.Р. Филонов

« 25 » сентября 2024 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки
Илецкого месторождения каменной соли

Автор:

Аспирант кафедры ФизГео
НИТУ МИСИС

М. Косырева М.А. Косырева

Методика рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры ФизГео
НИТУ МИСИС
Протокол № 2 от 25 сентября 2024 г.

Зав. кафедрой ФизГео, д.ф.-м.н.

В. Винников В.А. Винников

Москва, 2024

Содержание

Введение.....	3
1. Условия разработки Илецкого месторождения каменной соли	4
2. Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли.....	8

Введение

Современный уровень развития геотехнологии освоения соляных месторождений подземным способом с применением камерных систем разработки характеризуется высокой степенью механизации добычных работ и низкой их трудоемкостью, которые обеспечиваются за счет широкого применения комбайновой технологии очистной выемки. Неизбежной платой за такую форму обеспечения высокой производительности труда является опасность горных работ, обусловленная необходимостью постоянного присутствия человека непосредственно в очистном пространстве выемочных камер, а главное – высокими эксплуатационными потерями балансовых запасов в междукамерных целиках (МКЦ), достигающими 60-80% и возрастающими пропорционально увеличению глубины разработки месторождений.

Такая ситуация полностью противоречит современным требованиям к показателям ресурсосбережения и рационального природопользования. Поэтому, учитывая доминирующую тенденцию постоянного увеличения глубины разработки перспективных участков и месторождений, актуальной следует считать проблему поиска принципиально новых геотехнологий, позволяющих кардинально решить проблемы безопасности и полноты извлечения балансовых запасов на основе альтернативных методологических подходов и технических средств для их реализации. Известно, что наиболее простая форма нахождения альтернативы – это принятие решения, противоположного применяемому.

Для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли сформулированы новые принципы построения альтернативной природоподобной геотехнологии, обеспечивающей геомеханически обоснованную минимизацию потерь полезного ископаемого в целиках без снижения степени геодинамической безопасности.

Фундаментальное значение при этом имеет идея изменения направления движения фронта очистной выемки, реализуемой в виде перехода от отработки полезного ископаемого горизонтальными камерами к вариантам восходящей или нисходящей их отработки вертикальными камерами цилиндрической формы методом выбуривания.

В природных биологических системах широко распространены структуры, обеспечивающие высокую прочность и устойчивость при минимальном количестве и массе материала. Такие структуры состоят из внешней оболочки с внутренним объемом, заполненным огромным количеством тонких перегородок, положение которых в пространстве определяется направлением внешних нагрузок. Так устроены стебли злаковых культур, а также кости млекопитающих, которые воспринимают вертикальные нагрузки при движении. В современной бионике эти конструктивные решения природы были воспроизведены в виде так называемых сотовых конструкций, которые достаточно широко используются в авиастроении (конструкция крыльев самолетов), судостроении (конструкция переборок) и др.

Главной отличительной особенностью подобных конструкций является то обстоятельство, что их устойчивость к сжимающим нагрузкам достигается не за счет увеличения количества вещества в несущей конструкции, как это имеет место при использовании камерно-целиковых систем разработки, а за счет высокой относительной жесткости заполнителя, обеспеченной геометрией сотовых ячеек, которая, в свою очередь описывается такими параметрами, как диаметр описанной окружности, форма и размеры МКЦ.

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

1. Условия разработки Илецкого месторождения каменной соли

Верхняя, разведанная часть купола Илецкого месторождения, расположенного в Оренбургской области, до глубины 700 м сложена соляным штоком, который имеет размер в плане 2×1 км (рисунки 2, 3). Месторождение представляет собой соляной купол, покрытый и окруженный в верхней части рыхлыми песчано-галечниковыми отложениями. Геофизические исследования показывают, что соляной купол месторождения прослеживается на глубину до 2 км и более. Запасы каменной соли месторождения уникальные по своим объемам и составу, который не требует обогащения.

В настоящее время второй рудник разрабатывается камерной системой с МКЦ и междуэтажными (МЭЦ) целиками. В условиях отработки Илецкого месторождения камерной системой разработки оставляются целики: разгрузочные, под скважины, околоштрековые, под промплощадку, под соляные радуги и барьерный. Ранее, в прошлом столетии, выемка соли осуществлялась буровзрывным способом, в настоящее время – с применением комбайновой технологии.

Безопасное и эффективное освоение запасов месторождения ввиду наличия затопленного рудника №1 в этаже $\approx +20/-20$ м (отм. земной поверхности +117.54 м) и первого дорабатываемого -132/-160 м, второго отрабатываемого -185/-215 м ($H=305 \div 335$ м), третьего подготовленного и отрабатываемого -230/-270 м этажей рудника №2 (рисунки 1, 4) предполагает решение ряда геомеханических задач: охрана месторождения от затопления; предотвращение проникновения воды в горные выработки; обеспечение сохранности поверхностных объектов для их безопасной и безаварийной эксплуатации; недопущение больших потерь каменной соли. Охрана рудника №2 от затопления обеспечивается наличием водозащитной толщи (ВЗТ) мощностью 130 м до вышележащего затопленного рудника №1.

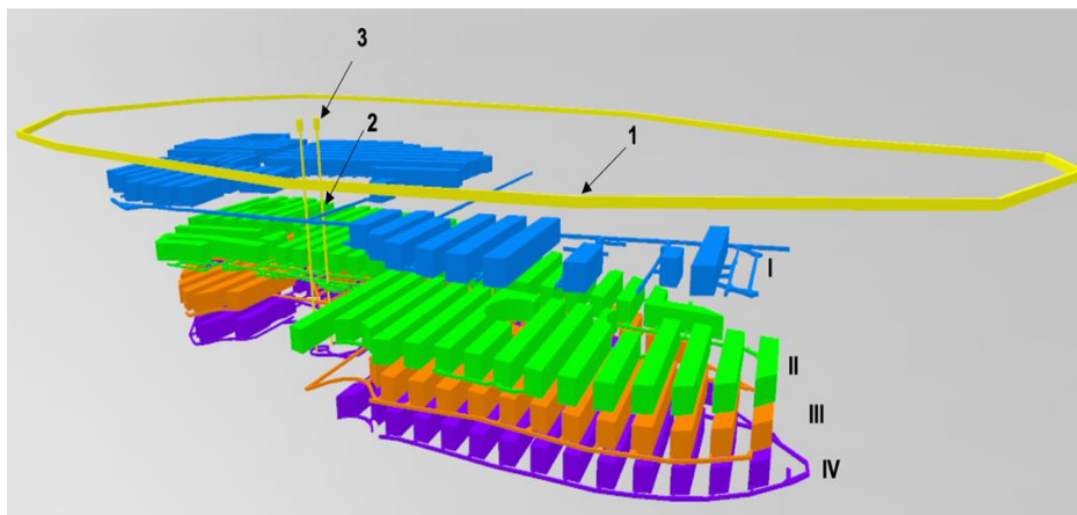


Рисунок 1 – 3D модель горнотехнической системы рудника №2. 1 – граница горного отвода на поверхности; 2 – стволы №№ 5 и 6; 3 – копры; I – затопленный рудник №1; рудник №2: II – этаж -132/-160 м; III – этаж -185/-240 м; IV – этаж -240/-270 м.



Условные обозначения



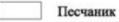

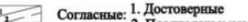



N_{2ok} Акчагальский ярус. Глины пластичные с прослоями песка.	 Пески
P_{2t} Татарский ярус. Песчаники, алевролиты, аргиллиты.	 Алевролиты
P_{2k22} Верхнеказанский подъярус. Переслаивающаяся толща алевролитов и песчаников.	 Песчаник
P_{2k21} Нижнеказанский подъярус. Песчаники, известняки, аргиллиты, алевролиты.	 Каменная соль
P_{2u} Уфимский ярус. Алевролиты, аргиллиты, песчаники.	Стратиграфические границы
P_{2k3} Кунгурский ярус. Сульфато-соленая толща.	 Согласные: 1. Достоверные 2. Предполагаемые
 Нарушенность вмещающих пород (трещиноватость)	 Несогласные: 1. Достоверные 2. Предполагаемые
 Скважины	

Рисунок 3 – Геологическая карта Илецкого месторождения каменной соли (вертикальный поперечный разрез)

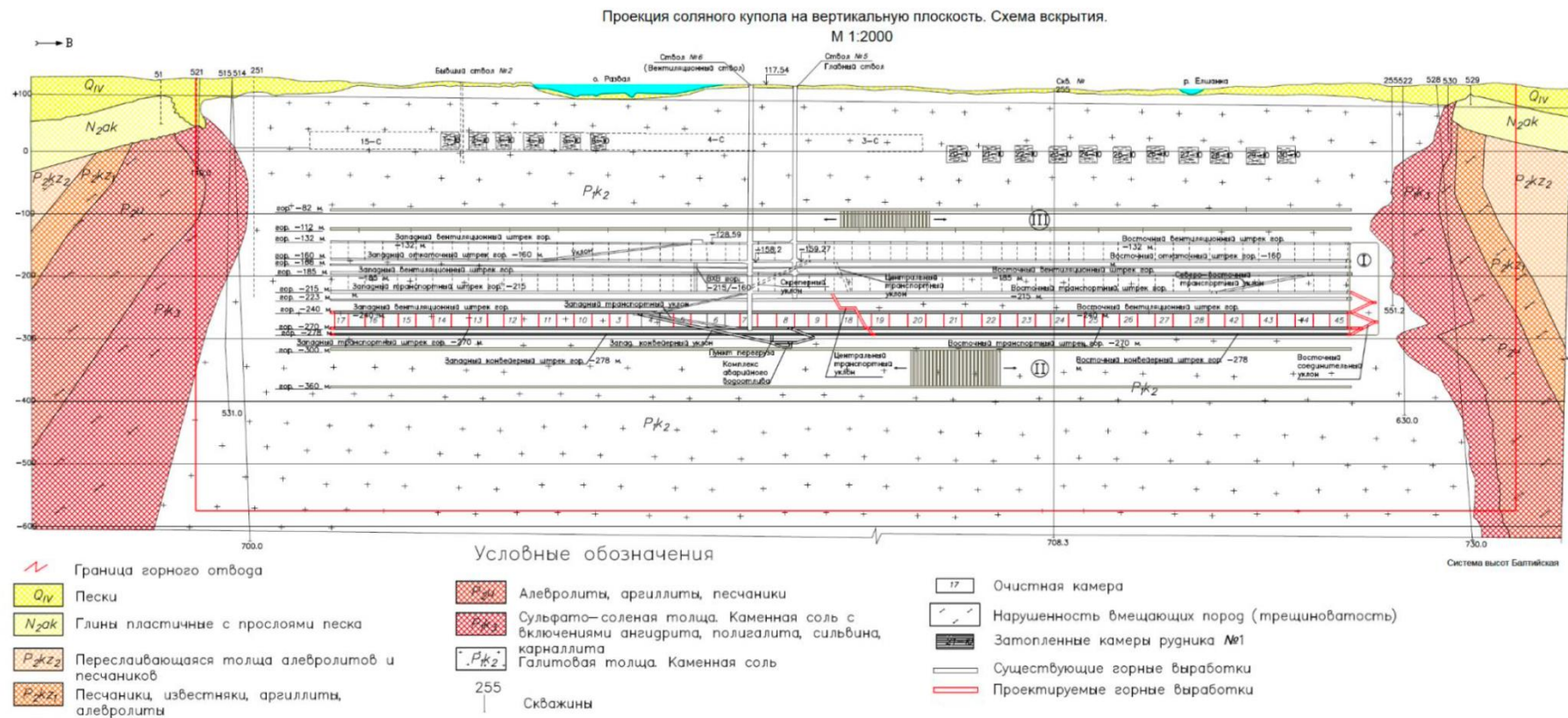


Рисунок 4 – Проекция соляного купола Илецкого месторождения каменной соли на вертикальную плоскость. Схема вскрытия. I – нефункциональные целики на Восточном фланге Илецкого месторождения каменной соли в отметках эксплуатируемых этажей $-132 \div -270$ м на глубине 250-388 м от земной поверхности; II – 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.

2. Рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

Рекомендации по применению сотовых горных конструкций разработаны для условий освоения Илецкого месторождения каменной соли.

На первой стадии проводятся опытно-промышленные испытания и в дальнейшем извлекаются запасы 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 (рисунок 4).

Одновременно извлекаются запасы каменной соли 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.

На основе графика (рисунок 5) изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимой глубины применения моделей №№1-10, включающих целики с минимальной шириной $a_{ц}$, в таблице 1 представлены рекомендации по применению сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли.

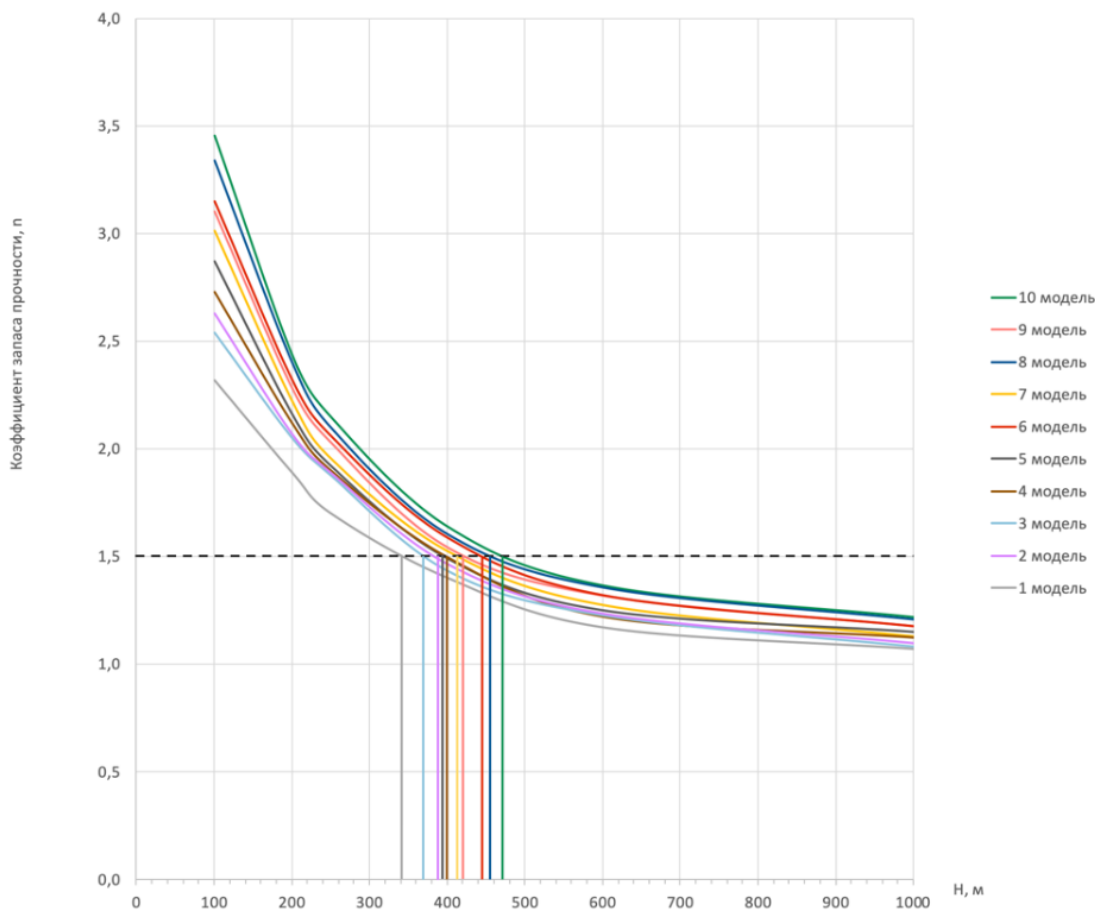


Рисунок 5 – График изменения коэффициента запаса прочности целиков n с глубиной и допустимая глубина применения моделей №№1-10. $KЗП \geq 1,5$ – допустимый предел проектирования горнотехнических систем с высокой степенью достоверности входных параметров в численную модель.

В условиях применения сотовой горной конструкции потери полезного ископаемого изменяются в диапазоне 50,62÷68,69% (таблица 2) 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 в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли позволит 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 1 – 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 H , 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 ниже гор. –270 м в отм. –300÷–340 м, глубина 418-458 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÷–340 м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м
8	5	2,5	458	

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÷–340 м, глубина 418-458 м; запасы в подошве ВЗТ в отм. –80÷–110 м на глубине 198-228 м

При необходимости увеличить глубину ведения очистных работ можно двумя способами – уменьшить высоту камер или увеличить минимальную ширину целика, или одновременно и то и это. При этом для геомеханического обоснования новых параметров сотовых горных конструкций необходимо провести дополнительные расчеты.

Таблица 1.3 – Варианты моделей с применением вертикальных камер цилиндрической формы с квадратной сеткой их расположения с различными конструктивными элементами выемочного участка по для условий Соль-Илецкого рудника (размер модели (выемочной единицы, блока) 60×60×60 м) (рисунки 6 и 7)

№№ модели	Объем модели, м ³	Горизонтальная площадь модели, м ²	Диаметр (ширина b_k , длина d_k) камеры, м	Минимальная ширина $a_{ц}$ (длина $d_{ц}$)/максимальная ширина $A_{ц}$ (длина $D_{ц}$) целика, м	Количество камер в модели/в ряду, шт.	Горизонтальная площадь пустот (камер) в модели ($S_{\Sigma км}$), м ²	Горизонтальная площадь массива каменной соли в целиках модели ($S_{\Sigma цм}$), м ²	Ширина ооконтуривающего целика, м	Эксплуатационные потери в целиках ($P_{цм}$), %
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

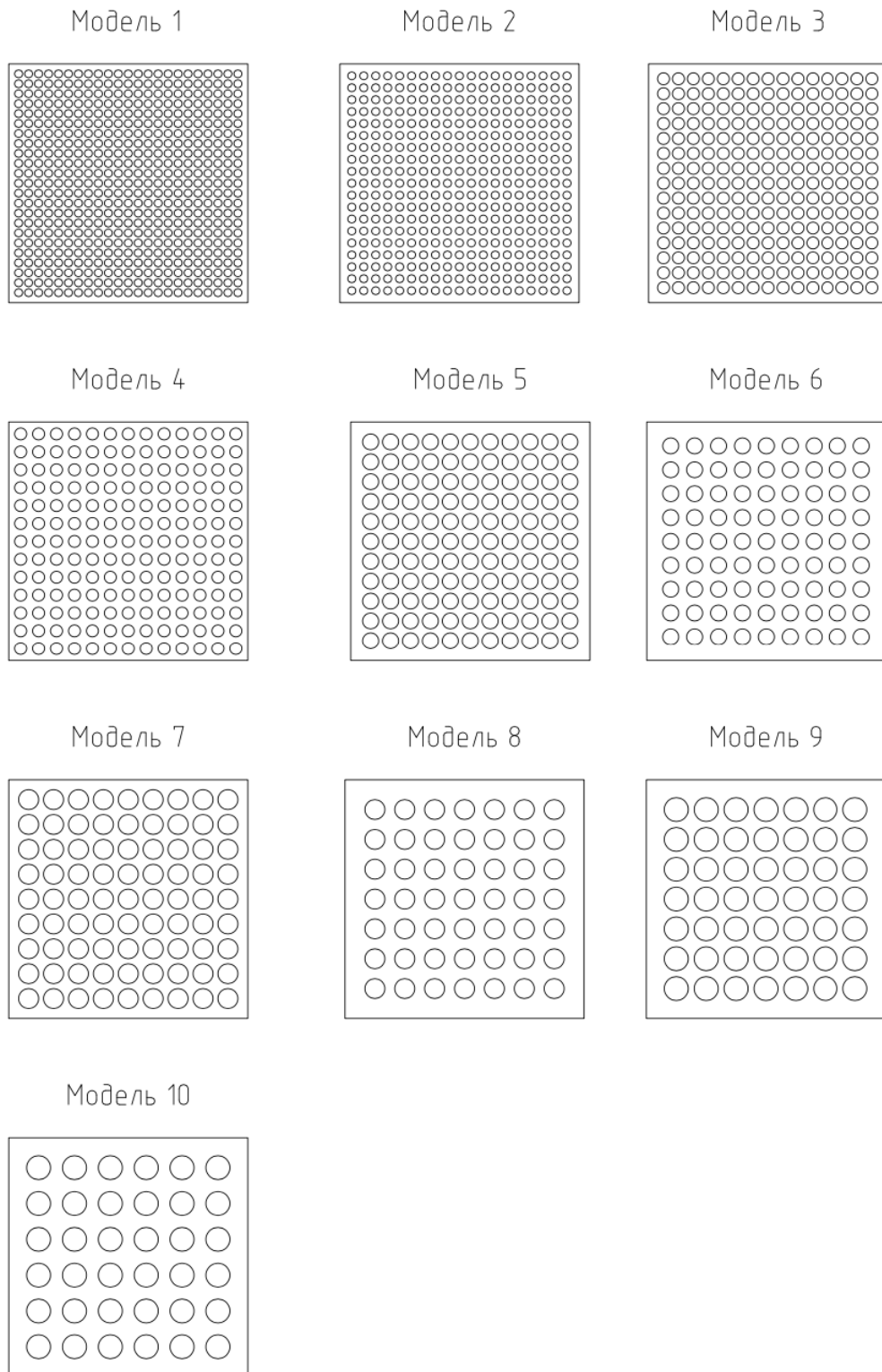


Рисунок 6 – Десять моделей с квадратной сеткой расположения вертикальных камер цилиндрической формы с различными размерами конструктивных элементов (ширина камер и целиков) выемочного участка (размер модели 60×60×60 м) (таблица 1.3)

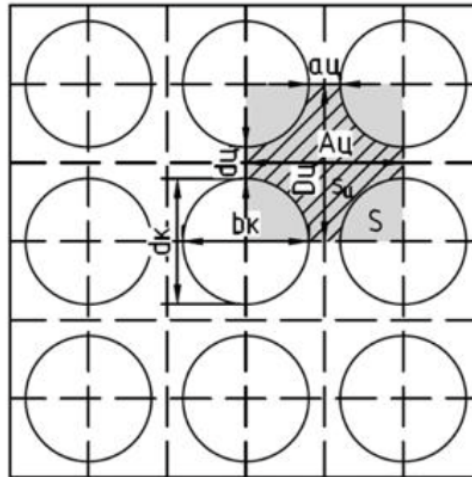


Рисунок 7 – Технологические схемы камерной системы разработки с оставлением МКЦ в условиях применения сотовых горных конструкций с квадратной сеткой расположения вертикальных камер цилиндрической формы. b_k – ширина камеры (для сотовых конструкций диаметр камеры, $b_k = d_k$); d_k – длина камеры (для 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 $a_{ц} = d_{ц}$; $A_{ц} = D_{ц}$).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «РУССОЛЬ»

460009, Оренбургская область, г.о. город Оренбург
г. Оренбург ул. Цвиллинга, зд. 61/1
Тел: +7 (3532) 34-23-24, 34-23-03, 34-23-66
Тел/факс: +7(3532) 34-23-80
e-mail: info@russalt.ru



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Косыревой Марины Александровны, представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук, на тему: «Геомеханическое
обоснование формы и размеров целиков при подземной разработке соляных
месторождений вертикальными камерами цилиндрической формы»
в условиях разработки Илецкого месторождения каменной соли

Настоящей справкой подтверждаем, что «Рекомендации по применению
сотовых горных конструкций в условиях разработки Илецкого
месторождения каменной соли», разработанные в рамках диссертационной
работы «Геомеханическое обоснование формы и размеров целиков при
подземной разработке соляных месторождений вертикальными камерами
цилиндрической формы», выполненной в Горном институте НИТУ МИСИС,
приняты к использованию на ЦДПС Илецксоль ООО «Руссоль» (Соль-
Илецкий рудник).

Руководитель представительства -
Главный инженер ЦДПС Илецксоль
ООО «Руссоль»



Дружкин Д.В.

« 10 » 10 2024 г.