

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)
Горный институт
Кафедра Физических процессов горного производства и геоконтроля

ПУГАЧ Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ
НА ПОЛОГИХ УЧАСТКАХ ПЛАСТОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные руководители

кандидат технических наук Кузьев Лев Сергеевич
--

доктор технических наук Кобылкин Сергей Сергеевич

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСОВ ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ	12
1.1 Аналитический обзор исследований напряжённо-деформированного состояния разрабатываемого массива на угольных шахтах в условиях действия тектонических сил	12
1.2 Моделирование с применением компьютерных программ	21
1.3 Выбор и обоснование расчётной модели	29
1.4 Применение компьютерных решений в научно-практических целях	36
1.5 Анализ аварийности и прогноз горных ударов на угольных шахтах	38
Выводы по главе	43
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЁННЫХ ЗОН	45
2.1 Основные факторы, подлежащие учёту при создании численных алгоритмов моделирования НДС в массиве	45
2.2 Физический смысл математической модели для разработки алгоритма прогноза горных ударов	47
2.3 Определение физических свойств для реализации математической модели уплотняющегося массива (на примере горных пород и угля для ш. Комсомольская)	60
2.4 Основные факторы при прогнозе горных ударов	65
2.4.1 Тектоника	66
2.4.2 Горизонтальные составляющие напряжений	67
2.4.3 Технология ведения работ	67
2.5 Постановка и решение тестовых задач	68
Выводы по главе	79
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ РАБОТ НА ВОРКУТСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ	81
3.1 НДС массива и динамическая характеристика угольных месторождений г. Воркуты	81
3.2 НДС массива, создаваемое влиянием геологических нарушений	83
3.2.1 Напряжения в нетронутом массиве под действием тектонических сил в условиях геологической нарушенности	83
3.2.2 Удельная потенциальная энергия в нетронутом массиве под действием тектонических сил в условиях геологической нарушенности	93
3.2.3 Многоугольники распределения значений максимальных главных и минимальных главных напряжений с учётом диапазона разброса физических свойств	97
3.3 Обоснование безопасного направления очистных выработок на основе применения модели уплотняющегося массива с учётом геологических нарушений и тектонических сил	100
Выводы по главе	109

4 КРИТЕРИЙ УДАРООПАСНОСТИ ДЛЯ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ФРОНТА ОЧИСТНЫХ РАБОТ. АКТЫ И АВАРИИ, ПРОИЗОШЕДШИЕ НА ШАХТАХ АО «ВОРКУТАУГОЛЬ»	111
4.1 Построение изограммы для выявления наиболее удароопасных направлений фронта очистных работ и критерий удароопасности	111
4.2 Алгоритм осуществления регионального прогноза горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт	115
4.3 Аварии, имевшие место на шахтах АО «Воркутауголь»	119
4.3.1 Несчастный случай на СП АО «Воркутауголь» шахта «Комсомольская»	119
4.3.2 Несчастный случай на СП ОАО «Воркутауголь» шахта «Северная»	120
4.3.3 Несчастный случай на СП АО «Воркутауголь» шахта «Воркутинская»	123
4.4 Теоретическое обоснование методики шахтного эксперимента по прогнозу тектонически напряжённых зон с ПГД	123
Выводы по главе	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (ПРОДОЛЖЕНИЕ 1)	144
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (ПРОДОЛЖЕНИЕ 2)	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	147
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	148
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	149
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	150

Условные сокращения

ГИУ – метод граничных интегральных уравнений

ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система

ГУ – горные удары

ДЯ – динамические явления

МДЭ, DEM (Distinct elements methods) – метод дискретных элементов

МКЭ, FEM (Finite elements method) – метод конечных элементов

МЭМ – метод эквивалентных материалов

НДЗ – напряжённо-деформированные зоны

НДС – напряжённо-деформированное состояние

ПГД – повышенное горное давление

ПК – персональный компьютер

ТНЗ – тектонически напряжённые зоны

СП – сервисное предприятие

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

DFN (Discrete fracture networks) – одна из разновидностей метода дискретных элементов

GPS (Global Positioning System) – система глобального позиционирования

HS (Hardening-soil) – модель уплотняющегося массива

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Распоряжением правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 года утверждена Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. В Программе рассматриваются возможности увеличения объёмов добычи угольной продукции, отмечается увеличение доли подземной добычи угля в неблагоприятных горно-геологических условиях. В соответствии с Программой продолжается создание новых центров добычи угля и осуществляется развитие предприятий действующих угольных бассейнов, в том числе и Печорского.

С 2011 по 2021 годы на российских угольных шахтах происходило в среднем по 3 аварии в год, их число остаётся на постоянном уровне. Из всех видов аварий на связанные с геомеханическим состоянием массива пород приходится 17%: 13% – обрушения, 2,5% – внезапные выбросы, 1,5% – горные удары. На шахтах объединения АО «Воркутауголь» произошло свыше 100 динамических явлений типа нарушений почвы и кровли подземных выработок, выбросов и горных ударов, которые имели катастрофические последствия: завалы лав, выход из строя оборудования и разрушение крепей. Аварии и инциденты нарушают режим работы шахт, приводят к гибели горнорабочих, экономическим издержкам.

С увеличением глубины отрабатываемых горизонтов угольных шахт растут механические напряжения, и одновременно с этим повышается опасность возникновения динамических явлений, что вызвано, в частности, расширением диапазона разброса физических свойств угля и вмещающих пород. Недостатком в современных подходах к расчётам является то, что в расчетную модель массива закладывают усреднённые свойства горных пород и угля, что не позволяет рассматривать задачи в комплексе состояний, которые способна принимать рассматриваемая система. Согласно действующим инструкциям к опасным зонам относят зоны повышенного горного давления (ПГД). Однако, как показывает практика, в условиях

объёмного сжатия горных пород и угля, слагающих массив, более высоким значениям напряжений на одной и той же глубине могут соответствовать неопасные зоны, а в областях с наименьшими значениями напряжений могут наблюдаться опасные зоны. Изучение состояния массива для предупреждения горных ударов требует разработки математической модели, позволяющей учитывать уплотнение, разуплотнение, пластические процессы, дилатансию, и связывать их в систему единого целого в условиях изменения диапазона и неопределённости деформационных свойств среды. Модель должна обосновывать природные и техногенные причины, приводящие к опасным последствиям. Предлагаемое решение по прогнозу строится на представлениях о формировании перед ведением горных работ потенциальной энергии, способствующей проявлению горного удара, с учётом характера перераспределения напряжений в процессе техногенного воздействия. На основе оценки перераспределения напряжений в угольном пласте представляется возможность проследить динамику изменения потенциальной энергии при различии физических свойств материалов, закладываемых в массив исходных данных. Обоснованный расчетами выбор направления фронта ведения горных выработок выемочного участка позволит снизить возможность проявления горного удара.

Все приведенные данные показывают, что исследуемая тема является актуальной.

Целью диссертационного исследования является разработка метода прогноза горных ударов с учётом геологических нарушений, взаимного влияния горных выработок выемочного участка, направления действия тектонических сил и физических свойств горных пород и угля на основе применения компьютерных моделей для повышения безопасности и эффективности горных работ.

Основная идея работы заключается в использовании разработанной многофакторной математической модели, учитывающей напряженно-деформированное состояние горного массива (через карты значений

параметра Надаи-Лоде и удельной потенциальной энергии) при описании процессов ведения очистных работ и обосновании критерия удароопасности в условиях предварительно рассчитанного начального поля напряжений.

Задачи исследований:

1. провести анализ изменения напряжений в углепородном массиве с повышением глубины ведения работ и связанных с ними причин возникновения горных ударов на угольных шахтах;
2. проанализировать существующие методы прогноза горных ударов на угольных шахтах;
3. разработать и верифицировать многофакторную математическую модель, учитывающую геологические нарушения, взаимное влияние горных выработок выемочного участка и выработанного пространства, действие тектонических сил, уплотнение и дилатансию;
4. разработать метод оценки потенциальной опасности проявления горного удара при выборе направления фронта очистных работ;
5. разработать метод прогноза горных ударов на пологих участках угольных пластов с учетом соотношения главных напряжений, диапазона разброса деформационно-прочностных свойств горных пород и угля, выбора направления фронта очистных работ и алгоритм его реализации.

Методы исследований включают анализ литературных источников; инженерный анализ горно-геологических и горно-технических условий ведения работ; анализ происходящих в породном массиве физических процессов и описывающих их уравнений; численное моделирование методом конечных элементов физических процессов; методы математической статистики.

Основные научные положения, разработанные лично соискателем:

1) Математическая модель для прогноза опасности проявления горных ударов, основанная на модели уплотняющегося массива, дополненная учётом изменения физических свойств горных пород и угля, позволяет

одновременно учесть геологические нарушения, взаимное влияние горных выработок выемочного участка и выработанного пространства, действие тектонических сил, что повышает точность расчётов напряженно-деформированного состояния горного массива на 20 %.

2) Установлено, что вид многоугольников распределения значений главных максимальных напряжений в точках, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов, носит одномодовый характер, а в любых других точках предлагаемой модели уплотняющегося массива – многомодовый характер, обусловленный более широким распределением величин и отсутствием мест чрезмерно повышенной концентрации напряжений.

3) Разработанный метод регионального прогноза горных ударов и алгоритм его применения позволяют корректировать наименее удароопасное направление фронта очистных работ в условиях геологической нарушенности на основании параметра Надаи-Лоде и введённого критерия удароопасности, что дает повышение точности расчетов на 25% по сравнению с расчетами на основе средних главных напряжений σ_2 , соответствующих обобщённым случаям.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- применением пакета компьютерных программ, имеющих сертификат соответствия требованиям нормативных документов, регулирующих применение программного обеспечения для геотехнических расчётов, которые реализуются с помощью неявной схемы интегрирования и задаются жёсткой системой дифференциальных уравнений, что обеспечивает высокую точность решений посредством метода итераций;

- удовлетворительной сходимостью результатов тестовых задач, решённых компьютерным способом на основе разработанной математической модели, с аналитическими решениями, что подтверждает корректность применяемых методов исследования;

- представительным объёмом рассчитанных моделей, где физические

свойства угольного пласта (модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν) генерировались случайным образом с целью получения диапазона возможных состояний рассчитываемых напряжений;

- совпадением вида многоугольников распределения значений главных напряжений, рассчитанных с помощью предлагаемого метода прогноза, в точках модели, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов (26 случаев), и отличием их вида в любых других расчётных точках модели;

- соответствием главных напряжений в углепородном массиве, получаемых с помощью компьютерных расчётов через удельную потенциальную энергию, данным сейсмонаблюдений на шахтах «Северная», «Комсомольская», «Заполярная», «Воркутинская» АО «Воркутауголь».

Новизна работы заключается:

- в применении модели уплотняющегося массива при выборе направления фронта ведения очистных работ на основании разработанной математической модели, учитывающей предварительно определяемое начальное поле напряжений в условиях геологической нарушенности угольного пласта;

- в получении численными методами многоугольников распределения значений главных напряжений в расчётных точках отработываемого массива пород на основе моделирования задач с различными значениями модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν , задаваемыми случайным образом по закону равномерного распределения;

- в разработке нового метода прогноза тектонически напряженных зон, позволяющего оценить совместное влияние технологических, тектонических, гравитационных сил на его напряжённо-деформированное состояние с применением модели уплотняющегося массива в условиях пологих участков;

- в определении главных напряжений, удельной потенциальной энергии, параметра Надаи-Лоде как параметров оценки перераспределения напряжений в случае горных ударов при различных направлениях выработок;

- в разработке метода прогноза горных ударов на угольных шахтах, позволяющего производить оценку новых технологических решений и способов на предмет их эффективности и безопасности в соответствии с предлагаемым алгоритмом.

Научное значение работы заключается в разработке метода прогноза горных ударов на угольных шахтах при проектировании направления фронта горных выработок выемочного участка и выработанного пространства на основе предварительно рассчитанного начального поля напряжений, создаваемого геологической нарушенностью угольного пласта, с применением разработанной математической модели.

Практическая ценность работы состоит в том, что по результатам диссертационного исследования разработаны «Методические рекомендации по региональному прогнозу горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт», которые переданы в СФ АО «ВНИМИ» и предполагаются к практическому использованию.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2011, 2012, 2013, 2015, 2019, 2021), всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, ФГБУН ИГД УрО РАН, 1-3 октября 2013 г.), IV международной научно-практической конференции «Горное дело в 21-ом веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 26-28 октября 2021 г.), всероссийской молодёжной XVI научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, Институт горного дела УрО РАН, 9-11 февраля, 2022 г.) на научных семинарах кафедры ФГПиП МГГУ, кафедр ФизГео и БЭГП МГИ НИТУ МИСиС.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 14 статьях, в том числе 5 из них в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК Минобрнауки РФ и в 2 изданиях, индексируемых в Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав,

заклучения и 6 приложений, содержит 45 рисунков, 5 таблиц, список литературы включает 135 наименований.

1 СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСОВ ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

1.1 Аналитический обзор исследований напряжённно-деформированного состояния разрабатываемого массива на угольных шахтах в условиях действия тектонических сил

Оценка напряжённно-деформированного состояния массива позволяет решать ряд производственных задач и носит практический характер. Настоящее исследование ориентировано на разработку угольных пластов на глубоких горизонтах, прогноз горных ударов и соответственно предупреждение динамических явлений с целью высокоэффективной отработки.

В связи с проблемами горных ударов и повышением напряжений с глубиной особое значение приобретает прогноз на глубоких горизонтах в зоне влияния полей геологических нарушений [51].

Научные вопросы об ориентации сил, действующих на массив и приводящих к различного рода деформациям, впервые начинают формулировать, выдвигая геотектонические гипотезы. Во второй половине XIX – начале XX вв. начинают осуществлять региональные работы, проводить исследования месторождений полезных ископаемых. Начинают детально изучать механизм фиксирования этих сил. В основе, как правило, лежит морфологический характер.

Основное место в изучении геомеханических процессов занимает моделирование. Обобщение результатов моделирования для интерпретации процессов в массиве, в том числе и разрушения, произведено в работах Хэнкока, 1985 [126]. Построение таких моделей не соответствует требованиям, предъявляемым к оценке напряжённно-деформированного состояния на глубине, что становится актуальным при современном уровне ведения горных работ. Вопросами о состоянии массива в зонах сдвижения на

глубине занимался Нейлор, 1986 [122]. Это были теоретические попытки без количественного обоснования.

Действие внешних сил и, как следствие, образование пластических и разрывных деформаций, а также их связь отразил в своей работе Г. Беккер, 1893 [98]. Распространённая в узких пределах, эта гипотеза не уместна для общего описания деформаций. О том, что гипотеза лишь формально объясняет принципы деформации, не отражает реального механизма, а количественная оценка непригодна для анализа, аргументировано писал в 1956 г. Г.Д. Ажгирей [2].

Представления о тектонических процессах складывались по мере развития комплексов инженерных наук, включающих теории упругости и прочности, сопротивления материалов, теоретической механики, математики, физики.

К началу XX в. относят качественные эксперименты, то есть такие, где исследователи получали внешнюю тождественность модели с натурой. Ярким примером могут послужить работы Г. Клооса. Существенны гипотезы, интерпретирующие геологические данные через представления геомеханики (В. Мид, В. Берлер, Ч. Лизс и др.) [43, 119].

М.В. Гзовский в своей работе [18], отмечал тот факт, что основополагающие принципы были взяты из механики, при этом отсутствовало понимание их сущности, необходимое для достоверности. Претерпевая дополнения и изменения, механическая теория искажалась, в итоге рождались некомпетентные выводы, не принимающие во внимание физические свойства пород. Отсюда и ряд противоречий в определениях, представлениях и интерпретации результатов о дизъюнктивных нарушениях и складках. Это отразилось и на понимании действия напряжений, деформаций и разрушения.

В 1936-37 гг. Г.Н. Кузнецовым разработано и осуществлено физическое моделирование механических явлений, протекающих в массиве горных пород, в основе которого лежит метод эквивалентных материалов

[59]. Применительно к проблемам горных ударов его рассматривали позднее в АО «ВНИМИ». Современные методы моделирования на персональных компьютерах (ПК) привели к отказу от данного направления, поскольку с таким подходом достаточно сложно учитывать масштабы, связанные со временем. Так как модель уменьшена в сравнении с натурными условиями, то и процессы обрушения, разрыв сплошности или деформирование крепи протекают в ней быстрее. Если же рассматривать в качестве примера время протекания процессов фильтрации вод, то оно значительно разнится со временем протекания геомеханических процессов. Таким образом, МЭМ не позволяет воспроизводить одновременно несколько разнотипных факторов.

40 - 50-е гг. XX в. являются своеобразной вехой в дальнейшем развитии физических представлений, обусловленных действием тектоники. Научная мысль, в основном, была направлена на выявление закономерностей и процессов образования тектонических структур (С.А. Батугин, И.М. Батугина, В.В. Белоусов, А.В. Пейве, В.Е. Хаин, А.А. Сорский, М.В. Гзовский, В.В. Эз, Е.И. Паталаха, В.Н. Шолпо, Н.Б. Лебедева, И.В. Кириллова, А.М. Сычева-Михайлова, Д.А. Казимиров, А.В. Вихерт, М.А. Гончаров, М.К. Крейтер, Ф.И. Вольфсон и др.) [12, 18, 53, 91]. Для этого времени характерен интерес к специализированным полевым исследованиям (сбор первичных данных). На основе исследований в 1984 г. применительно к вопросам геомеханики И.М. Батугиной вводится термин «тектонически напряженные зоны» [11].

В настоящее время изучение закономерностей образования тектонических структур продолжается учёными: А.С. Батугиным, В.Н. Захаровым, О.Н. Малинниковой и др. [23, 24, 117, 132], природу формирования тектонических разломов и учёт коэффициентов трения на берегах разломов с целью оценки тектонических напряжений рассматривают В.В. Иванов, В.С. Зыков и др. [26]

Значительны петротектонические изучения действия пластических деформаций горных пород. Эти исследования неразрывно связаны с именами следующих учёных: Н.А. Елисеев, Е.А. Кузнецов, А.В. Пэк и др.

На основе результатов по полученным данным строят диаграммы, анализируя которые, производят оценку характера тектоники и её симметрии. Возможны и обратные задачи: по диаграммам путём лабораторных испытаний при высоких гидростатических давлениях и температурах воссоздают деформационную картину. Идеи принадлежат П.А. Ребиндеру, Б. Рамбергу, М.П. Бондаренко, М.П. Воларовичу, Б.В. Залесскому, И.В. Лучицкому, Ю.А. Розанову и др..

В то же время имеют место и первые аналитические расчёты напряжённно-деформированного состояния в условиях геологических структур (дизъюнктивные нарушения). Исследования проведены Е. Андерсоном в 1951 г., применявшим метод К. Инглиса. Они по-прежнему остаются актуальными. Метод К. Инглиса заключается в том, что согласно положениям теории упругости дефекты структуры могут проявиться и в материалах, составляющих конструкцию, соответствующую безопасным условиям. Такие дефекты могут вызвать рост локальных напряжений, превышающих предел прочности, и повлечь за собой разрушение. В горном деле в качестве дефектов выступают поры, анизотропия среды. Нынешние теории о процессах тектонических деформаций выросли из позднейших исследований, отражённых в работах Л.А. Назаровой, Г. Бока, М. Чиннери, У. Чэпла, У. Гафнера, Т. Маруяма, Х. Дабовского, А.С. Григорьева и др.[50].

В 1955 г. Г.А. Коньков представил положения, отражающие влияние геологических структур, дизъюнктивов, подвижек на формирование выбросо-, удароопасных зон [32]. Для предсказания ударо- и выбросоопасности предложена теория внедрения боковых пород, суть которой заключается в установлении векториальных подвижек, а, следовательно, и направлений напряжений (по Г.А. Конькову – стрессов), явившихся их причиной. Представляется возможным с наибольшей

вероятностью классифицировать встреченные дизъюнктивы по истинному перемещению крыльев, которое, согласно теории, возможно установить по встреченным близ дизъюнктива внедрениям.

По внедрению боковых пород различают:

Собственно внедрение пород кровли;

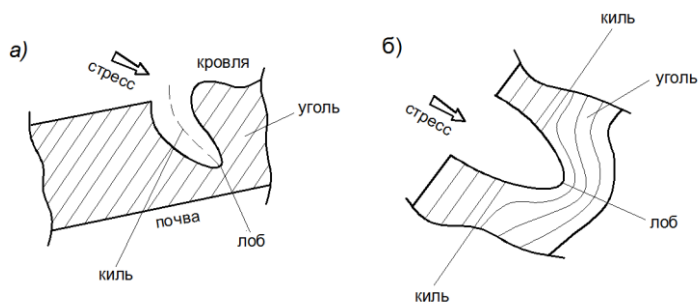


Рисунок 1.1 – Изображение внедрения кровли в угольный пласт в разрезе (а) и в плане (б).

Собственно внедрение пород почвы;

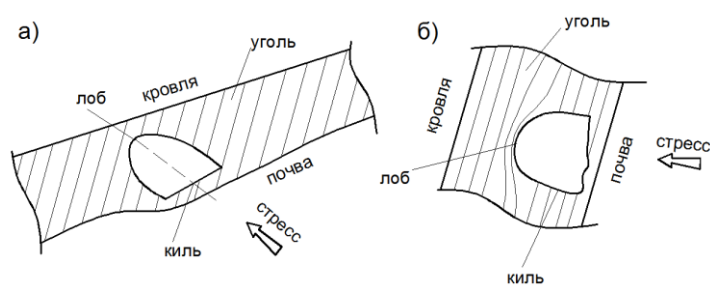


Рисунок 1.2 – Внедрение почвы в угольный пласт в разрезе (а) и в плане (б).

Односторонний пережим со стороны кровли;

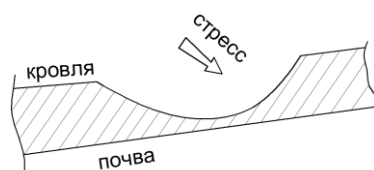


Рисунок 1.3 – Односторонний пережим пласта со стороны кровли.

Односторонний пережим пласта со стороны почвы.

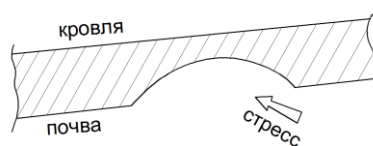


Рисунок 1.4 – Односторонний пережим пласта со стороны почвы.

Односторонние пережимы могут являться результатом противодействующих давлению сил, что затрудняет их применение для определения векториальности движения. Взбросы должны сопровождаться внедрением пород почвы в угольный пласт, для подбросов же характерно внедрение пород кровли. Термины «взбросы», «подбросы» даны по классификации М.А. Усова.

Пользуясь наличием сопутствующих внедрений, можно установить геологический тип дизъюнктива только для данного места, но в другом месте этот же дизъюнктив может перейти в другую форму и, естественно, будет сопровождаться иными сочетаниями породовнедрения.

Теория породовнедрения применяется также при описании природы внезапных выбросов угля и газа. В [32] отмечено, что местом сосредоточения остаточных напряжений, приводящих к внезапным выбросам угля и газа, являются активные крылья дизъюнктивных форм залегания (в особенности характерны в этом отношении активные опущенные крылья отдельных структур) при этом наличие скоплений газа является необязательным условием. Отдельно стоит отметить роль активных и пассивных крыльев дизъюнктива на формирование опасных зон. Обобщение положений теории Г.А. Конькова позволяет установить причины распределения очагов выброса угля и газа в пределах того или иного участка или района. Кроме того представляется возможным определять размеры встреченных очагов, а также делать прогнозы относительно новых, ещё неизвестных. Недостаток – метод прогноза является локальным, качественным, и отсутствует научная база для прогноза горных ударов. Достоинство метода в том, что он позволяет выявлять направление тектонических сил.

Вместе с этим учёные производили количественное описание тектонических движений на основе статистического анализа огромного спектра данных, характеризующих разрывные и складчатые деформации, чему посвящены работы Р.М. Лобацкой, С.И. Шермана, М.В. Рац, А.В. Вихтера, С.Н. Чернышева и др. [70]. Появляется направление новейшей

тектоники, в основу которого входит изучение тектонических процессов, сказывающихся на образовании новых структур или активации древних и формирующих современное тектоническое поле. Развитие новой науки связано с составлением карт – наносили градиенты движений, отображали тектоническую активность. Здесь следует отметить следующие имена: А.А. Рыжова, А.А. Наймарк, Г.И. Рейснер, П.Н. Николаев, Е.Е. Милановский, М.В. Гзовский, С.С. Шульц, М.В. Полканова, Н.И. Николаев, В.Н. Крестников и др. [18, 51].

Проблемами горных ударов и возможными путями их решений занимались во ВНИМИ под руководством И. М. Петухова [54, 55, 56]. Эти проблемы были сформулированы в начале 50-х годов XX в. В течение около десяти лет проводились натурные инструментальные измерения в удароопасных шахтах. Исследования осуществлялись на предмет установления особенностей деформирования угольных пластов, а также особенностей образования зон опорного давления, депрессии и репрессии, зон предельного состояния в краевых частях. Сделанные наблюдения позволили выдвинуть гипотезу о природе и механизме горных ударов.

Разрабатываемый в 60-х годах метод оптического моделирования [7] предполагал сплошность и изотропию исследуемой среды, причём до сих пор не доказана достоверность результатов, получаемых оптико-поляризационным методом. Во-первых, метод имеет определённую применимость, и не позволяет исследовать процессы при разрушении и расслоении массива. Во-вторых, метод даёт исключительно качественную характеристику распределения напряжений.

К концу 60-х – началу 70-х гг. изучение НДС становится самостоятельной отраслью, вобравшей в себя теории и научные достижения в областях: механики горных пород, физики твёрдого тела, сейсмологии, реологии, структурной геологии, моделирования физических процессов. В настоящее время она дополнилась идеями районирования [9, 54], поромеханики, микропоромеханики [102, 52], а перечисленные области,

входящие в изучение НДС, уточняются новыми исследованиями, как самостоятельными [16, 118], так и связанными с геомеханикой [92].

В работе [16] следует обратить внимание на исследование изменения модуля упругости как характеристики нарушенности породного образца, уменьшения упругих свойств и переход в пластичное разрушение с увеличением нарушенности структуры. Значение модуля упругости вносит значительный вклад в прогноз возможности проявления горных ударов. В работе [33] показано, как структура угля сказывается на соответствующих образцу горных пород модуле упругости и коэффициенте Пуассона.

Предмет исследования приобретает более чёткие границы, методы изучения становятся точнее. Положения о том, как увязать реальные условия в массиве и теоретические исследования тектонического поля напряжений, впервые отражены в работах, касающихся сейсмического районирования [72].

В 1971 г. М.В. Гзовский [18] выделил несколько причин, позволяющих утверждать, что изучение НДС, обусловленного тектоникой исследуемого массива, значимо. Во-первых, оно существенно при поиске и разведке: позволяет судить о залегании и структуре полезных ископаемых (О.Л. Кузнецов); во-вторых, при разработке – способствует достижению высокой производительности и безопасности; в-третьих, формирует научные представления о теории процессов как: оценка их энергии, выявление направления и величин действующих сил, прогнозирует причины тектонических явлений [18]. Эти причины будут подтверждены в ходе настоящего исследования.

Среди научных работ встречаются также методики оценки поведения разломов. Например, для определения линии главного перемещения по его плоскости в 1961 г. В.Н. Даниловичем [20] был предложен метод поясного распределения трещиноватости в зонах разломов.

Данные о напряжённом состоянии заложены в условия инженерных задач, позволяющих проследить кинематику дизъюнктивов, на основании

чего предлагают широкие возможности выбора технологических решений как при разведке, так и при разработке месторождений. О положительном экономическом эффекте выявления зон, в которых следует ожидать опасность горных ударов, писал Г.А. Марков [45].

Одним из методов исследования напряжений был кинематический метод О.И. Гущенко [19], исходными данными для которого являются замеры векторов тектонических перемещений на зеркалах скольжения. По данным о локальных стресс-состояниях методом нахождения общих полей напряжений восстанавливают главные нормальные напряжения условно регионального уровня [78, 79].

Таким образом, практическое значение анализа напряжённого состояния на глубоких горизонтах, способствовало возникновению различных методов исследований. Более 40 способов изучения напряжений в массивах горных пород и полезных ископаемых, развиваемых в настоящее время, В.И. Иванов и И.А. Турчанинов разбили на 5 групп, исходя из положенного в основу физического принципа: 1) деформационный: а) микро- и б) макродеформационный; 2) структурный: а) микро- и б) макроструктурный; 3) сейсмический: а) ультразвуковой, б) импульсный и в) сейсмоакустический; 4) электромагнитный; 5) радиометрический способы оценки напряжений [86].

Не включённые в эту классификацию – это аналитические методы оценки напряжений и моделирования НДС. Также применяются косвенные способы: анализ газовых эманаций, геодезические, анализ структурных рисунков.

Значимость исследования тектонических полей напряжений для практических задач и теоретических проблемных вопросов геодинамики отражена в работах [36, 42, 80, 96] и связана с именами П.Н. Кропоткина, Е.В. Артюшкова, О.Г. Сорохтина, В.К. Кучая, Л.П. Зоненшайна, В.А. Ярошевского, С.С. Стоянова, в том числе в трудах Э.У. Спенсера (США) и др. [82].

1.2 Моделирование с применением компьютерных программ

Создание компьютеров послужило новым витком в развитии моделирования в научных целях и позволило решать оригинальные математические задачи. В СССР первый компьютер был создан в 1948-1951 годы [133] под руководством С. А. Лебедева. Решение научных и прикладных задач получило актуальность спустя несколько лет.

В 1970 г. знаменитый математик А. Н. Колмогоров заметил, что «с развитием современной вычислительной техники будет во многих случаях разумно вести изучение реальных явлений, избегая промежуточный этап их стилизации в духе математики бесконечного и непрерывного, переходя прямо к дискретным моделям» [59]. В настоящее время учёные стремятся к реализации решений в дискретных моделях, хотя теория математики полубесконечных пространств и непрерывности среды по-прежнему остаются в исследованиях.

Принципы решения в компьютерных комплексах основаны на применении имитационного моделирования, сущность которого заключается в многократном воспроизведении определённой формализованной схемы исследуемого или же проектируемого процесса. Полученные результаты заложенной модели представляют собой системные показатели в оценке вероятностных распределений. Другими словами, решение задачи производят в численных значениях и решение находят не в записи аналитических формул, а в виде числовых характеристик рассматриваемых случайных величин – математического ожидания, дисперсии.

Имитационное моделирование подразумевает такие модели, результат которых нельзя узнать заранее или предсказать. Нужна имитация (эксперимент) на модели при заданных исходных данных для того, чтобы понять поведение реальной технологической системы.

Обычно, в горном деле в результате моделирования определяют деформационные параметры в околывыработанном пространстве, выявляют

зоны сдвижения. При детальном же изучении технологических и геологических процессов, возникает необходимость вовлечения в исследовательские задачи новых идей, а соответственно и изменение математического аппарата.

К примеру, на границе 70-х – 80-х годов под руководством И.М. Батугиной и И.М. Петухова разрабатывают метод районирования недр на основе представлений о блочной структуре массива. Метод применим, в частности, и к исследованию явлений, имеющих место в угольных шахтах при ведении работ на глубоких горизонтах [54]. При этом выявляют влияние этой структуры на тектонические напряжения при планировании и развитии горных работ.

Идеи районирования формировались параллельно с представлениями геотектоники, рассмотренными в предыдущем разделе. Представления, выдвигаемые А. Вегенером, получили развитие в описании формирования главнейших структур земной коры – теория тектогенеза – учитывающим горизонтальное движение плит литосферы. К тому же в задачах перед исследователем стоит и вопрос учёта влияния технологических процессов. Безопасные условия отработки должны гарантировать знания о строении, напряжённом состоянии в настоящий момент и, что особенно значимо, прогнозе этого состояния в течение эксплуатации месторождения, позволяющего оперативно и своевременно принимать соответствующие меры.

Этими вопросами занимались и занимаются в Центре геодинамики недр применительно для выявления участков под захоронения радиоактивных отходов. Принципы геомеханики, принимаемые исследователями Центра во внимание, могут быть интерпретированы также для оценки напряжённого состояния на глубоких горизонтах угольных шахт.

В работе А.С. Батугина [9] представлен принцип выделения блоков по степени их напряжённо-деформированного состояния. Согласно принципу выделяют классы:

I класс – напряжённое состояние по А.Н. Диннику;

II класс – проявляются активные горизонтальные силы, но недостаточные для перехода к предельному состоянию;

III класс – предельно-напряжённое состояние до глубины 2-2,5 км;

IV класс – предельно-напряжённое состояние до глубины 8-10 км.

В работе рассмотрим первые три из представленных классов, так как они относятся к области рассматриваемых нами задач для Воркутского угольного месторождения. Несмотря на то, что удалось создать карту разломов, вопросы численного прогноза остаются всё ещё нерешёнными. Районирование носит приближенный характер и применимо для предварительной оценки. В своих трудах авторы обозначили этот момент.

Результатом исследований является появление новых математических моделей, учитывающих взаимодействие и влияние блоковых структур на горные работы в пределах отрабатываемого месторождения. Возникает также и противоположная задача – оценка влияния технологических процессов на напряжённо-деформированное состояние массива.

Кроме вышеобозначенных, комплекс задач, решаемых с применением вычислительных программ, включает: расчёт напряжений в массиве горных пород у очистных выработок (при разработке одиночных пластов и свиты пластов в плоской и пространственной задачах), расчёт опорного давления в плоскости отрабатываемого пласта, расчёт устойчивости и прочности целиков различного назначения, расчёт устойчивости и энергетического баланса геодинамических и газодинамических явлений, фильтрационные расчёты при дегазации и гидрообработке пластов [57].

Первые расчёты подобного рода выполняли с помощью ЭВМ, современные расчеты выполняют на ПК.

В издании 1992 г. [57], описывая моделирование на ЭВМ, авторы отмечают: «В последнее десятилетие интенсивно развивается перспективный метод – метод граничных интегральных уравнений (метод ГИУ). При его использовании уменьшается размерность задачи на единицу: задачи для

трёхмерных областей сводятся к задачам для ограничивающих их поверхностей (двумерных), а для поверхностей решения осуществляются для контура (одномерной области). Это упрощает подготовку исходной информации, сокращает объём памяти ЭВМ, экономит время счёта, повышает точность, а в итоге позволяет изучать достаточно трудные задачи».

Во множестве случаев контактные свойства существенно определяют характер деформирования блочного массива. В условиях фигурируют предельные значения переменных слева и справа от границы. При этом отмеченные переменные не дискретны, а являются линейной комбинацией или подчинены линейной функции.

Основными проблемами, как можно заключить, при расчётах на ЭВМ является значительные временные затраты, применение большого объёма оперативной памяти. В связи с чем прибегают к некоторым упрощениям и допущениям, не нарушающим точность операций.

С внедрением в научные исследования ПК на прикладные задачи смотрят иначе. Появляется всё больше расчётных возможностей, математический аппарат становится совершеннее. Тем не менее, остаётся следующее: «По-видимому, невозможно создать универсальный алгоритм, обеспечивающий надёжные результаты во всём диапазоне изменения свойств блоков и их контактов. Поэтому предоставляется целесообразным иметь набор специальных алгоритмов для определённого круга условий, причём в структуре алгоритма следует учесть физические особенности указанных условий» [57]. Мысль о создании специальных алгоритмов для конкретных проблем, высказанная относительно решений на ЭВМ, актуальна для решений с помощью компьютерных программ с применением ПК.

Теперь при моделировании блочной структуры массива в сложных горно-геологических условиях решают задачи по определению напряжённого состояния массива при наличии плоскостей напластования и на контактах разномодульных горных пород в процессе их деформирования, оценивают поведение межблочного контакта под нагрузкой в упругопластической

геологической среде. Предлагают рекомендации к последовательности горных работ в зависимости от моделируемого состояния геологической среды [41].

На смену методу граничных интегральных уравнений приходит метод конечных элементов (МКЭ) и приобретает широкое распространение. Тем не менее, идеи приближенных методов вычисления, на которых базируется МКЭ, начали развиваться задолго до появления ПК, способных его реализовать. Вклад в их развитие внесли и отечественные учёные. В частности, применимость находит метод приближенного решения дифференциальных уравнений Бубнова-Галёркина. МКЭ посвящены труды Дж. Аргириса, М. Тернера, Р. Клафа, датированные 50-ми гг. XX в. [97, 127].

На стадии разработки алгоритма расчётную область разбивают на конечные элементы, в том числе и область, включающую отработанное очистное пространство. В местах ожидаемых высоких градиентов сетку рекомендуют сгущать. Расчётная область моделирует нетронутый массив, то есть физические свойства кластера, характеризующего выработанное пространство, считаются такими же, как были до ведения работ.

Формирование некоторой выработки аналогично обращению в нуль всех компонентов тензора напряжений в соответствующих выработке элементах. В некоторых решениях такой подход позволяет предварительно генерировать начальное поле напряжений.

При расчёте напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и угля, разработку пластов которого производят с обрушением вмещающих пород, в создаваемом алгоритме границы очистного блока считают свободными от нагрузки. Такое предположение является первым приближением для качественной оценки напряжённого состояния массива. Для количественной оценки необходим иной подход, поскольку в реальных условиях разрушенный массив внутри отработанной зоны и боковые породы, заполняющие в дальнейшем объём выработанного пространства, оказывают

влияние на последующее деформирование горных пород, но не способствуют полному освобождению границ тектонического блока от нагрузок.

В рассматриваемых современной наукой решениях напряжения в обрабатываемом блоке определяют весом вышележащих пород и их максимальное значение не превышает γH [41]. Первоначально, при исследовании учитывали только гравитационные силы. Модель горного массива, рассматриваемого в качестве разуплотняющейся среды, позволила М.М. Протодяконову выдвинуть и сформулировать гипотезу свода. Затем А.Н. Динник предположил, что моделирование можно осуществлять через упругое тело [21]. Введено понятие «бокового распора» в условиях действия гравитационных сил. Современное положение и оснащение методов новыми инструментами выявило наличие высоких горизонтальных напряжений, отличных по своей природе от гравитационных и превышающих вертикальные. Впервые их экспериментально обнаружил шведский учёный Н. Хаст [111], а теоретически предсказал в 1954 г. академик М.В. Гзовский [18].

Для комплексного анализа напряжённо-деформированного состояния дополнительно к гравитационному давлению необходимо учитывать влияние геологических нарушений массива, а также влияние горизонтальной составляющей горного давления, обусловленной действием литосферных плит.

«В пленарном докладе на IX съезде по теоретической и прикладной механике (2006 г.) акад. В. А. Бабешко отметил, что конгресс США прекратил финансирование программы прогноза землетрясений из-за отсутствия конкретных результатов. Дело в том, что исследования велись только геофизическими методами и в программе отсутствовала как основная составляющая механика горных пород, рассматривающая взаимодействие плит, ослабленных трещинами (разломами)» [47]. Те же самые слова можно отнести и к исследованию процессов на глубоких горизонтах угольных шахт.

Современная наука пытается дать количественную оценку указанного взаимодействия. В настоящее время его описывают уравнениями с подбираемыми коэффициентами, имеющими место в узком кругу задач и характерных только для конкретного месторождения. Согласно экспериментально полученным формулам предлагают снижать нагрузку на очистной забой при подходе к геологическим разломам. Общих рекомендаций по предложению математического аппарата не существует: аппроксимирующие уравнения, применяемые дирекцией шахт Печорского угольного бассейна, разнятся с уравнениями, применяемыми дирекциями шахт Кузбасса и Донбасса [84].

В работе [59] высказана мысль, обобщающая исследования по механическому состоянию массива горных пород в угольных шахтах во многих странах мира: «Если отношение горизонтального размера выработки к вертикальному большое, то деформирование становится настолько сложным, что для решения задачи нельзя использовать ни один из подходов численного моделирования. Это подтверждается неудовлетворительным характером некоторых лучших подходов аналитического и численного моделирования».

Исследования П.Н. Кропоткина, В.Н. Ефремова и В.М. Макеева [34], основанные в том числе и на анализе результатов измерений тектонических напряжений, показывают, что 95% земной коры подвержено влиянию сжимающих горизонтальных составляющих. Наблюдаемые на практике значения существенно разнятся с расчётными. Так, горизонтальное сжатие меньше на два порядка, а в расчётных моделях соотношение областей сжатия и областей растяжения почти тождественны. Труды А.Н. Ромашова и С.С. Цыганкова [71, 72, 73, 74] продолжают эти идеи. Авторы вносят научные дополнения, которые позволили бы всесторонне учесть и свести к минимуму расхождения между расчётными и практическими данными.

В основе лежит две гипотезы: контракционная, в которой сжатие верхних слоёв Земли обусловлено сокращением её внутренних объёмов, и

гипотеза, основанная на действии литосферных плит. Эти гипотезы объединяют в одну. Причём оценка верхнего слоя как сплошной среды, приводит к отклонениям от реально наблюдаемых напряжений. В этом случае существенно выделять блочные элементы структуры, что противоположно меняет описание процессов деформирования и разрушения.

Известны исследования, проводимые В. Н. Морозовым, В.Н. Татариновым, Е.Б. Андерсоном, С.В. Беловым, Е.Н. Камневым, И.Ю. Колесниковым и Н.Ф. Лобановым [3]. В основе лежит метод районирования и учёта тектоники. Метод осуществляют с применением компьютерного аппарата, в качестве вводимых параметров – данные анализа результатов картографирования, полученных с помощью съёмок, осуществляемых спутниками ГЛОНАСС и GPS. Упомянутые исследования проводят с целью выявления зон, пригодных для подземного захоронения радиоактивных отходов, существо исследований составляет оценка напряжённно-деформированного состояния земной коры. В течение 1994-2008 гг. изучения выполняли в ФГУП «Горно-химический комбинат», ФГУП «ВНИПИпромтехнологии», на геологическом факультете СПбГУ, НИФТИ КрасГУ, в Геологическом институте РАН, Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Геофизическом центре РАН. Программным комплексом, на котором производили расчёты, служил GEODYN.

Решениями, относящимися непосредственно к анализу НДС угольных шахт, занимался В. В. Зубков [25]. Задачи были решены с применением разработанных программных комплексов SUIT2D, SUIT3D, BLOCKS2D, FAULT3D и LAYERS3D, реализующих методы математического моделирования на ЭВМ. В зависимости от поставленной задачи каждый комплекс позволяет произвести оценку НДС массива при отработке пластов и свит:

- SUIT2D – около очистных выработок;
- SUIT3D – около очистных выработок произвольной формы в плане;

- FAULT3D – около очистных выработок произвольной формы в плане, различно ориентированных и проводимых в зоне, осложнённой геологическими нарушениями;
 - LAYERS3D – около очистных выработок произвольной формы в плане, проводимых в слоистом массиве;
- В BLOCKS2D рассматривают массив с заданием различных параметров на границах блоков, его составляющих.

1.3 Выбор и обоснование расчётной модели

Решения, осуществляемые в SUIT2D, SUIT3D, BLOCKS2D, FAULT3D и LAYERS3D выполнены на ЭВМ с применением метода ГИУ. В качестве оцениваемого параметра В.В. Зубков [25] выбирает нормальные к напластованию деформации ε_y и относительные нормальные к напластованию деформации $\varepsilon_y/\varepsilon_y^{\max}$, где $\varepsilon_y^{\max}$ – максимальное значение деформации в зоне разгрузки. Отмеченные значения с высокой степенью точности соответствуют натурным замерам смещений.

С наибольшей объективностью оценить НДС массива позволяет метод конечных элементов, поэтому среди программ рассмотрим преимущественно те, которые этот метод реализуют. Являвшийся в 80-е гг. конкурентоспособным и имевший преимущество по сравнению с МКЭ метод ГИУ позволяет определить точное соответствие исходных дифференциальных уравнений в пределах расчётной области и легко учесть бесконечные границы. К недостаткам метода относят задание граничных условий: один тип, требование к гладкости границ, необходимость полного заполнения результирующей матрицы.

Ниже рассмотрим компьютерные комплексы, реализующие МКЭ для количественной оценки смещений и напряжений. Отметим GEODYN, ANSYS, COMSOL, PLAXIS. Также рассмотрим комплексы FLAC, FLAC 3D,

UDEC, 3DEC, позволяющие решать задачи методом дискретных элементов (Distinct elements methods – DEM).

Метод дискретных элементов рассматривает среду, как совокупность значительного количества частиц, для которых задают начальные условия (например, начальная скорость). Вводимые свойства и форма частиц могут быть различны. Согласно физическим законам из заданных параметров вычислительная система определяет действующие силы. Впервые метод был предложен и реализован П. Кундаллом [101] в 1971 г. для решения задач, описывающих механику горных пород.

Комплексу GEODYN характерно построение гетерогенной модели, отражающей свойства реального массива, для выявления безопасных / опасных зон по результатам анализа НДС массива. Принцип расчётов определён методом конечных элементов, где в подобласти массива закладывают неоднородные физические данные. Интегралы по области подчинены свойству аддитивности, что формирует общую (глобальную) матрицу жёсткости и глобальный вектор обобщённых нагрузок. Конечный элемент представлен квадратом, имеющем четыре узла, расположенных в вершинах. Применение же треугольных элементов (триангуляция) позволит вычислить значения с большей точностью. Для решения задач разработки GEODYN применяют критерий Губера-Мизеса-Генки, соответствующий четвёртой теории прочности, согласно которой разрушение происходит при достижении предельного значения удельной потенциальной энергии формоизменения. Теория эта применима для условий разрушения структурно-тектонического блока, находящегося в сложном состоянии.

В плоской постановке интерес для анализа полученных значений представляет карта значений касательных напряжений τ_{xy} .

Среди программных комплексов, имеющих достаточно широкое применение в настоящее время и позволяющих решать рассматриваемые нами задачи, известны также продукты, относящиеся к Itasca Software

Products [135]. Их реализует консалтинговая компания Itasca Consulting Group Inc., находящаяся в Миннеаполисе (США). Разработаны FLAC, FLAC 3D, UDEC, 3DEC. В расчётах в программных комплексах применяют разновидность метода дискретных элементов Discrete fracture networks (DFN).

Метод DFN генерирует блочную структуру произвольной формы, исходя из полученных значений напряжений – осуществляя расчёты, выстраивает разрывные нарушения. Принцип заключается в применении закона сила-смещение, определяющего значения контактных сил из известных (граничных) смещений, на всех контактах блоков и второго закона Ньютона для рассчитанных и приложенных на границах блоков сил, которые являются функциональной переменной и входят в зависимость движения блоков. Схема процесса представлена на рисунке 1.5.

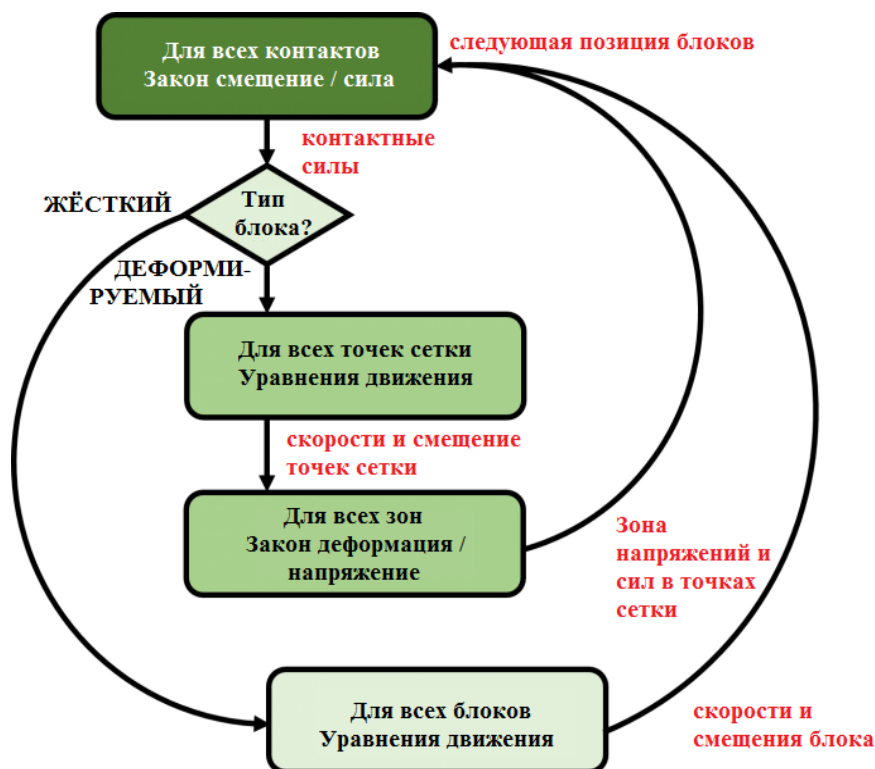


Рисунок 1.5 – Схема расчёта с применением DFN

В рассматриваемом случае, генерация блоков и нарушений происходит на основании автоматического определения границ по заложенному алгоритму с применением вероятностных теорий и известных физико-

математических закономерностей. Блочная структура также может быть импортирована из имеющихся данных. Для адекватной оценки, на наш взгляд, необходимо проследить начальный этап формирования нарушений. Для выполнения поставленного условия критерием определим предельные значения напряжённого состояния. В качестве такого критерия может выступать критерий прочности Кулона-Мора. Например, в решениях, осуществляемых в Plaxis [100], он выражается через точки пластичности.

Существуют попытки решения задач в ANSYS. Самая первая версия программы применялась только для процессов теплопередачи и определения прочности в линейной постановке, работала в пакетном режиме. Расчёт возможен был на высокопроизводительных ЭВМ. Впоследствии комплекс дополняли, и сейчас он позволяет проанализировать множество физических процессов в различных областях человеческой деятельности.

В области горного дела, в этом случае, на основании решений определяют конструкции горнотехнического оборудования и машин, позволяющие обеспечить безопасность персонала, а также производят моделирование горения и распространения огня в целях оптимизации системы вентиляции и оценки экологической ситуации. Программный комплекс также применяют при техническом анализе процессов бурения, разведки и добычи. Для оценки напряжённо-деформированного состояния массива необходим самостоятельный ввод математической модели, описывающей поведение исследуемого геоматериала. Существуют возможности интеграции МКЭ с МДЭ, где в зависимости от изменения НДС происходит разрывное разрушение.

Возможности применения в горном деле программного комплекса COMSOL Multiphysics были оценены и научно обоснованы Г.Г. Каркашадзе [29]. Основополагающий принцип заключён в создании совместных моделей, описывающих различные физические процессы посредством их функциональных связей. Первоначально выполняют решение каждой отдельной задачи в одной геометрической модели.

Среди физических свойств задают плотность вмещающих горных пород и угля, модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Есть возможность ввода тензора деформаций для анизотропных условий. Однако, отсутствуют сцепление, угол внутреннего трения, угол дилатансии, вносящие существенный вклад в выявление тектонически-напряжённых зон. Эти параметры можно ввести через пользовательские уравнения, на которые впоследствии следует сослаться при вводе физических свойств и, если присутствуют изменения на границе, граничных условий.

Вопросам моделирования и позволяющим его осуществлять инструментам уделяли внимание во Франции. Наиболее известные из программ – CESAR-LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées фр. (LCPC) – Центральная лаборатория мостов и дорог) и VIPLEF, предложенные мировыми научными школами. Первый применим для решения задач, связанных с оценкой инженерных конструкций, второй ближе к геомеханическим задачам, поскольку применим в области наук о Земле, разработчиком его является научно-исследовательский центр «Mines ParisTech». Программный комплекс позволяет обосновать поведение горных пород и полезных ископаемых и оценить состояние массива, связан с именем М. Tijani (2008) и применим в обучении студентов [106, 134]. Способствует решению задач гражданского строительства, а также задач подземной добычи и технологических операций.

Корпорации Geo-slope International принадлежит ряд компьютерных программ, разработанных для решения задач горного дела, включающий следующие продукты: SLOPE/W – анализ устойчивости уступов, SEEP/W – анализ фильтрационных процессов подземных вод, SIGMA/W – анализ напряжённо-деформированного состояния, QUAKE/W – динамический анализ землетрясений, TEMP/W – геотермальный анализ, CTRAN/W – анализ переноса загрязняющих веществ, AIR/W – анализ массопереноса, VADOSE/W – выявление зон аэрации и анализ почвенного покрова. Перечисленные комплексы имеют узкую направленность и предназначены

для оценки состояния уступов при ведении открытых горных работ. В Кыргызско-российском славянском университете для этих целей применяют Stress.

Существуют и другие программы, позволяющие оценить НДС массива при подземном ведении горных работ: Code-Bright, FreeFEM++, ROLG, QPAC-EBS, COMPASS, CAST3M. Численный метод выполнен в конечно-элементной постановке задач или в дискретной. Физико-математическая модель представлена уравнениями: механическими, гидравлическими, термическими, переноса, геохимическими. Существует возможность комплексного расчёта действия перечисленных процессов.

Компьютерный продукт PLAXIS сразу был ориентирован на оценку устойчивого состояния массива. В основу расчётов положены основные уравнения геомеханики. Поставленные нами задачи решены с применением этого продукта. Предлагаемая математическая модель может быть реализована и в других перечисленных программных комплексах, расчёты в которых основаны на МКЭ.

Началом разработки программного обеспечения послужила инициатива Немецкого департамента общественных работ: требовался простой в применении пакет программ, который бы позволял осуществлять анализ набережных рек Голландии, расположенных на низменных мягких почвах. В 1987 году группой программистов Технического Дельфийского университета стала осуществляться работа над написанием кода для PLAXIS. Впоследствии, созданная программа получила широкое распространение и в других областях геотехнических инженерных исследований, в том числе и в горном деле.

В таблице 1.1 представлено сравнение проанализированных компьютерных комплексов.

Таблица 1.1 – Сравнение программных комплексов для решения задач горного дела

Критерий сравнения \ Название	GEODYN	Itasca Software Products		VIPLEF	ANSYS	COMSOL	PLAXIS
		FLAC	UDEC				
Задание модели	Упругопластическая модель	Закон смещение / сила, закон деформация / напряжение, II закон Ньютона		Упругопластическая, вязкоупругопластическая, вязкопластическая модели	Уравнения теплопереноса, расчёт напряжений в конструкциях, структурная механика	Ввод дифференциальных уравнений, механические модели, анализ с применением временного фактора (оценка состояния в течение времени)	Модель Кулона-Мора, модель уплотняющегося массива, модель скальных пород, возможность создания модели с собственными параметрами
Метод расчёта	МКЭ	МДЭ		МКЭ	МКЭ	МКЭ	МКЭ
Сетка элементов	Квадратная	Нормальная, четырёхгранная, шестигранная, восьмигранная		Треугольная	Треугольная	Квадратная, треугольная	Треугольная
Количество узлов	4	-		6	6	4 и 3 соответственно	6, 15
Критерий оценки опасности, которые применяли в известных решениях	Касательные напряжения	Напряжение и деформируемость блоков		Напряжения и деформации	Напряжения, деформации	Напряжения, деформации, фильтрационные свойства, поровое давление	Напряжения и деформации, предельные значения напряженного состояния (точки пластичности), эпюры осевых, нормальных сил и изгибающих моментов; поровое давление, фильтрационные свойства

Соответственные исследования и разработка PLAXIS материально поддерживались консорциумом, включающим представителей более чем из 30 европейских стран. Получаемые результаты сравнивали с опытом инженерной практики.

При помощи PLAXIS возможен анализ тектонических сил и геологии массива для последующих технологических решений и предложений при отработки пластов угольных шахт [14, 15, 65, 66]. При создании компьютерного продукта разработчиками рассмотрены научные труды в области геомеханики. Решения осуществляют методом конечных элементов.

Кроме того, на базе PLAXIS существует возможность решать задачи сопротивления материалов, что способствует в горной промышленности оценке состояния крепи [38] и прогнозированию предельной длины обрушения кровли [37, 40].

Отмечая достоинства PLAXIS, можно добавить, что этот программный комплекс является надёжным и позволяющим получать однозначные результаты инструментом и имеет сертификат соответствия на решение инженерных задач.

1.4 Применение компьютерных решений в научно-практических целях

Применение PLAXIS получило наибольшее распространение при решении задач строительства, в частности освоения подземного пространства мегаполисов в условиях интенсивных темпов развития городских инфраструктур. Небольшая часть этих работ – прокладка коллекторов, проходка тоннелей метро, подземных парковок, гаражей, котлованов с возведением стены в грунте [58]. Принимая во внимание различные факторы, оказывающие влияние на НДС, пользователи оперативно рассчитывают количественные значения с целью предотвращения нежелательных последствий и защиты объектов, находящихся на поверхности [62].

Проводят исследования и для ведения работ на карьерах, разрабатывающих угольные пласты. В работе [104] обусловлены сопоставление и последующая калибровка модели, рассчитанной в PLAXIS, с данными наблюдений (мониторинга) для бурогольных карьеров Австралии (Loy Yang Mine). Планируемая глубина, для которой был осуществлён прогноз, – 250 м. Отработку карьера ведут в условиях наличия подземных вод и повышенных напряжений, выемка приводит к земным движениям в зонах, потенциально воздействующих на инфраструктуру.

Вместе с этим PLAXIS позволяет решить задачи, относящиеся к безопасному ведению работ на шахтах и рудниках [39, 64, 67].

В работе [112] рассмотрено моделирование камеры медной шахты Jeroným – Чешская республика. Произведена оценка НДС по результатам мониторинга объекта исследования. На основании полученных данных – касательных напряжений и максимальных смещений, – рассчитан коэффициент устойчивости. Проведённые исследования показали положительную сходимость с наблюдаемыми на практике условиями.

В.А. Шинкарьук [93] проводил исследования для шахты «Северная» г. Воркуты. В основе рассмотрения – распределение напряжений в окрестности выработки. Результаты компьютерной модели представлены в сравнении с данными сейсмолокации и замеров на забое. Параметры, задающие физические свойства, горно-геологические условия, инженерные, проектные решения и сейсмику, были заложены в компьютерную модель, реализованную через программу Micromine. Геометрия, система выработок, конструктивные элементы крепи в совокупности с данными Micromine служат для оценки напряжённо-деформированного состояния в среде PLAXIS. Была получена закономерность влияния забоя на массив в пределах 60-80 м. Автор предлагает при выявлении повышенных тектонически напряжённых зон комплексно применять данные получаемые при сейсмической локации массива и геотехническом расчёте, выполненном с применением программных комплексов.

М.Г. Мустафин [121] для выявления зон повышенного горного давления (ПГД) применял PLAXIS и NEDRA. Объект исследований – Карагандинский угольный бассейн. Глубина разработки – 600 м, мощность пласта – 4 м. Для соответствующего значения длины лавы L была определена ширина зоны опорного давления l : $L = 100$ м, $l = 72$ м, $L = 200$ м, $l = 138$ м, $L = 300$ м, $l = 185$ м.

Представлены меры по оптимизации технологических процессов (согласно Инструкциям $l = 80$ м [27]). На основании полученных результатов сотрудники Национального минерально-сырьевого университета «Горный» разработали программный комплекс для построения зон повышенного горного давления.

1.5 Анализ аварийности и прогноз горных ударов на угольных шахтах

Анализ аварийности за последние 10 лет, связанной с динамическими явлениями, показывает относительное постоянство случаев обрушений и внезапных выбросов (рисунок 1.6, а). При этом треть случаев связана с нарушением технологии ведения горных работ (рисунок 1.6, б). Эти причины приводят к самому большому числу погибших и травмированных людей (рисунок 1.6, в). Определение направления фронта очистных работ позволит корректировать технологии ведения горных работ.

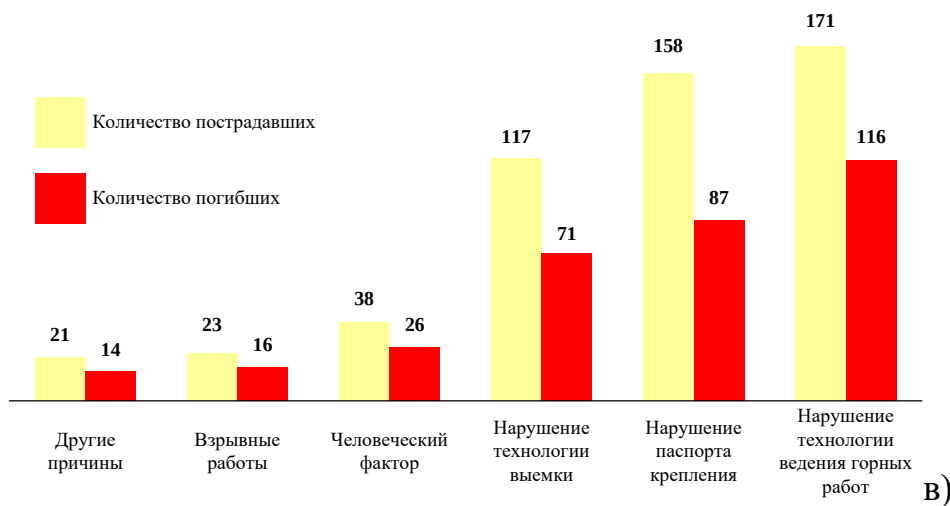
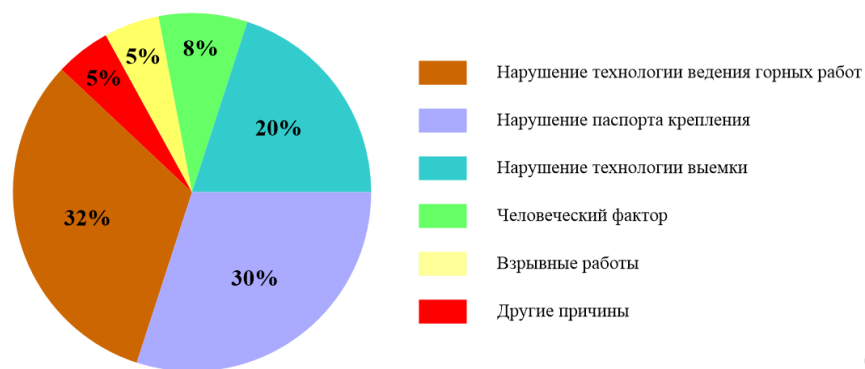
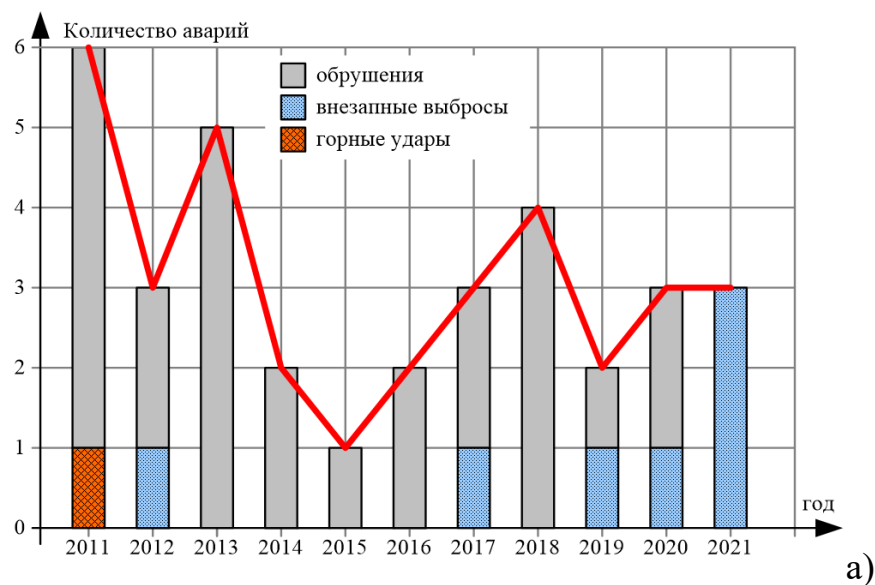


Рисунок 1.6 – Причины аварийности (по фактору ДЯ): а) распределение аварий по годам; б) распределение по причинам; в) распределение погибших и пострадавших

Для обоснования технологий ведения горных работ осуществляют прогноз горных ударов. Выделяют региональный, локальный и текущий

прогнозы [90, 27]. Первый этап (региональный) позволяет оценить общую закономерность протекания физических процессов и характер перераспределения напряжений. В настоящее время существуют исследования, где характер перераспределения напряжений в сложных горно-геологических условиях изучают в динамике, моделируют развитие горных выработок на глубоких горизонтах работ с целью прогнозирования удароопасности [77]. Второй этап (локальный) применим в каждой частной задаче, поскольку разработка глубоких горизонтов угольных месторождений носит для каждого производственного случая уникальный характер. Текущий прогноз определяет состояние массива в процессе ведения горных работ и определяется инструментальными методами. В диссертационной работе рассматривается метод регионального прогноза.

Для регионального прогноза инструкциями прогнозирования ДЯ предлагается геодинамическое районирование участка недр. Составляющими такого прогноза являются: а) выполнение математического моделирования НДС массива горных пород, определение главных напряжений в массиве горных пород; б) выполнение оценки НДС массива горных пород и его динамика. Результаты геодинамического районирования используются при раскройке шахтного поля и разработке проектной документации.

Одним из наиболее привлекательных методов для прогнозирования горных ударов является оценка событий на основании концепции о сейсмичности событий [44]. Эти события следует связывать с определяемыми главными напряжениями в массиве горных пород и с численными решениями на основе математического моделирования НДС. Важность учёта главных напряжений в исходном поле (начальном поле) и отличие применяемой теории от представлений напряжений по А.Н. Диннику отмечается в работе [76].

Потеря устойчивости вблизи влияния нарушений в процессе технологических работ, изучается А.С. Батугиным [10]. В работе рассматриваются новые тектонофизические методы определения ориентации

главных напряжений. Идея основана на представлении о специальном предельно напряжённом состоянии массива с поверхностью ослабления. В границах ослабления действуют касательные напряжения в плоскости сместителя τ_n и нормальные напряжения перпендикулярные плоскости сместителя σ_n . В качестве параметров оценки устойчивости применяются безразмерные величины $\hat{\tau}$, σ^* , $\hat{\sigma}$. Эти параметры позволяют оценить соотношение между величинами главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, ориентацией нарушений в пространстве, учитывают морфологию сместителя. При этом параметры не зависят от величин главных напряжений. На основании данных значений строятся стереограммы (рис. 1.7), определяющие опасность при различном положении сместителя относительно максимальных нормальных главных напряжений σ_1 , при различных значениях параметра Надаи-Лоде μ_σ . Определяются соотношения между σ_n и τ_n .

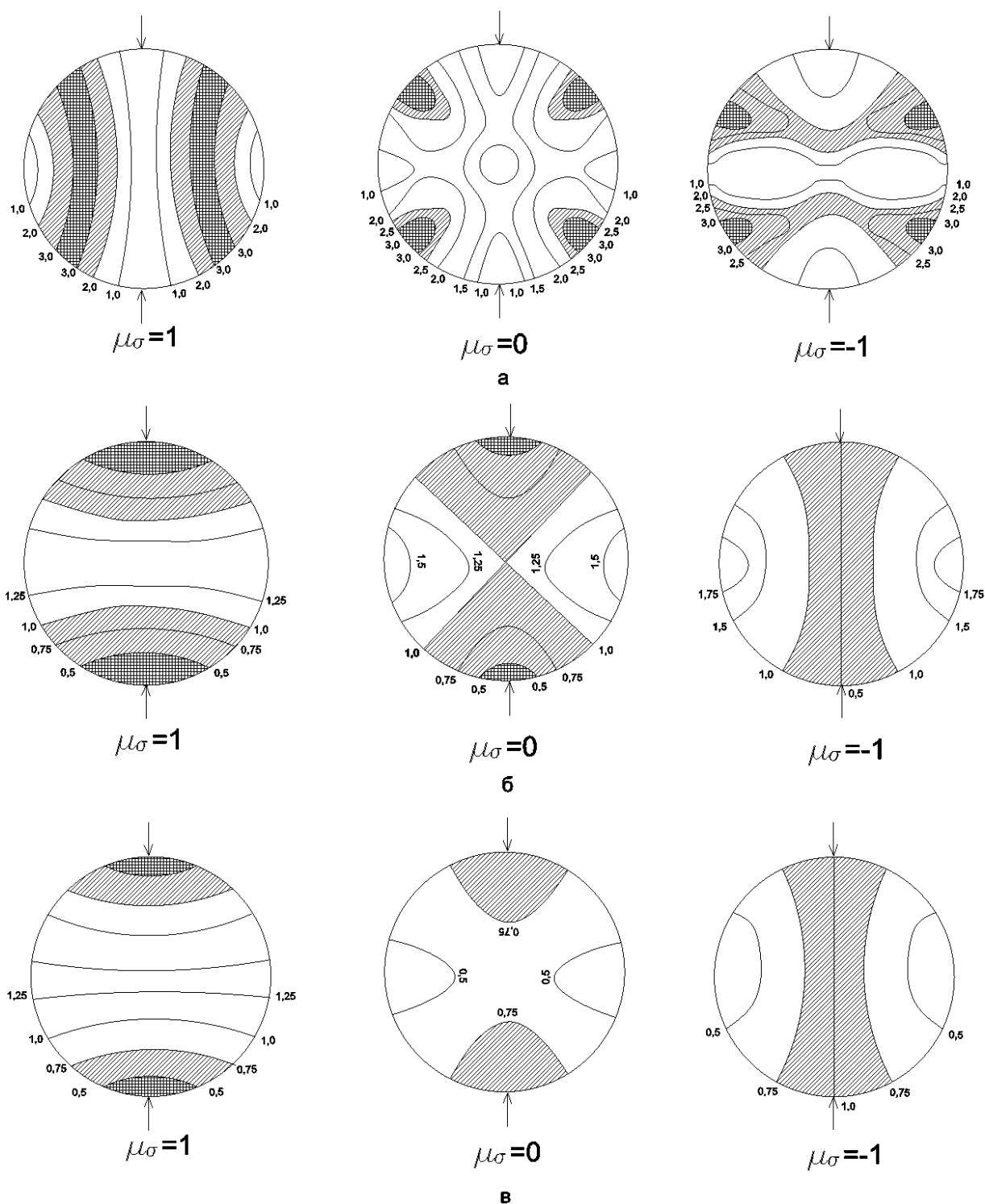


Рисунок 1.7 – Теоретические стереограммы значений (по А.С. Батугину)

σ_n определяется как:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \cos^2 \beta_1 + \sigma_3 \cdot \cos^2 \beta_3 \quad (1.1)$$

Диапазон возможных изменений значений σ_n находится в интервале:

$$\sigma_3 \leq \sigma_n \leq \sigma_1. \quad (1.2)$$

Нормальные к плоскости сместителя напряжения σ_n в случае $\sigma_n = \sigma_1$ соответствует сильным тектонически напряженным зонам, равенство $\sigma_n = \sigma_3$ соответствует наиболее благоприятным событиям при прочих равных условиях, промежуточные значения σ_2 приравниваются σ_1 , σ_3 либо принимаются как среднее для этих значений (на основании значений параметра Надаи-Лоде μ_σ – обобщённое сжатие, обобщённое растяжение, обобщённый сдвиг соответственно). Более строгое определение σ_2 позволит уточнить результаты расчёта, что применяется в предлагаемом методе прогноза. Если изменение параметра Надаи-Лоде задавать с шагом 0,25 (знание направления и величины σ_2 для конкретного участка месторождения), то точность разрабатываемой модели повысится на 25%.

Выводы по главе

Анализ методов прогноза горных ударов, выявления повышенных тектонически-напряжённых зон и моделирования геомеханических процессов приводит к следующим выводам.

- 1) Расчётная модель для выявления высоких тектонически напряжённых зон и оценки технологического влияния очистных выработок выемочного участка и выработанного пространства должна включать совокупность факторов. Эти факторы влияют на концентрацию напряжений. Учёт соотношения напряжений позволит определить критические значения, приводящие к разрушению углепородного массива. Следствием таких разрушений являются горные удары.
- 2) Для создания компьютерной модели следует оценить математический аппарат, являющийся её основой. На основании этого аппарата предложить собственную математическую модель. Такое сравнение позволило в данной главе выбрать способ расчётов и средство достижения целей, стоящих перед автором настоящей работы. Решение

задач возможно производить и в других расчётных комплексах, реализующих предложенную математическую модель.

- 3) Разработка алгоритма метода прогноза горных ударов включает оценку влияния ряда факторов. Часть этих факторов ранее не принимали во внимание. Другой причиной могло служить отсутствие методов, позволяющих произвести их учёт и создать на их основе математическую модель. К таким факторам относятся: горизонтальные тектонические составляющие горного давления; горизонтальные составляющие по А.Н. Диннику; технологические процессы выемки полезного ископаемого; геологическая нарушенность массива в зоне ведения работ; а также диапазон изменения деформационных физических свойств.
- 4) Создаваемый алгоритм должен удовлетворять условиям, позволяющим производить оценку НДС массива с помощью численных методов, отличительными качествами которых являются широкая применимость, универсальность и простота вычислений. Имеющиеся недостатки, связанные с большим объёмом рассчитываемой информации, позволяет преодолеть наличие современных вычислительных систем. При этом исследователь достигает при надёжности вводимых данных и объективности создания модели высокую точность решений, соответствующую требованиям практики горного дела.
- 5) Анализ динамических явлений, происходящих на глубоких горизонтах угольных шахт, показал высокую степень аварийности. Аварийность остаётся на относительно постоянном уровне в течение 10 лет (с 2011 по 2021 годы). Аварии, произошедшие в результате влияния геомеханических процессов, составляют 17%. Таким образом, изучение природы геомеханических процессов является актуальным.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЁННЫХ ЗОН

2.1 Основные факторы, подлежащие учёту при создании численных алгоритмов моделирования НДС в массиве

Руководствуясь выводами, представленными в первой главе, разработаем алгоритм численного моделирования НДС. Для создания моделей производим анализ геотектоники мульды и шахтного поля, условий обрушения кровли при движении очистного и подготовительных забоев, Инструкции по прогнозу динамических явлений [90]. Сравнение производим с эпицентрами очагов реализованных горных ударов. Такой подход позволит заблаговременно выявлять тектонически напряжённые зоны с высокими концентрациями напряжений.

Постановка задач должна быть реализована в компьютерных моделях, которые учитывают геометрию, физические свойства, предельные значения, приводящие к разрушению. Ещё одним важным аспектом определения опасных зон является поведение кровли. В данном случае интерес представляет её обрушение. Анализ производят с тем, чтобы в зависимости от циклов отработки пластов управлять ей, а также рекомендовать эффективные и оптимальные способы поддержания.

В практике ведения работ взаимовлияние технологических, тектонических и гравитационных составляющих носит более широкий характер. Пример обрушения кровли относится лишь к частному случаю. Исходя из условий ведения работ и поставленных целей, каждую ситуацию следует рассматривать отдельно.

Упомянутый нами ранее региональный прогноз включает прогноз по данным, полученным при ведении геолого-разведочных работ и прогноз по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям. Осуществляют определение опасных зон в районе геологических нарушений

электрометрическим и электромагнитным методами. Локальные прогнозы включают бурение уточняющих скважин, выход буровой мелочи, кернование, геофизические методы, регистрация сейсмоакустической активности, электромагнитных импульсов, искусственно наведённого электромагнитного поля.

Региональный прогноз учитывает влияние горизонтальных напряжений. Эти напряжения создаются под действием тектонических сил. Выявление тектонически напряжённых и динамически опасных зон проводится аналитическими методами, например, такой способ применяют для шахт Кузбасса [61]. Здесь стоит обратить внимание на условия формирования геологической нарушенности на основании прочностных свойств массива горных пород. Схожие методы подхода к оценке опасных зон возможны при отработке угольных пластов Воркутского месторождения.

Укрупнённый алгоритм метода прогноза горных ударов на глубоких горизонтах угольных шахт в условиях тектоники выглядит следующим образом.

Метод прогноза создаётся на основе проектной документации, паспортов ведения горных работ, федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. По информации, получаемой из этих документов, строятся геометрическая и математическая модели, которые вносятся в численную модель совместно с параметрами технологических процессов. При последующем анализе полученных результатов производят оценку на соответствие полученных параметров эффективному и безопасному состоянию горных работ. Если состояние не безопасное, то требуется изменить технологию, параметры крепи, уменьшить длину консоли. Это и есть многовариантное решение. Длина консоли, соответствующая требованиям безопасности, – длина, при которой целесообразно проводить её обрушение. Для каждого конкретного случая следует выявить критерии оценки, как правило, предельные напряжения или переход из одного состояния деформирования в другое. Предельные

значения на сжатие/растяжение определяют из паспорта прочности горной породы. При безопасном состоянии горных работ дают рекомендации, предварительно сравнив их с существующими нормативами, правилами безопасности и актами реализованных явлений.

На рисунке 2.1 представлена схема, иллюстрирующая алгоритм.

Решение каждой конкретной задачи с применением численных моделей позволяет планировать способы отработки. При этом происходит учёт геомеханических особенностей отрабатываемого участка.

2.2 Физический смысл математической модели для разработки алгоритма прогноза горных ударов

Физические процессы, происходящие в массиве, описываются с помощью уравнений статического равновесия. В уравнения входят компоненты напряжений, массовых сил и кинематических сил, определяющих смещения. Связь между компонентами напряжений и смещений обеспечивается через выбор подходящей модели поведения среды. Первоначальной моделью для рассматриваемых задач послужила линейная упруго-пластическая модель Кулона-Мора, в дальнейшем, при более детальном анализе, выбрана модель уплотняющегося массива.

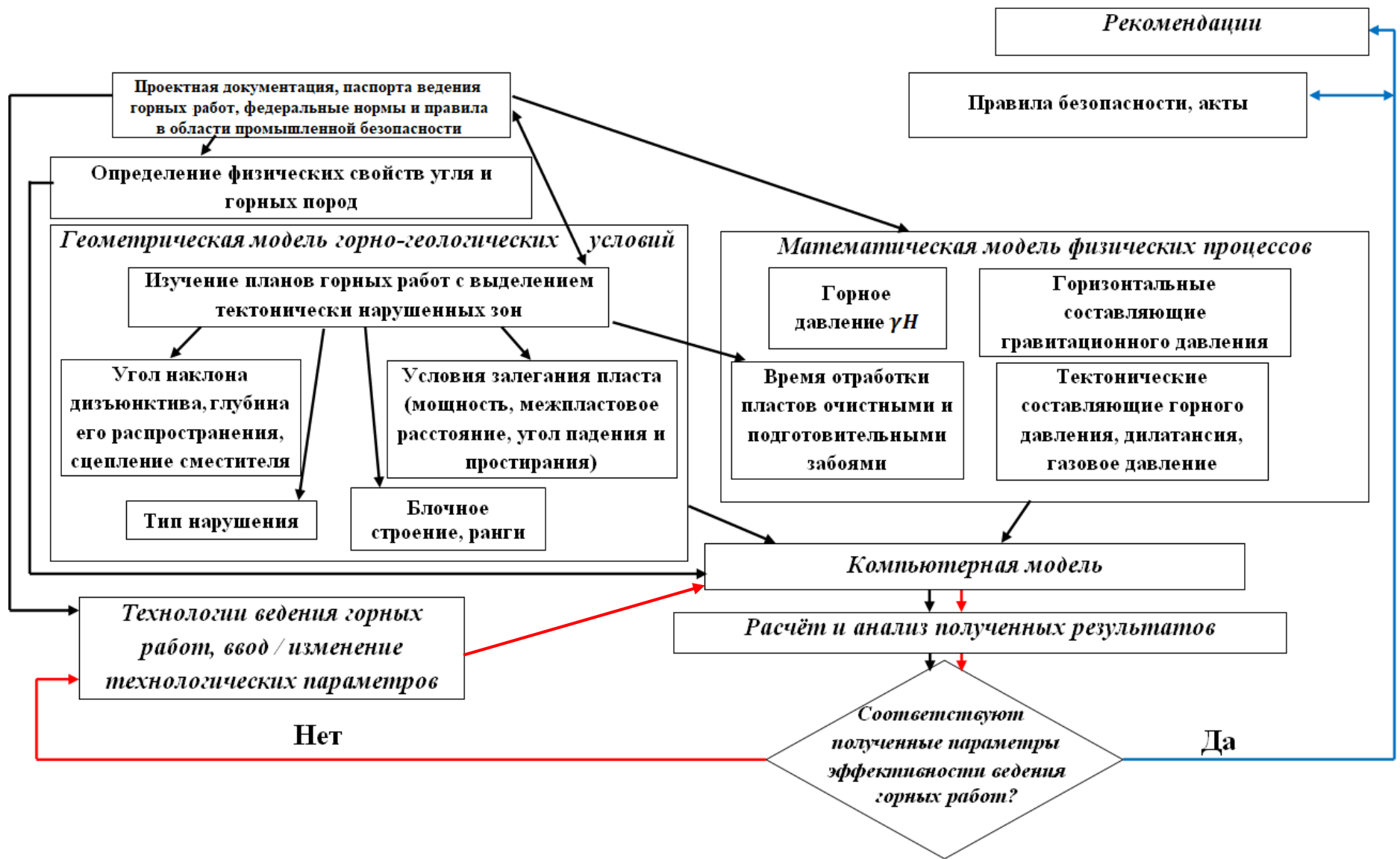


Рисунок 2.1 – Алгоритм применения компьютерных методов имитационного моделирования

Если пока не касаться вопросов формирования начального поля напряжений, о которых более подробно раскрыто в третьей главе (значимая часть диссертационного исследования), при прогнозе горных ударов на первом этапе обычно производят расчёты, отражающие начальную стадию деформирования. Их результаты применимы в первом приближении. В литературе, посвящённой представленной теме, сказано, что она имеет в своей основе процессы упругого деформирования углепородного массива. Зависимость Гука для горных пород таких как песчаник, аргиллит, алевролит справедлива до значения напряжений вплоть до 60-70% от разрушающей (модуль длительной деформации) [41]. Изменение упруго-пластических свойств и переход в следующую стадию деформирования свидетельствует о разрушении и служит «сигналом» для проведения соответствующих мероприятий. В породах, поведение которых описывается упругой моделью, наблюдают высокие тектонические напряжения. Они приводят к ослаблению массива. В этом случае о нарушении устойчивости выработок свидетельствует хрупкое разрушение. Хрупкое разрушение сопровождается стрелянием или шелушением, влекущим обрушение в выработку породных плит [86].

Если сравнивать метод исследования НДС через модель уплотняющегося массива с традиционно применяемым (модель Кулона-Мора), то следует отметить отказ от упрощающих гипотез об активной и реактивной нагрузках. В модель Кулона-Мора входит 5 основных величин, характеризующих физические свойства: E – модуль Юнга [Н/м^2], ν – коэффициент Пуассона, φ – угол внутреннего трения [градус], C – сцепление [Н/м^2], γ – объёмный вес горных пород [кг/м^3].

Перечисленные физические свойства применяют в инженерной практике. Однако в учёт не берут другие свойства горных пород, которые увеличивают достоверность вычислений и находят отражение в прогрессивных моделях горных пород.

На практике имеет место уплотняющийся массив, характеризующийся пластичным поведением горных пород и угля.

Модель Кулона-Мора может рассматриваться как первое приближение реального поведения горных пород. Пластичное поведение горных пород имеет нелинейное описание напряжённого состояния. Чтобы задать такое описание требуется большее количество параметров числовой модели. Возникает дополнительная вычислительная сложность.

Кроме перечисленных физических свойств, для решения задач с применением модели уплотняющегося массива следует учитывать: ψ – угол дилатансии [градус], пористость, K_0 – коэффициент бокового давления при уплотнении, E_{50} – секущий модуль деформации при трёхосном нагружении [МПа], E_{ur} – модуль деформации при трёхосной разгрузке [МПа], E_{oed} – модуль деформации при нагружении в одометре [МПа].

При осуществлении выемочных работ в зоне околорудного пространства проявляется разгрузка. Горные породы приобретают более широкий линейно-упругий диапазон, а в математических расчётах применяют модуль деформации при трёхосной разгрузке E_{ur} . На рисунке 2.2 представлена зависимость разности значений главных максимальных напряжений и главных минимальных (девиатор) $|\sigma_1 - \sigma_3|$ от деформации образца ε_1 . Отмеченный на рисунке модуль E_0 – начальный модуль упругости.

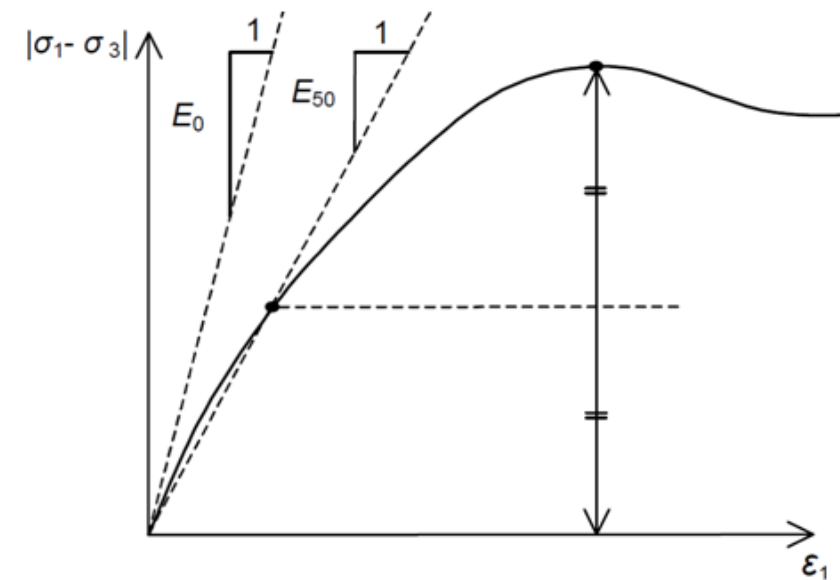


Рисунок 2.2 – диаграмма деформирования

К недостатку модели уплотняющегося массива можно отнести лишь то, что на вычисление требуется больше времени, поскольку применяемая для вычислений матрица жёсткости закладываемого в модель материала формируется и раскладывается поэлементно на каждом шаге выполняемых расчётов. Модель материала представляет собой систему математических уравнений, характеризующихся соотношением между напряжениями и деформациями. Модели материала часто выражаются в форме, в которой бесконечно малые приращения напряжений (или «скорости напряжений») связаны с бесконечно малыми приращениями деформаций (или «скоростями деформаций»).

Исследователями, создававшими Plaxis, в рамках тестирования программного комплекса были замоделированы лабораторные испытания образцов с различными методами нагружения. В результате был сделан вывод о том, что применение расчётной модели уплотняющегося массива согласуется с экспериментально наблюдаемым изменением физических свойств и независимы от частных методов нагружения. Модель уплотняющегося массива является точнее модели Кулона-Мора и находит множество применений.

В результате уплотняющегося поведения массива за счёт действующих нагрузок на пластическом этапе разрушения происходит закрытие пор и связанные с этим рост угла внутреннего трения ϕ и сцепления C . Причём мгновенное положение предела текучести материала массива будет стремиться в сторону предельного состояния. Происходящее впоследствии пластическое разрыхление (в некоторых источниках называемое иногда непосредственно дилатансией) приводит к образованию нового порово-трещинного пространства с закономерным уменьшением угла внутреннего трения ϕ и сцепления C . Это обозначает, что пластическое НДС зависит от дополнительных параметров уплотнения/ослабления массива. Изменение угла внутреннего трения с учётом дилатансии подробно рассмотрены в работе [108]. При этом дилатансия на практике в горных породах и полезных ископаемых проявляется в обоих направлениях с положительным и отрицательным знаками.

Модель уплотняющегося массива (Hardening-Soil model – HS) – гиперболическая модель второго порядка, являющаяся совершеннее, чем модель Кулона-Мора.

Оценка НДС углепородного массива производится по двум основным типам уплотнения: а) при сдвиге и б) при сжатии.

Уплотнение при сдвиге применяют для моделирования необратимых деформаций, появившихся в результате первичного девиаторного нагружения; уплотнение при сжатии – для моделирования необратимых пластических деформаций, обусловленных первичным сжатием при одометрическом или изотропном нагружении.

В расчётных точках наблюдается накопление пластических деформаций $\{\epsilon_p\}$. Накопленная пластическая деформация в процессе активного нагружения в случае любых напряжённых состояний является аргументом функции $f(\{\sigma\}, \{\epsilon_p\}, \chi)$. Здесь с помощью фигурных скобок $\{\}$ показаны величины, математически выражаемые через векторы-столбцы, σ – текущие напряжения, χ – параметр уплотнения горных пород. В том случае,

когда функция $f < 0$ деформация горных пород происходит по упругому закону, когда $f = 0$ проявляются пластические деформации.

Фактически с увеличением сплочённости массива возрастают допустимые растягивающие напряжения. На практике горные породы не могут выдержать ни одного или только очень малые растягивающие напряжения. Такое поведение может быть проанализировано с учётом напряжений на отрыв. В этом случае круги Мора с отрицательными главными напряжениями не допускаются. Действие напряжений на отрыв записывают тремя дополнительными функциями текучести, которые определяются следующим образом:

$$\begin{cases} f_1 = \sigma_1' - \sigma_t \leq 0 \\ f_2 = \sigma_2' - \sigma_t \leq 0 \\ f_3 = \sigma_3' - \sigma_t \leq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

При расчётах напряжений на отрыв допустимые растягивающие напряжения, σ_t , являются, по умолчанию, равными нулю. Для этих трёх функций принимают правило связанного потока. В пределах поверхности текучести поведение материала упругое и подчиняется закону Гука для изотропной линейной упругости.

Вместе с этим возникает и новый фактор, влияющий на формирование опасных зон – дилатансия. Процесс отображает кинематическую зависимость приращений деформаций объёма и сдвига, сформулирован О. Рейнольдсом (1885 г.). Отсюда очевидно, что из-за несоответствия расчётных моделей ранее этот фактор не учитывали или же при расчётах не придавали ему должного значения. Напомним, что большинство прежде решённых задач выполнено с применением модели Кулона-Мора.

В работах [107, 108, 109, 110, 124] представлены математические формулы, описывающие дилатансию. Известны инструментальные измерения в зонах подработки [13, 75], в результате которых были отмечены значительные расширения объёма пород и ископаемых, слагающих массив.

В зонах, подверженных разрушению, материал, фактически, изменяет свои физические свойства, и происходит перераспределение НДС наряду с нарушением сплошности. Это также говорит в пользу учёта дилатансии и модели уплотняющегося массива.

В авторском свидетельстве [6] представлена формула, позволяющая рассчитать безразмерный коэффициент напряжённости, по значениям которого выявляют отсутствие, склонность или же интенсивную дилатансию горных пород и полезных ископаемых. Интенсивная дилатансия в хрупких породах влечёт за собой, как правило, горные удары.

После обширного сдвига расширяющиеся материалы достигают состояние предельной плотности, где дилатансия принимает критические значения. В этом случае поведение массива описывают через критерий дилатансионного отрыва. В компьютерной модели в общих параметрах (General parameters) вводится первоначальный e_{init} и максимальный e_{max} коэффициенты пористости. Учёт дилатансионного отрыва задаётся в общем подменю в окне базы данных материалов. По умолчанию дилатансионный отрыв не активен.

Начальный коэффициент пористости e_{init} соответствует значению в нетронутом массиве. Максимальным коэффициентом определяют материал в критическом состоянии, сразу же при достижении которого, угол дилатансии устанавливается автоматически в ноль. Минимальный коэффициент e_{min} может быть также введён, но этот общий параметр пород и угля не применяется в контексте модели уплотняющегося массива. Кроме того, угол дилатансии задают и через физические свойства исследуемого материала.

На рисунке 2.3 представлен график, отображающий учёт дилатансионного отрыва [100].

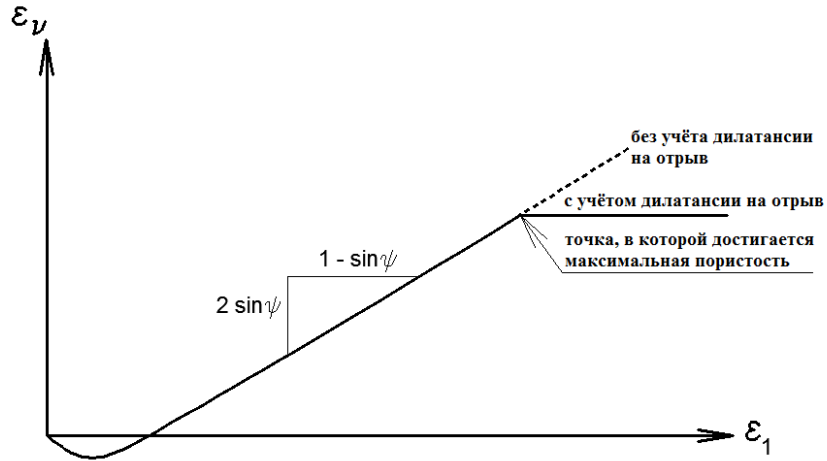


Рисунок 2.3 – График приращений, полученный при стандартном трёхосном испытании сухого образца без и с учётом дилатансионного отрыва

Расчёты МКЭ основаны на интегрировании бесконечно малых приращений и деформаций с применением принципа вариации Галёркина-Зиенкевича (1967):

$$\int \delta \underline{u}^T (\underline{L}^T \underline{\sigma} + \underline{p}) dV = 0, \quad (2.3)$$

где $\delta \underline{u}$ – кинематически допустимое изменение смещений, $\underline{L}^T$ – транспонированный дифференциальный оператор, $\underline{\sigma}$ – тензор напряжений, $\underline{p}$ – тензор массовых сил.

Применение теоремы Грина для частной интеграции в первом пределе приводит (2.3) к уравнению, которое также называют уравнением фактической работы:

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{p} dV + \int \delta \underline{u}^T \underline{t} dS, \quad (2.4)$$

где $\underline{\varepsilon}$ – тензор деформаций, $\underline{t}$ – тензор граничных усилий.

Оценка напряжённого состояния производится как возрастающий процесс, что в математической записи выглядит:

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{i-1} + \Delta \underline{\sigma} \quad \Delta \underline{\sigma} = \int \underline{\sigma} dt \quad (2.5)$$

В (2.5) σ^i представляет значение реального напряжённого состояния, которое неизвестно, а σ^{i-1} представляет значение предыдущего напряжённого

состояния, которое известно. Приращение напряжения $\Delta\sigma$ является изменением напряжения за малое приращение времени.

Все значения, указанные в (2.3) - (2.5) – функции деформаций и напряжений в трёхмерном пространстве.

Представив условие равновесия в дискретной форме, легко выделить вектор внешней приложенной силы (первые два слагаемые в правой части уравнения (2.6)) и вектор внутренней реакции от предыдущего этапа (последний предел в правой части (2.6)). Разность между векторами уравнивается приращением напряжения $\Delta\sigma$

$$\int \underline{\underline{B}}^T \Delta \underline{\underline{\sigma}} dV = \int \underline{\underline{N}}^T \underline{p}^i dV + \int \underline{\underline{N}}^T t^i dS - \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV, \quad (2.6)$$

где $\underline{\underline{B}}$ – напряжённно-интерполированная матрица, которая содержит пространственные производные функции интерполяции;

$\underline{\underline{N}}$ – матрица, включающая функции интерполяции.

Отношение между приращениями деформаций и приращениями напряжений обычно нелинейно. В результате приращения напряжений не могут вообще быть вычислены непосредственно, и требуются значительные итерационные процедуры, чтобы удовлетворить условие равновесия (2.7) во всех точках материала.

Пластичное поведение материала описывают формулой, предложенной Вермеером (1979 г.):

$$\Delta \underline{\underline{\varepsilon}}^p = \Delta \lambda \left[(1 - \omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \right)^i \right], \quad (2.7)$$

где $\Delta \underline{\underline{\varepsilon}}^p$ – пластичное приращение деформации, $\Delta \lambda$ – приращение пластичного множителя, ω – параметр, указывающий на тип временного интегрирования: $\omega = 0$ – явное интегрирование, $\omega = 1$ – неявное интегрирование.

Для упругого поведения материала пластичное приращение деформации равно нулю.

Вермеер обосновал [128], что у применения неявного интегрирования есть некоторые главные преимущества: оно позволяет соблюсти необходимое условие обновления напряжения на границе текучести в случае перехода от упругого к упругопластичному поведению. Кроме того, можно доказать, что неявная интеграция, при определенных условиях, приводит к симметричной и положительной дифференциальной матрице $\partial \underline{\varepsilon} / \partial \underline{\sigma}$, которая имеет благоприятное влияние на итерационные процессы. Из-за этих главных достоинств в основе математического аппарата лежит неявное интегрирование.

Осуществление итераций требуется для получения равновесия в пределах определённой погрешности. Для исследуемого материала – в нашем случае, горных пород и угля, слагающих горный массив, определяется матрица жёсткости. При этом, чем более её точность, тем меньше требуется итераций. Общий итеративный процесс записывают следующим образом:

$$\underline{\underline{K}}^j \delta \underline{v}^j = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{j-1}, \quad (2.8)$$

где $\underline{\underline{K}}$ – матрица жёсткости, $\delta \underline{v}$ – вектор, содержащий частные приращения смещений, равнодействующая которых образует вектор приращения смещений $\Delta \underline{v}$, $\underline{f}_{ex}$ – вектор внешних сил, $\underline{f}_{in}$ – вектор внутренних реакций. Индекс i указывает на номер шага.

В частном случае – для модели Кулона-Мора, – применяют линейно-упругую матрицу жёсткости, описываемую законом Гука, и матрицу интерполяции деформаций. Процесс вычисления представляет трудную итерационную процедуру, до тех пор, пока существенная жёсткость не увеличится, даже при применении несвязанной модели пластичности. Специальные методы, такие как контроль длины дуги [123], верхняя релаксация и экстраполяция [129] могут улучшить итеративный процесс.

Кроме того, автоматическая процедура размера шага по Ван Лангену и Вермееру [130] имеет значение для улучшения практической применимости. Для моделей с линейным поведением в упругой области, таких как стандартная модель Кулона-Мора, при закладывании физических свойств, ввод в расчёты упругой матрицы жёсткости особенно благоприятен, к тому же матрица жёсткости должна быть уже сформирована и проанализирована перед первым шагом вычисления.

Далее, определившись с математическим описанием и физикой процесса, следует выделить расчётную область модели. Задавая размеры расчётной области, руководствуются тем, что ввод граничных условий может повлиять на напряженно-деформируемое состояние массива, а неверные параметры – вплоть до искажения. Стандартные граничные условия регламентируют возможность перемещений боковых элементов вдоль вертикальной оси и невозможность перемещений вдоль горизонтальной, а для нижней границы – невозможность перемещений в двух направлениях. Однако, при решении некоторых задач моделирования приходится отступать от многих стандартных условий (условий по умолчанию), поскольку при расчётах автоматически генерируются в массиве в качестве горизонтальных напряжений лишь начальные напряжения по А.Н. Диннику, что в неполной мере учитывает действие горизонтальных сил. В разрабатываемом методе составляющая горного давления от действия литосферных плит задаётся за счёт дополнительных нагрузок. В этом случае они будут являться граничными условиями вдоль оси OY , таким образом, перемещение на этой оси (боковая граница) возможно в двух направлениях, для нижней границы исследуемой области – остаются прежними. С внешней стороны модели задаются стандартные условия, характерные для боковых элементов вдоль вертикальной оси. Осуществляя моделирование по горизонтальному разрезу, что при некоторых особенностях вычисления возможно реализовать в известных программных комплексах, в соответствующую модель следует перенести горизонтальные составляющие горного давления, спроецировав

предварительно их направления на оси OX' и OY' , согласно выбранной системе координат, на боковых границах задаются их равнодействующие; вводится невозможность перемещений в двух направлениях.

На рисунке 2.1 представлен базовый алгоритм, согласно которому предполагается действовать при решении общих инженерных научных задач методом численного моделирования. Далее для определённого случая этот алгоритм дополняется новыми условиями.

Геометрию месторождения в электронном виде позволяет представить подпрограмма «Input». С помощью инструментов интерфейса устанавливаются границы рассматриваемого участка шахтного поля, геологические нарушения, границы пластов и пропластков. В отдельных задачах, например, при скважинных работах, задаются границы скважин; при необходимости рассмотрения действующих на крепь нагрузок изображается крепь. Создаётся база данных физических свойств каждой горной породы, слагающей массив, и угольных пластов. Задаётся геология массива. Затем представляется математическая модель задачи как:

- ввод граничных условий;
- выбор направлений и силы нагрузок, действующих на массив;
- определение параметров сетки конечных элементов.

В подпрограмме «Calculations» по умолчанию приведена начальная фаза (Initial phase), остальные фазы определяет пользователь в зависимости от типа анализируемых задач – выемка пласта, расчёт нагрузок, несущей способности крепи, действие геологических нарушений. Последующие фазы могут быть как самостоятельными, так и вытекать из предыдущих. Некоторые элементы как геологические нарушения, крепи можно активировать и деактивировать. Производят расчёт фазы, полученные результаты выводятся в подпрограмме «Output».

Предоставляется возможность оценить:

- различные виды деформаций;
- все известные типы напряжений;

- деформации и напряжения в эпюрах по произвольно проводимым сечениям;
- несущую способность крепи по эпюрам осевых и касательных сил и по изгибающим моментам.

В подпрограмме «Curves» отображаются графическая и табличная зависимости интересующих исследователя параметров.

Получаемые деформации и напряжения являются проекциями на соответствующие координатные оси модели: x , y и z . Для дальнейшего анализа получаемые значения необходимо пересчитать в главные деформации и напряжения. В таких программных комплексах, как, например, MathCad, производится дальнейшая интерпретация результатов. Последующий анализ и обработка результатов были выполнены в этой среде.

2.3 Определение физических свойств для реализации математической модели уплотняющегося массива (на примере горных пород и угля для ш. Комсомольская)

Рассмотрим предлагаемую математическую модель уплотняющегося массива на примере её применения для условий шахты Комсомольская Воркутского месторождения. Данный подход рекомендуется использовать при решении задач регионального прогноза динамических явлений для любой угольной шахты [68].

Данные, применяемые в предлагаемой математической модели, сведены в таблицу 2.1. Согласно инженерно-геологическим изысканиям коэффициент крепости f для угля равен 2,5, для песчаника – 9; плотность для угля – $1,35 \text{ т/м}^3$, для песчаника – $2,7 \text{ т/м}^3$. По формуле, предложенной Л.И. Бароном, определен предел прочности на сжатие $[\sigma_{сж}]$ для угля – 12,9 МПа, для песчаника – 98,4 МПа. Для сравнения: в литературе, описывающей Воркутское месторождение, встречаются значения $[\sigma_{сж}]^{\text{уголь}} = 11\text{-}20 \text{ МПа}$, для песчаника $[\sigma_{сж}]^{\text{песч}} = 54\text{-}140 \text{ МПа}$ ($[\sigma_p]^{\text{уголь}} = 1,4 \text{ МПа}$; $[\sigma_p]^{\text{песч}} = 10,9 \text{ МПа}$) [11, 12].

Сцепление и угол внутреннего трения определяются из паспорта прочности Кулона-Мора. Для параболической формы огибающей кругов Мора выражения выглядят следующим образом

$$\varphi = 2 \left[\arctg \left(\frac{1}{2B} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} - 45^\circ \right) \right] \quad (2.9)$$

где

$$B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1 \quad (2.10)$$

$$C = B \cdot \sigma_p \quad (2.11)$$

Секущий модуль деформации при трёхосном нагружении E_{50} описывает нелинейную упругую область. В основе лежит гиперболическое уравнение, полученное Р. Л. Конднером и Дж. С. Зеласко [115] с поправками Дж. М. Дункана и Ц.-Й. Чанга [103]

$$\varepsilon_l = \frac{1}{2E_{50}} \cdot \frac{\sigma}{1 - \sigma/\sigma_a}, \quad (2.12)$$

где ε_l – продольные деформации, σ_a – асимптотическое девиаторное напряжение.

Асимптотическое девиаторное напряжение соотносят с максимальным девиаторным напряжением σ_f с помощью следующего уравнения

$$\sigma_a = \frac{\sigma_f}{R_f}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_f = (C \cdot \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_3) \cdot \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (2.14)$$

Согласно Дж. М. Дункану и Ц.-Й. Чангу величина R_f изменяется в пределах 0,75...1 [103].

Таблица 2.1 – Физические свойства угля и вмещающих горных пород, закладываемые в модель (на примере ш. Комсомольская)

Физические свойства	Уголь	Песчаник
Взяты из технической документации		
Предел прочности на сжатие $[\sigma_{сж}]$, МПа	12,9	98,4
Предел прочности на растяжение $[\sigma_p]$, МПа	1,4	10,9
Плотность ρ , т/м ³	1,35	2,7
Угол внутреннего трения φ , град.	37	35
Коэффициент сцепления C , МПа	3,1	22,5
Коэффициент Пуассона ν	0,16-0,24	0,3
Пористость	0,14	0,08
Расчётные		
Угол дилатансии ψ , град.	10,7	8,2
Секущий модуль деформации E_{50} , МПа	508-762	8253-10087
Модуль деформации при трёхосной разгрузке E_{ur} , МПа	1016-1524	16506-20174
Модуль деформации при нагружении в одометре E_{oed} , МПа	594-892	14517-17743

Модуль деформации E_{ur} и модуль деформации при нагружении в одометре E_{oed} находятся в строго определённых диапазонах

$$2E_{50} < E_{ur} < 20E_{50}, \quad (2.15)$$

$$0,1E_{50} < E_{oed} < 3E_{50}. \quad (2.16)$$

Эти значения определяют, исходя из степени деформируемости рассматриваемых горных пород, которая с глубиной уменьшается при одновременном увеличении степени уплотнения.

Для учёта изменений модулей деформаций под влиянием действующих в массиве сил в процессе уплотнения в модель материала вводятся значения модуля деформации с верхним индексом ref .

Верхний индекс ref обозначает некоторое усреднённое значение, получаемое в результате лабораторных испытаний образца. Для

приближения к реальным условиям уплотнения перечисленные параметры домножаются на нелинейный коэффициент, определяемый степенью m .

Модуль деформации, получаемый при нагружении образца горной породы в условиях всестороннего сжатия

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \cdot \left(\frac{\sigma}{p^{ref}} \right)^m, \quad (2.17)$$

где σ – действующие напряжения, МПа;

p^{ref} – эталонное давление, МПа;

m – параметр, определяющий нелинейность функции.

Степень m определяется, исходя из типов горных пород. Например, для мягких глин значение принимается равным 1,0. Для описания горных пород осадочного происхождения, в частности для Норвежского песчаника это значение даётся равным около 0,5 [113], позже было предложено [131] принимать значения в диапазоне $0,5 < m < 1,0$.

$$E_{oed}^{ref} = \frac{p^{ref}}{\lambda^*}. \quad (2.18)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1+e_0)}. \quad (2.19)$$

В выражении (2.18) модуль деформации определяется при нагружении образца в условиях всестороннего сжатия, для конкретных эталонных давлений p^{ref} . Кроме того, он связан с модифицированным коэффициентом сжатия λ^* . Параметр e_0 – начальная пористость материала модели.

По аналогии можно определить модуль деформации при трёхсторонней разгрузке. Он связан с модифицированным коэффициентом расширения k^* . Эти значения определяют по выражениям

$$E_{ur}^{ref} = \frac{3p^{ref}(1-2\nu_{ur})}{k^*}, \quad (2.20)$$

$$k^* = \frac{k}{(1+e_0)}. \quad (2.21)$$

Значение угла дилатансии для угля и песчаника определяется графическим путем (рис. 2.4) из зависимости объёмных деформаций от продольных. Значения величин определялись на упругой стадии деформирования при испытаниях на нагружение образцов в условиях одноосного сжатия в режиме заданных деформаций (ГОСТ 28985-91).

Объёмные деформации через продольные и поперечные выражают следующим соотношением

$$\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2, \quad (2.22)$$

где ε_1 – относительные продольные деформации, ε_2 – относительные поперечные деформации.

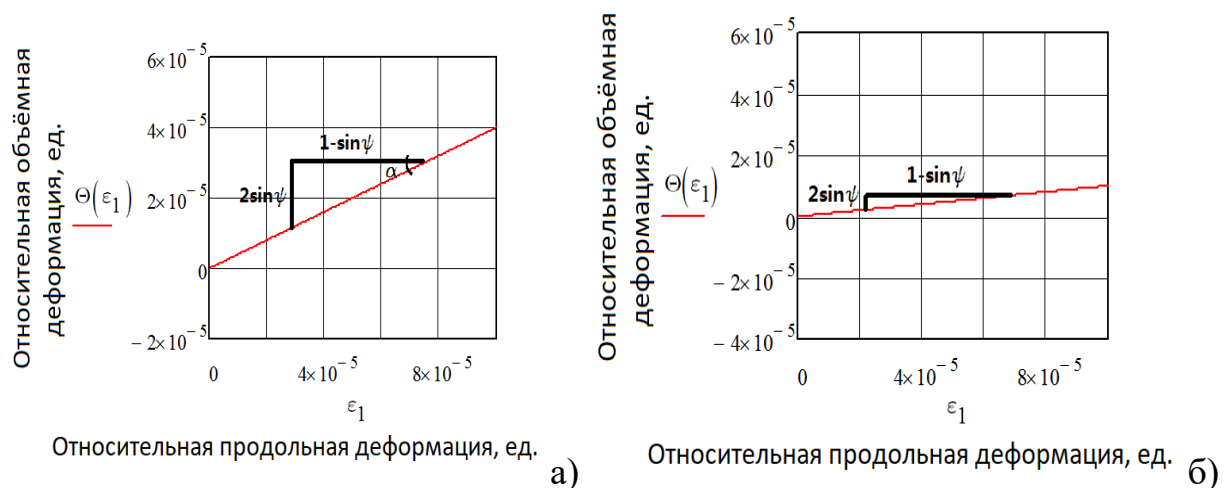


Рисунок 2.4 – Определение угла дилатансии для угля (а) и песчаника (б)

Из рис. 2.4 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \sin \psi}{1 - \sin \psi}, \quad (2.23)$$

где ψ – угол дилатансии, α – угол наклона функции $\theta(\varepsilon_1)$

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{2(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right). \quad (2.24)$$

Определив таким же образом физические свойства горных пород в задачах, рассматриваемых в публикациях ведущих учёных [105, 3, 86], произведём верификацию предложенной математической модели уплотняющегося массива. При этом оценим такие факторы, как технологическое влияние проводимой выработки (на примере

аналитического расчёта), действие гравитационных и тектонических сил, а также влияние геологической нарушенности при решении задач в горизонтальном сечении.

2.4 Основные факторы при прогнозе горных ударов

Следует выделить основные факторы, определяющие места происходящих аварий и инцидентов. В работе [22] отмечено, что наибольшую опасность при отработке угольного пласта представляют участки, находящиеся на 10-20 м от геологического наушения. Характерные размеры их влияния варьируют в пределах 25-100 м. Значительная часть точек, в которых были зарегистрированы события, подтверждает прямую зависимость от особенностей формирования структуры месторождения. Выполненные О.И. Черновым и В.Н. Пузырёвым совместные эксперименты [69] это доказывают. Выделяют три группы геологических нарушений, способных привести к опасным последствиям:

- 1) дизъюнктивы, нарушающие залегание пласта (сбросы, надвиги, сдвиги, взбросы);
- 2) антиклинальные и синклинальные складки;
- 3) мелкие пликативные и внутрипластовые нарушения.

Процесс формирования тектонически напряжённых зон, приводящих к горным ударам, объясняют перераспределением напряжений в массиве под действием проводимых работ. При прогнозе учитывают первоначальное НДС, а также физические свойства угля и горных пород. Имеющая место анизотропия сказывается на неравномерном распределении зон ПГД.

Физически возникновение горных ударов напрямую зависит от тектонических сил при условии, если они превышают гравитационные. Иногда значения первых могут быть в несколько раз большими, чем вторых.

Ниже будут рассмотрены подробнее процессы, обусловленные тектоническими силами, дизъюнктивными нарушениями и технологиями добычи полезного ископаемого, а также влияние каждого фактора в

отдельности, впоследствии же представим их взаимовлияние с формированием напряжённых зон. Выявление каждой составляющей, соотношение удельной потенциальной энергии с данными сейсмостанции, выявление параметра Надаи-Лоде для описания вида напряжённого состояния, учёт дилатансии позволят оценить характер перераспределения напряжений в случае начальных условий в нетронутом массиве, а также при проведении выработок. Часть этих вопросов подробнее рассмотрена в 3-ей главе.

2.4.1 Тектоника

Численное моделирование производится путём решения плоских задач. Таким образом, выделяют два сечения: горизонтальное (в плоскости угольного пласта) и вертикальное. Подход к такому разделению обоснован в 3-ей главе.

В горизонтальном сечении геологические нарушения задаются геометрическими построениями. Берега сместителя при сдвиге подвержены трению, поэтому материал, заполняющий разлом, моделируется с помощью уменьшения значений физических свойств: угла внутреннего трения, сцепления, модуля Юнга.

В вертикальном сечении разлом представляет разрыв, идущий от поверхности вглубь массива. Среда претерпевает изменения под действием гравитационного литостатического сжатия, а со стороны тектонической составляющей горного давления – кроме сжатия, ещё и сдвига.

С увеличением глубины возрастают силы трения, сдерживающие рост дизъюнктива. Эпицентр разрушения примыкает к устью разлома.

Процесс разрушения связан с начальной глубиной заложения разрыва, трещиностойкостью среды и активным напряжением тектонического сдвига [49].

2.4.2 Горизонтальные составляющие напряжений

Горизонтальные составляющие, предложенные А.Н. Динником, как правило, заложены в программы, предназначенные для геотехнических расчётов, учёт их происходит по умолчанию. Поскольку горизонтальные тектонические силы своей природой обязаны градиенту тектонических движений, то, моделируя массив, исследователю нужно задать действие литосферных плит в качестве распределённой нагрузки. Теоретические предпосылки обозначены в работах [35, 45, 79, 86].

Следует также отметить, что в зависимости от скорости деформаций земной коры за новейший и современный периоды месторождения Урала относят к более подвижным и сильно деформируемым областям с наибольшими касательными напряжениями, равными $39,2 \pm 19,6$ МПа – II тип по классификации М.В. Гзовского [18].

В зонах землетрясений, вулканических поясов повышенные горизонтальные напряжения могут в 10 и более раз превышать вертикальные. По данным, представленным в нормативных документах дирекции АО «Воркутауголь», верхний предел касательных напряжений по сейсмологическим оценкам превышает 30 МПа. В пределах щитов – 10 ± 5 МПа, платформ – 50 ± 25 МПа, а в альпийских складчатых областях – 100 ± 50 МПа. Общий аналитический метод их определения в настоящее время не известен.

2.4.3 Технология ведения работ

Как отмечено выше, на процесс формирования горных ударов не последнюю роль оказывают технологические процессы, в частности проведение горных выработок. Детальное изучение в околорудном пространстве НДС позволит выявить зоны, требующие проведение дополнительных профилактических мероприятий, а также рассмотреть наиболее оптимальный вариант ведения работ, позволяющих снизить риск динамических явлений (ДЯ). Напряжённость выработок зависит от

направления действия максимальных горизонтальных напряжений. При этом следует учитывать параметры выработки во взаимодействии с зонами напряжений, создаваемыми геологическими нарушениями. Для процессов моделирования значимым остаётся редко применяемое на практике соотношение размеров проводимых выработок с масштабами тектонодинамических систем и особенности их взаимного ориентирования.

Следует принять во внимание и тот факт, что по прошествии 5 лет выработкам свойственно за счёт релаксации восстанавливать НДС, поэтому при численном моделировании отработанные участки следует задавать материалом с физическими свойствами, изменяющимися в зависимости от времени отработки. Время отработки учитывают экспериментально. В случае, если массив проявляет реономные свойства, увеличивают масштаб скорости изменения времени (задаётся через форму дифференциальных уравнений). Если выработки пройдены относительно недавно (поправка в 5 лет), масштаб скорости изменения времени увеличивают. При этом учитывают влияние элемента, отработанного ранее, на последующие элементы, что позволяет определить влияние нависающей консоли в целом. В данной диссертационной работе такой учёт времени не производился, однако, автором рассматривается при постановке и моделировании будущих задач.

2.5 Постановка и решение тестовых задач

Тектоника, горизонтальные составляющие напряжений и технология в различных задачах имели место в моделях при оценке напряжённо-деформированного состояния, отображены в научной литературе и подтверждены натурными исследованиями. Для обоснования достоверности предлагаемой математической модели следует сравнить результаты, полученные с применением предлагаемой модели с уже известными. Перечисленные факторы и их влияние на напряжённо-деформированное

состояние массива рассмотрены ниже (для каждого в отдельности) на примере тестовых задач.

При выборе решений для тестовых задач выполнены следующие условия:

- их авторы имеют значительный научный опыт, на их результаты ссылаются другие исследователи, основополагающие идеи отражены в работах логично и аргументировано и не противоречат общим научным законам;

- в каждой из публикаций учтён один аспект, способный привести к риску аварий и инцидентов. Подробно взаимовлияние факторов, то есть то, что позволит решать комплекс задач горного производства в практических целях, отображены в 3-ей главе;

- собственные решения (для сравнения) осуществляем с применением разработанной математической модели; физические свойства горных пород, указанные в статьях, задаём аналогично представленным в разделе 2.3.

Выделим те решения, которые позволяют определить технологическое влияние. Большое количество работ посвящено описанию процессов в зонах ослабления, представленных околывыработочным пространством. Проще всего НДС массива оценить на контурах выработок. Поскольку на шахтах АО «Воркутауголь» они в основном представлены сводчатым сечением, существенно рассмотреть задачу, отображённую в работе [105].

В статье авторы предлагают математический алгоритм и на основании его приводят решение на примере трёх параллельно расположенных выработок. Такой подход позволит оценить не только распределение параметров вдоль контура отдельной выработки, но и с учётом взаимовлияния выработок друг на друга. На рисунке 2.5 представлена расчётная схема с нанесёнными размерами. Все три выработки, представленные на ней, геометрически идентичны друг другу.

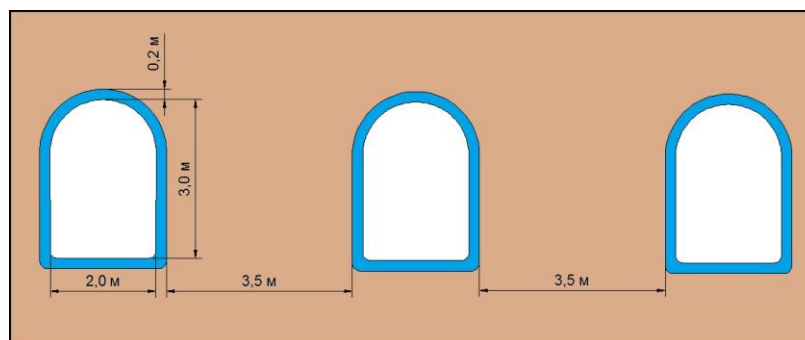


Рисунок 2.5 – Расчётная схема для оценки взаимовлияния соседних выработок

В качестве исходных параметров, необходимых для расчётов, приняты физические свойства пород, слагающих массив, и материала поддерживающей крепи: модуль Юнга $E_0 = 9000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,25$; $E_j = 30\,000$ МПа, $\nu_j = 0,2$ ($j = 1, 2, 3$) соответственно. При этом авторами рассматриваемой работы сделано допущение, что выработки пройдены в одно и то же время, а поддерживающие конструкции расположены на забое без отставания.

Параметр, по которому осуществляется сравнение, – значения изгибающих моментов (МН·м), приводящих к искривлению секций крепи.

Обоснованное в статье численное решение в виде распределения эпюр по контуру выработки представлено на рисунке 2.6. Пунктирной линией отображены значения для одиночной выработки, сплошной – с учётом взаимовлияния.

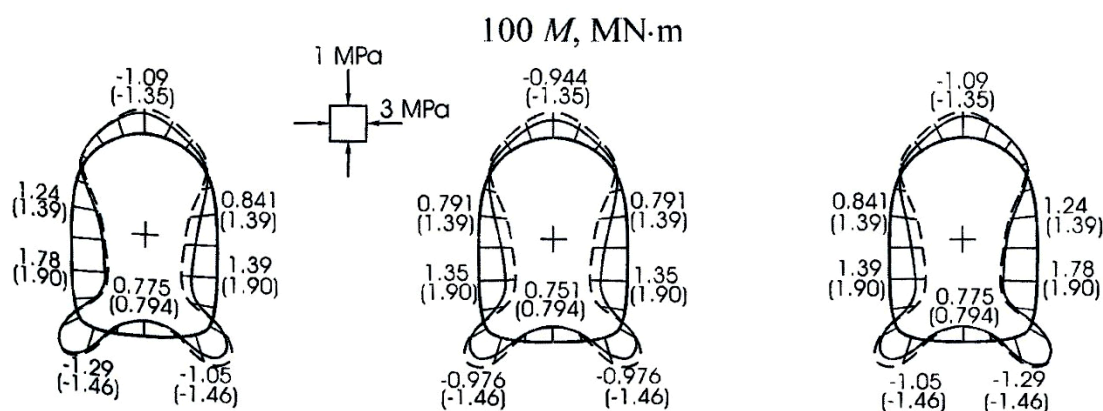


Рисунок 2.6 – Эпюры изгибающих моментов по контуру выработки

Максимальные сжимающие (отрицательные) напряжения приходятся на углы поддерживающего внутреннего контура, растягивающие напряжения наблюдаются на боках. Влияние соседних выработок приводит к уменьшению растягивающих и сжимающих напряжений по контуру выработки.

В результатах компьютерной модели настоящей задачи получаем распределение, отображённое на рисунке 2.7. Здесь знаки изгибающих моментов (соответственно, сжимающих и растягивающих напряжений) приведены в соответствие со сравниваемой работой.

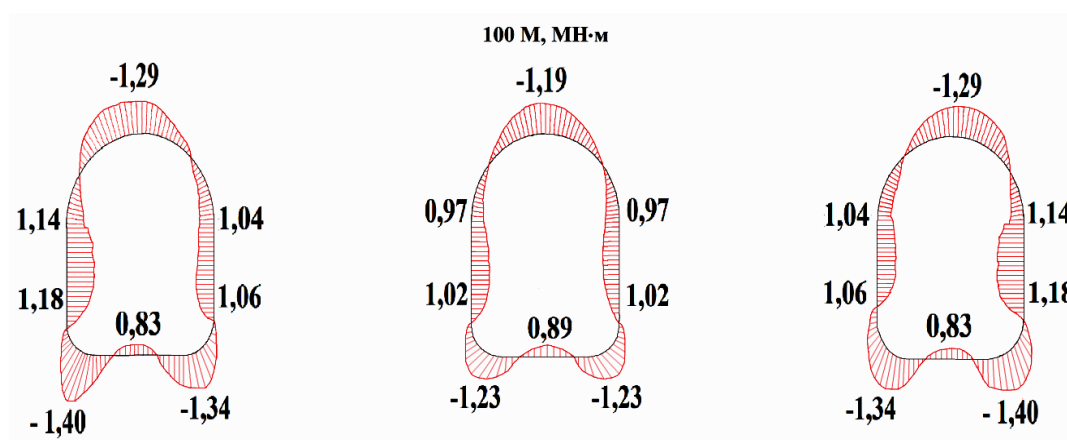


Рисунок 2.7 – Эпюры распределения изгибающих моментов. Результаты компьютерного моделирования (по разработанной математической модели)

Эпюры, отображённые на рисунке 2.7, и эпюры на рисунке 2.6 показывают общую закономерность качественного распределения. При этом в модели уплотняющегося массива преимущественно увеличиваются сжимающие и уменьшаются растягивающие напряжения. Тем не менее, для средней выработки наблюдается увеличение растягивающих напряжений в верхней части и со стороны почвы. Это указывает на дополнительный вклад модели уплотняющегося массива в напряжённое состояние выработок в соответствующих частях крепи.

Задача в работе [105] была решена аналитическим способом без учёта поправочных и эмпирических коэффициентов, отражающих реальные физические свойства исследуемого объекта. Следующие задачи опираются на результаты измерений.

В работе [45] представлено решение, позволяющее оценить действие горизонтальных (тектонических) сил. Действие этих сил обусловлено влиянием литологических плит, которые изображены на рисунке 2.8.

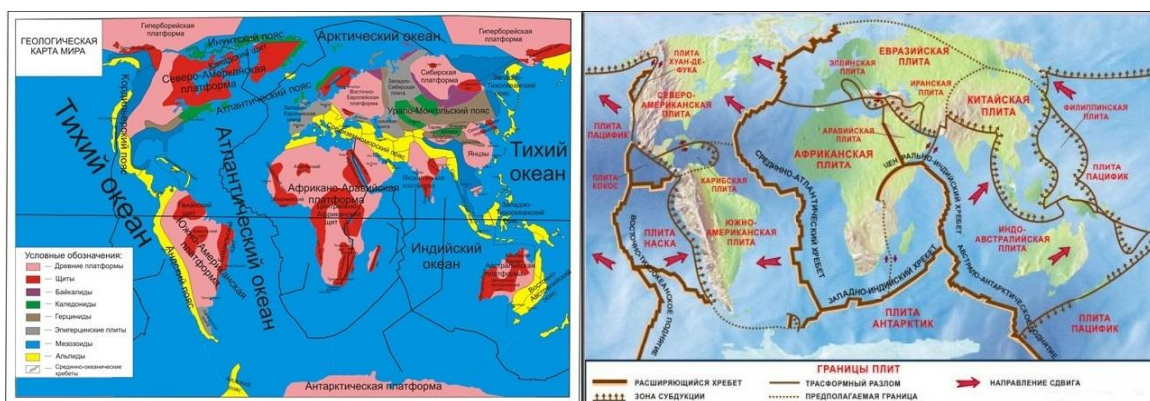


Рисунок 2.8 – Действие горизонтальных тектонических сил

В решении авторы принимают условные понятия «малозаглубленные» и «заглубленные» очистные пространства. Такие определения не характеризуют фактическую глубину разработки, а подразумевают отношение мощности вышележащих пород H к длине пролёта выработки B . По мнению авторов, когда показатель $H/B > 50$, дневная поверхность перестаёт существенно сказываться на характере значений напряжений. Выработки, подчиняющиеся этому условию, считают заглубленными.

Напряжённно-деформированное состояние рассмотрено с применением плоских моделей. Соблюдено геометрическое и силовое подобие моделей. Геометрический масштаб моделирования 1:10 000. Линии равных напряжений вокруг очистных выработок изучали отдельно при действии тектонических (T) и гравитационных (γH) сил.

На рисунках 2.9 и 2.11 представлены полученные результаты линий равных напряжений для моделей с одним прямоугольным очистным пространством. Линии равных напряжений σ_x/T и σ_y/T , а также $\sigma_x/\gamma H$ и $\sigma_y/\gamma H$ определены при условии $H/B = 67$ и $B/h = 6,2$.

На рисунках 2.10 и 2.12 представлены аналогичные решения, выполненные в настоящей работе посредством компьютерного моделирования с применением разработанной математической модели.

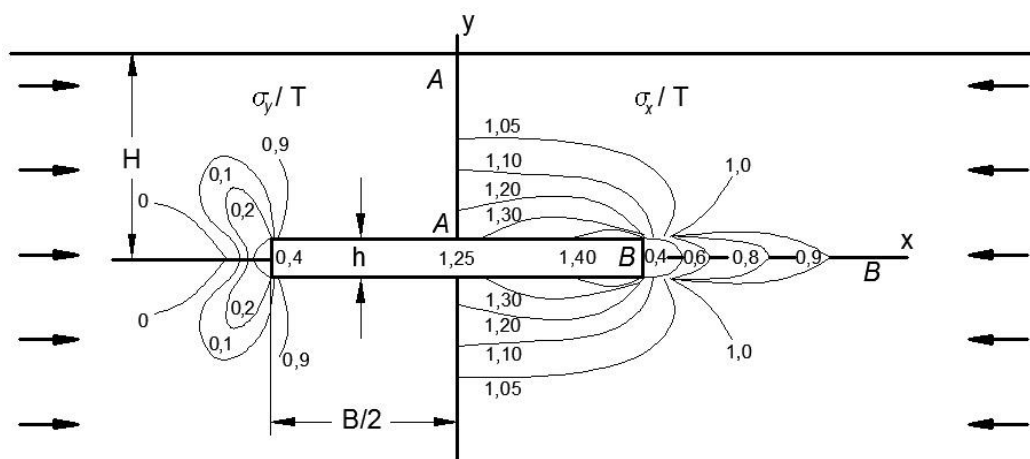


Рисунок 2.9 – Линии равных напряжений под действием горизонтальных сил T (по И.А. Турчанинову, Г.А. Маркову)

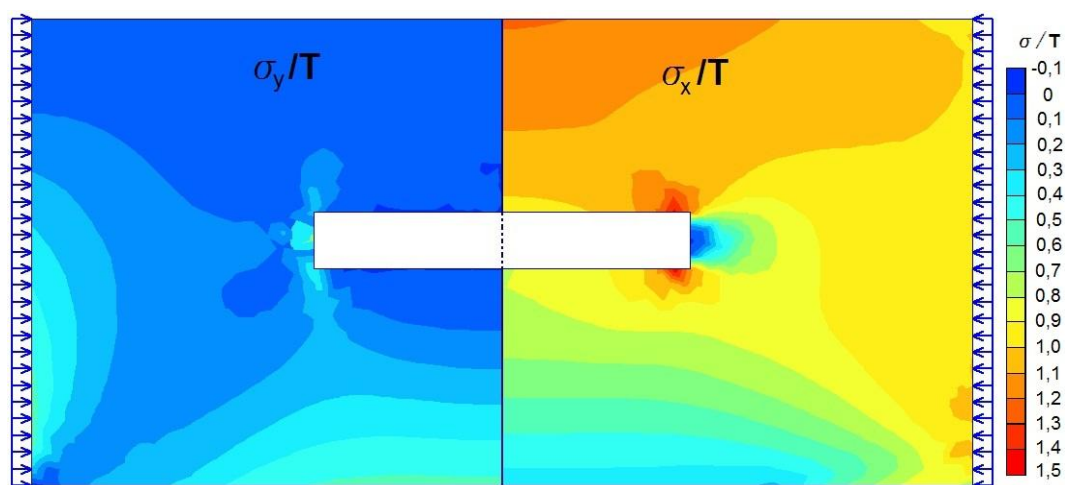


Рисунок 2.10 – Линии равных напряжений под действием горизонтальных сил T (с применением модели уплотняющегося массива)

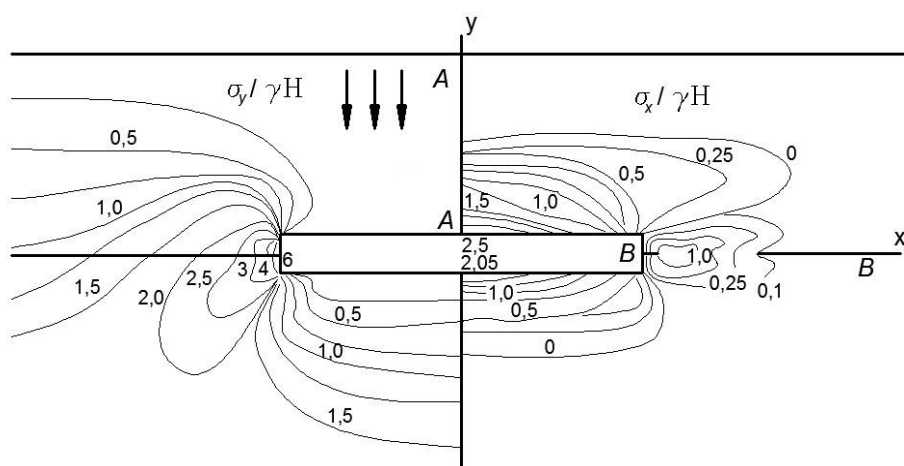


Рисунок 2.11 – Линии равных напряжений от действия гравитационных сил $P = \gamma H$ (по И.А. Турчанинову, Г.А. Маркову)

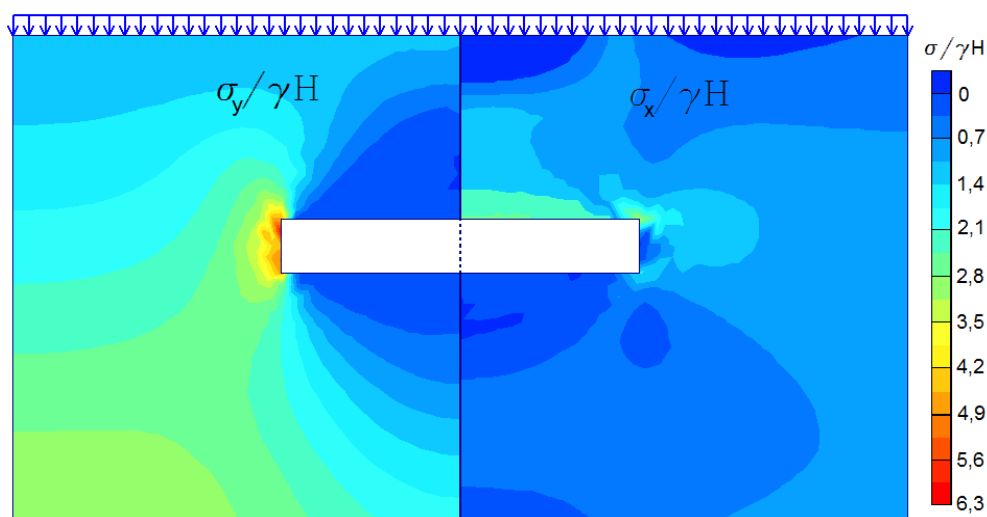


Рисунок 2.12 – Карта значений напряжений от действия гравитационных сил $P = \gamma H$ (с применением модели уплотняющегося массива)

Полученные в результате компьютерного моделирования значения сведены в таблицу 2.2, где l – мощность зоны растягивающих напряжений.

Таблица 2.2 – Полученные в результате решения данные ($H/B > 50$, $B/h = 6,2$)

Параметры	От действия горизонтальных сил		От действия гравитационных сил	
	σ / Т	l / h	σ / γ Н	l / h
Сечение А-А				
σ_x	1,2	0,26	2,69	0
	1,1	1,43	1,54	0,57
			0,95	2,05
	1,2	3,26	0,75	2,2
			0	2,60
σ_y	-	-	0	0,85
			0,20	1,62
			0,33	2,53
Сечение В-В				
σ_x	0,3	0,43	0,31	0,18
	0,5	0,78	0,62	0,74
	0,8	1,52	0,62	0,85
	0,9	2,26	0,31	3,52
σ_y	0,7	0	5,77	0
			5	0,20
	0,2	0,61	3,85	0,40
			3,08	0,85
	0,1	0,87	2,49	1,20
			2,12	2,10

На основании табличных данных построены графики безразмерных напряжений от отношения l/h . Пунктирной и сплошной чёрной линиями

обозначены результаты экспериментальных наблюдений и аналитических расчётов соответственно [85], красной – данные, полученные в результате численного моделирования с применением разработанной математической модели.

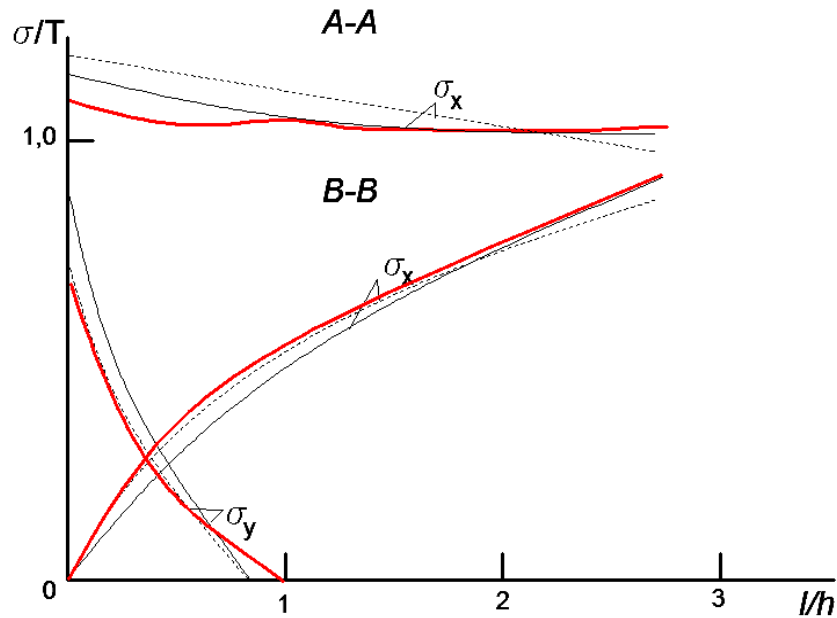
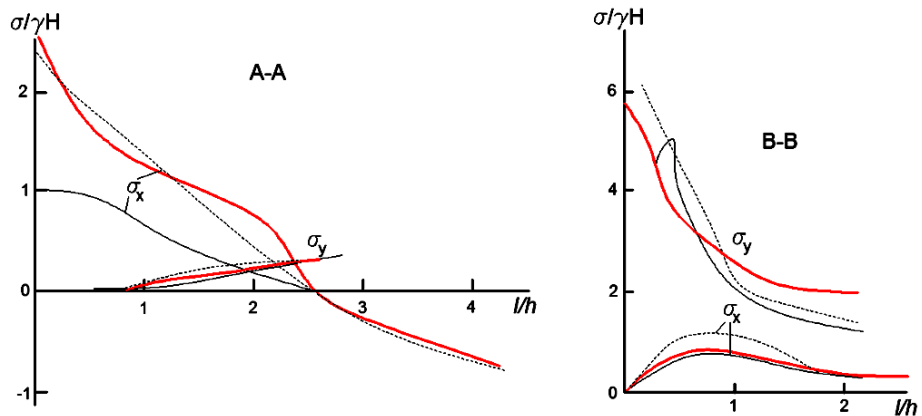


Рисунок 2.13 – Линии равных отношений σ_x/T и σ_y/T



- – данные экспериментальных наблюдений
- – данные расчётов И. А. Турчанинова и Г. К. Макарова
- – результаты расчётов по разработанной математической модели

Рисунок 2.14 – Линии равных отношений $\sigma_x/\gamma H$ и $\sigma_y/\gamma H$

На графиках 2.13 и 2.14 наблюдается положительная сходимость полученных значений с результатами экспериментальных наблюдений. σ/T

на разрезе В-В и $\sigma/\gamma H$ на разрезе А-А с применением предлагаемого метода ближе к экспериментальным, в том случае, когда σ/T на А-А и $\sigma/\gamma H$ на В-В практически совпадают с аналитическими расчётами в изученной публикации. Если сечение проходит в направлении действия сил (тектонических или гравитационных), то расчёты с применением разработанной модели стремятся к экспериментальным значениям. Если сечение проходит в направлении перпендикулярном действию сил (тектонических или гравитационных), то расчёты с применением разработанной математической модели стремятся к аналитическим. Это позволяет говорить о большей точности задач (точность повышается на 20%), осуществляемых с применением предлагаемого метода. Оценка величины отклонения результатов, полученных по разработанной модели, от экспериментальных данных, не превышает 10 %. Положительная сходимость с результатами экспериментов подтверждает обоснованность предлагаемой математической модели для учёта тектонических сил.

Решая в горизонтальном сечении задачи численными методами, при вводе данных уделяют внимание вводу граничных условий. Ускорение свободного падения g в этом случае следует приравнивать нулю. В доказательство сказанного приведены примеры решения с применением разработанной математической модели. Получено НДС вблизи одиночного разлома и при совместном влиянии двух нарушений с учётом горизонтальных тектонических составляющих горного давления. В работе [48] отражены результаты, полученные в GEODYN.

Там же дано три задачи:

Задача 1. $\sigma_{yy} = 50$ МПа, $\sigma_{xx} = 20$ МПа. Модуль Юнга пород вмещающего массива $E_1 = 8 \cdot 10^5$ МПа, Модуль Юнга материала разлома $E_2 = 1 \cdot 10^2$ МПа; коэффициент Пуассона пород вмещающего массива $\mu_1 = 0,22$, коэффициент Пуассона материала разлома $\mu_2 = 0,15$. Размеры области 2000 м, координаты границ разлома $\{x_1 = 700, y_1 = 700\}$, $\{x_2 = 1300, y_2 = 1300\}$.

Задача 2. $\sigma_{yy} = 20$ МПа, $\sigma_{xx} = 50$ МПа. Модуль Юнга E_1 , E_2 и коэффициент Пуассона μ_1 , μ_2 , размеры области и координаты разлома – те же.

Задача 3. $\sigma_{yy} = 40$ МПа, $\sigma_{xx} = 40$ МПа. Модуль Юнга E_1 , E_2 и коэффициент Пуассона μ_1 , μ_2 , размеры области и координаты разлома 1 – те же. Появляется второй разлом 2 с координатами $\{x_3 = 1450, y_3 = 1250\}$, $\{x_4 = 1800, y_4 = 400\}$.

Физические свойства нарушения соответствуют заполнителю между плитами дизъюнктива, который представляет собой материал, образовавшийся за счёт трения крыльев сместителя. Расстояние между крыльями сместителя варьируется согласно плану горных работ. Величина сцепления подобрана на основании экспериментальных данных, отражаемых в технической документации.

На рисунках 2.15, 2.16 и 2.17 показаны решения каждой из задач.

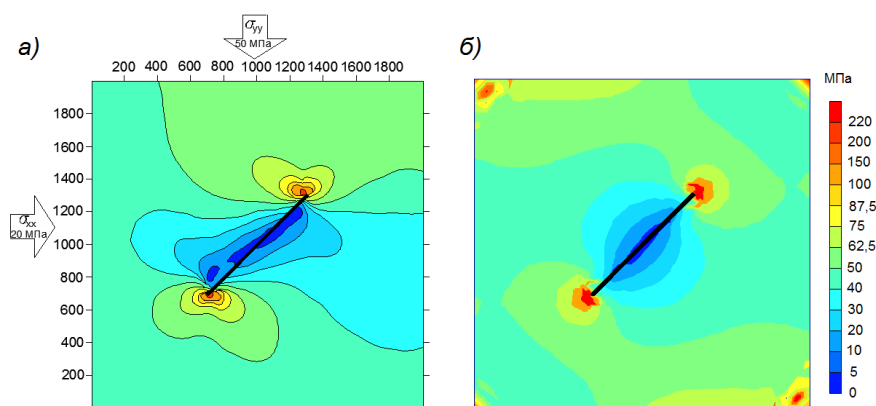


Рисунок 2.15 – Линии равных напряжений в районе одиночного разлома

$$\sigma_{xx} = 20 \text{ МПа}, \sigma_{yy} = 50 \text{ МПа}$$

а) – решение в GEODYN (ГЦ РАН), б) – решение с применением разработанной математической модели

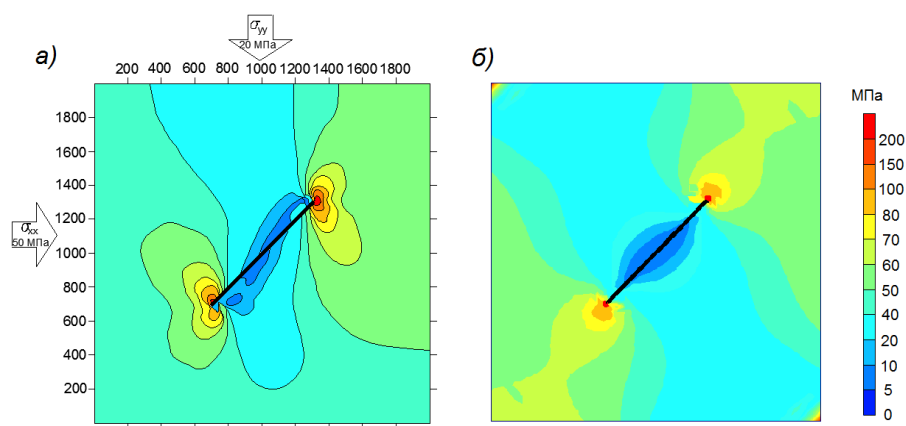


Рисунок 2.16 – Линии равных напряжений в районе одиночного разлома

$$\sigma_{xx} = 50 \text{ МПа}, \sigma_{yy} = 20 \text{ МПа}$$

а) – решение в GEODYN (ГЦ РАН), б) – решение с применением разработанной математической модели

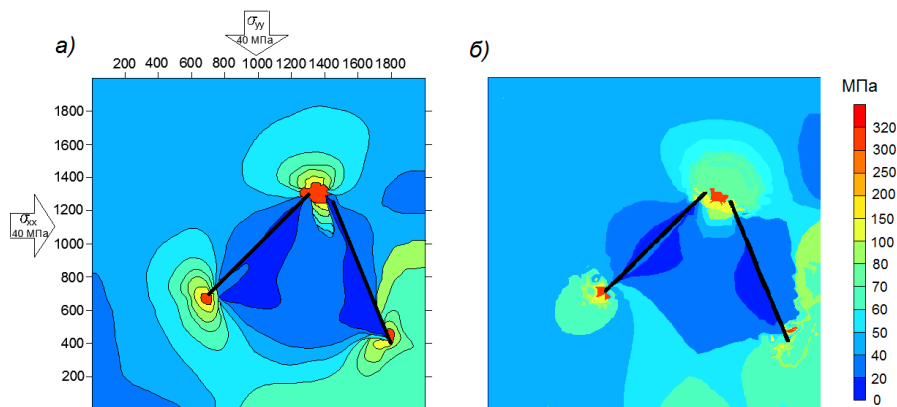


Рисунок 2.17 – Линии равных напряжений в районе двух близко расположенных разломов $\sigma_{xx} = 40 \text{ МПа}$, $\sigma_{yy} = 40 \text{ МПа}$

а) – решение в GEODYN (ГЦ РАН), б) – решение с применением разработанной математической модели

Результаты, полученные в GEODYN и в рамках тестовой задачи несколько разнятся, но, в целом, имеют количественную и качественную сходимость.

Верификация разработанной математической модели, проведенная для ряда контрольных задач, показала возможность ее применения для единовременного учета зоны ослабления: около выработанного пространства, вблизи геологических нарушений, а также места подверженные влиянию тектонических сил. Положительная сходимость с

результатами экспериментальных наблюдений и аналитическими решениями задач доказывают обоснованность предлагаемой модели.

Выводы по главе

1) На изменении напряжённо-деформированного состояния в угольном массиве сказывается: проведение выработок, наличие геологических нарушений, влияние тектонических сил. Разработана математическая модель уплотняющегося массива. Решение тестовых задач с применением данной модели и сопоставление их с задачами, решёнными в опубликованных работах, позволили оценить достоверность предлагаемых решений и подтвердили правильность позиций алгоритма.

2) Математическая модель уплотняющегося массива основывается на изменении и характере поведения физических свойств с глубиной. Как, например, сцепление C и угол внутреннего трения φ . При этом могут наблюдаться противоположные процессы: уплотнение и разрыхление в зависимости от действующих сил (сжимающие или сдвиговые). Деформационные свойства необходимо принимать в диапазоне разброса физических свойств.

3) Обнаружена достаточная сходимость для прогноза горных ударов с учётом каждого рассмотренного в этой главе фактора. Для применения на практике необходимо проводить комплексное изучение факторов, способных оказать влияние на напряжённо-деформированное состояние массива.

4) Выявленные несоответствия при сравнении решённых ранее задач и предлагаемых в настоящей работе объясняется различными подходами к моделированию. В случае наличия выработок на контуре (крепь) в модели уплотняющегося массива преимущественно увеличиваются сжимающие и уменьшаются растягивающие напряжения. Следует учитывать дополнительный вклад модели уплотняющегося массива на величину изгибающего момента в соответствующих частях крепи.

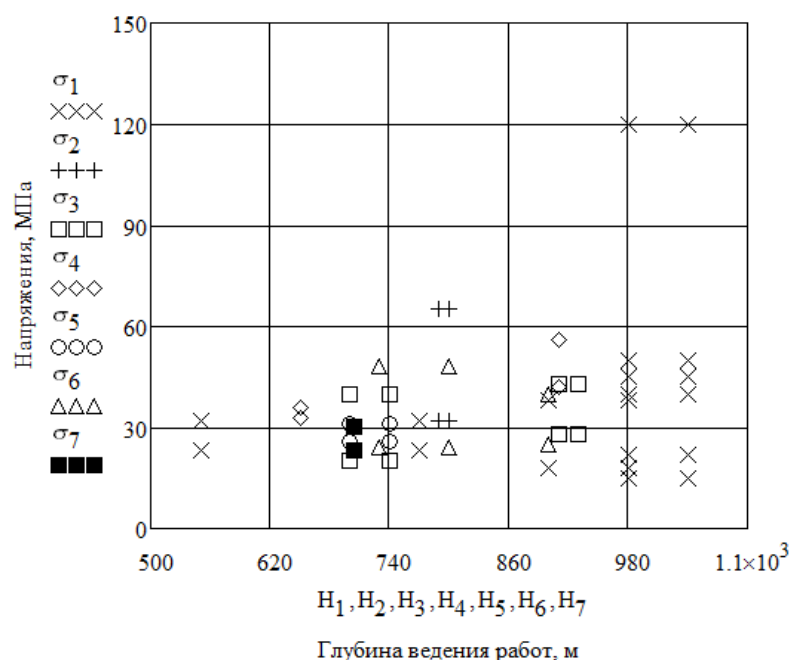
5) В случае учёта тектонических и гравитационных сил проявляется следующая закономерность. Если сечение, по которым определяют безразмерные напряжения (σ/T , $\sigma/\gamma H$) проходит в направлении действия сил (тектонических или гравитационных), то расчёты с применением разработанной модели стремятся к экспериментальным значениям. Если сечение проходит в направлении перпендикулярном действию сил (тектонических или гравитационных), то расчёты с применением разработанной математической модели стремятся к аналитическим. При совместном учёте гравитационных и тектонических сил точность решения приближается к экспериментальным. Точность повышается на 20 % при отклонении результатов, полученных по разработанной модели, не превышающих 10 %. Положительная сходимость с результатами экспериментов подтверждает обоснованность предлагаемой математической модели для учёта тектонических сил.

6) Решения задач для учёта влияния нарушений на напряжённо-деформированное состояние с применением математической модели также имеет положительную сходимость.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ РАБОТ НА ВОРКУТСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

3.1 НДС массива и динамическая характеристика угольных месторождений г. Воркуты

На рисунке 3.1 представлены обобщённые значения напряжений для угольных шахт Воркутского месторождения по данным результатов натурных измерений в зависимости от глубины ведения работ (техническая документация АО «Воркутауголь»). Значения определены по пластам Мощному и Четвёртому.



Нижние индексы и соответствующие им символы обозначают шахты:
 1 – ш. Комсомольская, 2 – ш. Промышленная, 3 – ш. Центральная, 4 – Юр-Шор, 5 – ш. Северная, 6 – ш. Воркутинская, 7 – ш. Заполярная

Рисунок 3.1 – Изменение напряжений с глубиной разработки (по усреднённым результатам натурных измерений НДС массива на шахтах Воркутского месторождения – данные АО «Воркутауголь»)

Рис. 3 показывает, что при росте величины напряжений с глубиной наблюдается больший разброс значений. Такой разброс говорит о различных

горно-геологических условиях, об изменчивости физических свойств с глубиной. В этом случае подтверждается необходимость оценки НДС массива с учётом диапазона принимаемых физических свойств.

Разработка угольных пластов Воркутского месторождения осложнена геодинамическими условиями. О том, что геологические нарушения, зоны высокой литологической изменчивости, действующие в этих зонах современные активные поля напряжений влияют на формирование отдельных участков с аномально высокими напряжениями и усугубляют отработку мульды, неоднократно отмечают в технической документации, докладывают на научных симпозиумах, указывают в паспортах на ведение горных работ.

Естественные поля напряжений во взаимодействии с техногенными при несвоевременном или неточном анализе технологического планирования горных работ являются триггером для ДЯ. Геодинамическую безопасность на определённом участке ведения работ должны гарантировать прогнозные значения в зонах повышенных напряжений, соблюдение оптимальных размеров целиков. Напряжения выделяют естественные – а) девиаторные, б) возникающие за счёт действия дилатансии, в) вызванные влиянием тектонических горизонтальных составляющих напряжений как от действия литологических плит, так и определяемых по А.Н. Диннику [21], а также гравитационные составляющие – и техногенные, изменяющие поля перечисленных напряжений в результате проведения выработок [1, 41]. Их следует определить численными методами в тектонически напряжённых зонах (ТНЗ).

Значительные по своим масштабам дизъюнктивные нарушения делят массив на блоки. АО «ВНИМИ» было выделено 12 ТНЗ, к которым относят области вблизи геологических нарушений, а согласно ПечорНИИПроект – также зоны, создаваемые естественными напряжениями, около линий расщепления угольных пластов, которые в целом в границах месторождения распространяются на десятки км.

Экспериментальные исследования НДС массива, осуществляемые службами АО «Воркутауголь», до проведения подготовительных и очистных работ показали, что в субширотном и меридиальном направлениях проявлялись, в основном, сжимающие напряжения. Также установлены максимальные горизонтальные напряжения в субширотном направлении – 1,2-1,8 μH , в меридиональном – в интервале 0,7-1,3 μH .

В зонах пригрузки на расстоянии 0,2-0,3 H от фронта очистных работ напряжения достигают значений 1,6-2,0 μH , в ТНЗ – 2,4-4,8 μH .

3.2 НДС массива, создаваемое влиянием геологических нарушений

3.2.1 Напряжения в нетронутом массиве под действием тектонических сил в условиях геологической нарушенности

Для обеспечения безопасности подземных работ стоит оценить направление выработок в плане относительно господствующих систем структурных неоднородностей, что в дальнейшем позволит осуществлять прогноз потенциально опасных по горным ударам зон.

Сравнивая решения при различных положениях выработок, выбирают вариант с наименьшим напряжённым состоянием. На положение выработок на начальных стадиях работ влияет величина и ориентация тектонических горизонтальных составляющих горного давления, форма геологических разломов. Ориентация в пространстве геологических разломов сказывается на напряжённом состоянии массива.

В технической документации [5, 27, 28, 31, 46, 60, 81] содержится обобщённый материал, применяемый при отработке угольных пластов. В перечисленных источниках даётся описание натурных измерений. В основном, для оценки горизонтальной составляющей горного давления применяют знания о сдвигении земной поверхности и подрабатываемого массива. Данные получают, снимая показания с глубинных реперов. Реперы располагают на участках месторождения с различающимися горно-

геологическими условиями. Методология определения горизонтальной составляющей прямыми измерениями к настоящему времени отсутствует, поскольку не производят учёт взаимного смещения слоёв на границе «вмещающие горные породы / угольный пласт». Применяемые геофизические методы [4, 17, 30] не достигают необходимых условий точности.

Известная модель Минстера-Джордана [120], которая рассматривает процессы движения литосферных плит (рисунок 2.8), в настоящее время дополнена космогеодезическими наблюдениями. Согласно модели наблюдают скопление плит в направлении к поясам субдукции: I группа – Африканская, Евразийская, Австралийская, Западно-Тихоокеанская плиты; II группа – Американские, Гренландская и Восточно-Тихоокеанская, III группа – Антарктическая плита и плиты областей, расположенных с юга Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Движение плит и платформ оказывают влияние на сейсмичность, вызывают землетрясения; часть энергии переходит и на участки, в пределах которых располагаются шахтные поля.

Решение задач «от общего к частному» методологически затруднено. Направление и величину горизонтальных напряжений следует определять через решение обратной задачи. Её суть заключается в том, что в качестве геометрической модели выбирается 2D плоскость в горизонтальном сечении (в плоскости угольного пласта). Далее наносятся геологические нарушения, задаются физические свойства угля и горных пород, характеризующие состояние уплотняющегося массива и предельные значения напряженного состояния, выбираются соответствующие граничные условия. При определении граничных условий учитывается, что на пласт действует горное давление γH вышележащей толщи. Рассмотрен район действия нарушений Ж-Л, Л, Е₂, Д-Е, Д-Е₃, Д₁, Д₂ на шахте «Комсомольская». Тектонически напряжённые зоны, получаемые при решении обратной задачи, сопоставляются с зонами, рассчитанными в АО «ВНИМИ» (рис. 3.2). На рис.

3.2, взятом из технической документации АО «Воркутауголь», геологические нарушения представлены схематически. Геометрия нарушений для реализации компьютерных моделей НДС массива была уточнена по маркшейдерским планам горных работ. На рисунке 3.3 представлена расчётная схема.

Эпицентры очагов произошедших горных ударов определяются по планам горных работ. Впоследствии точки, соответствующие эпицентрам очагов горных ударов, будут применяться при оценке рассчитываемых в них напряжений. Решение сводится к нескольким задачам с различными направлениями горизонтальных составляющих напряжений. Величина тектонических сил определяется предварительно путём анализа технической документации (экспериментальные исследования НДС массива, указанные в разделе 3.1) и сравнения с задачами, решаемыми в вертикальных сечениях (по примеру задач на рис. 3.5, 3.6). Изменяя направления максимальных горизонтальных тектонических составляющих, необходимо добиться такой ориентации тектонически напряжённых зон относительно нарушений, при которой бы максимальные горизонтальные напряжения совпадали с реализованными динамическими явлениями (рис. 3.4). В качестве границ наиболее тектонически напряжённых зон для численной модели приняты значения отношений максимальных горизонтальных напряжений к γ_H , исходя из выводов, полученных в подразделе 3.1. Найденное направление тектонических сил переносится в расчётную схему (рис. 3.3). Сравнение полученного напряжения с результатами АО «ВНИМИ» (рис. 3.2) показывает, что направления, полученные решением обратной задачи, совпадают.

Подход с расчётом начального поля напряжений под действием тектонических сил и от геологических нарушений обусловлен представлениями о дилатансии. Изменение напряжений в зависимости от уплотнения/разуплотнения можно оценить, пользуясь параметром Надаи-Лоде (рис. 3.11, 3.12, 3.13, формула 3.3). За счёт дилатансии происходит

увеличение объёма, но поскольку горные породы и уголь находятся в уплотнённом состоянии, энергия, соответствующая этому увеличению, не находит выход. Она является потенциальной и проявляется в повышенных значениях начальных напряжений, таким образом, ещё до ведения горных работ образуется предельное напряжённое состояние. При проведении выработок, т.е. образовании свободной поверхности, эта энергия высвобождается в виде горных ударов.

Физические свойства угля и горных пород получают в лабораторных условиях. При отсутствии лабораторных данных путём анализа соответствующей литературы. Физические свойства, закладываемые в модель, были рассчитаны по методам, отраженным в учебнике И.В. Баклашова [7], а также предложенным M.D. Bolton [99] и Schanz T., Vermeer P.A. [125]. Полученные данные не противоречат Кадастру физических свойств горных пород, ссылающемуся на лабораторные исследования [83]. Часть физических свойств взята из Кадастра. Формулы к определению свойств представлены в разделе 2.3.

Модули деформаций, указанные в таблице 2.1, имеют тенденцию к росту с увеличением глубины. Также на изменение этих физических свойств оказывает влияние то, на какой стадии деформирования находится исследуемый материал массива, в том числе и от физики протекающих процессов – разгрузка, повторное нагружение или первоначальные нагрузки. Отсюда следует, что модель уплотняющегося массива учитывает ещё зависимость напряжений от модуля деформации. С ростом напряжений растут деформации, а все три введенные модуля деформации сказываются в формировании зон опорных напряжений

На рисунке 3.2 представлено изображение наиболее тектонически напряжённых зон, определённых АО «ВНИМИ», на рисунке 3.4 – результаты выполненного решения обратной задачи. Для решения обратной задачи физические свойства закладывались как усреднённые из диапазона разброса их значений, указанных в табл. 2.1.

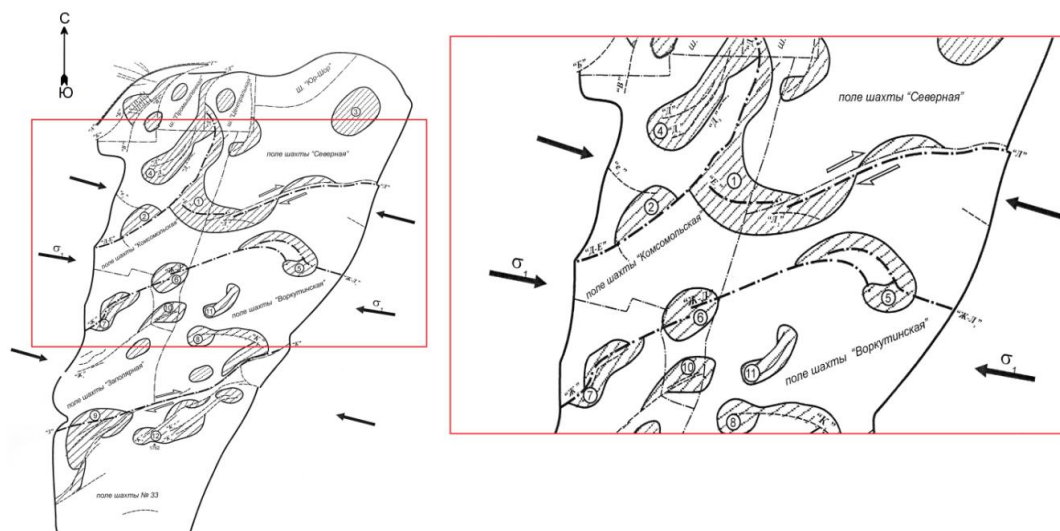
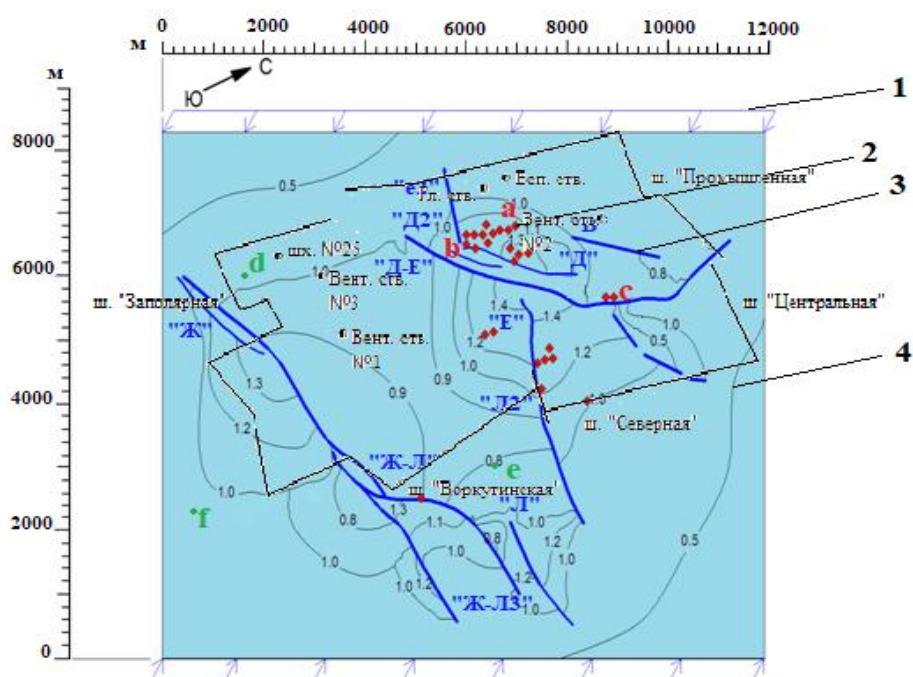


Рисунок 3.2 – Тектонически напряжённые зоны, определённые АО «ВНИМИ»

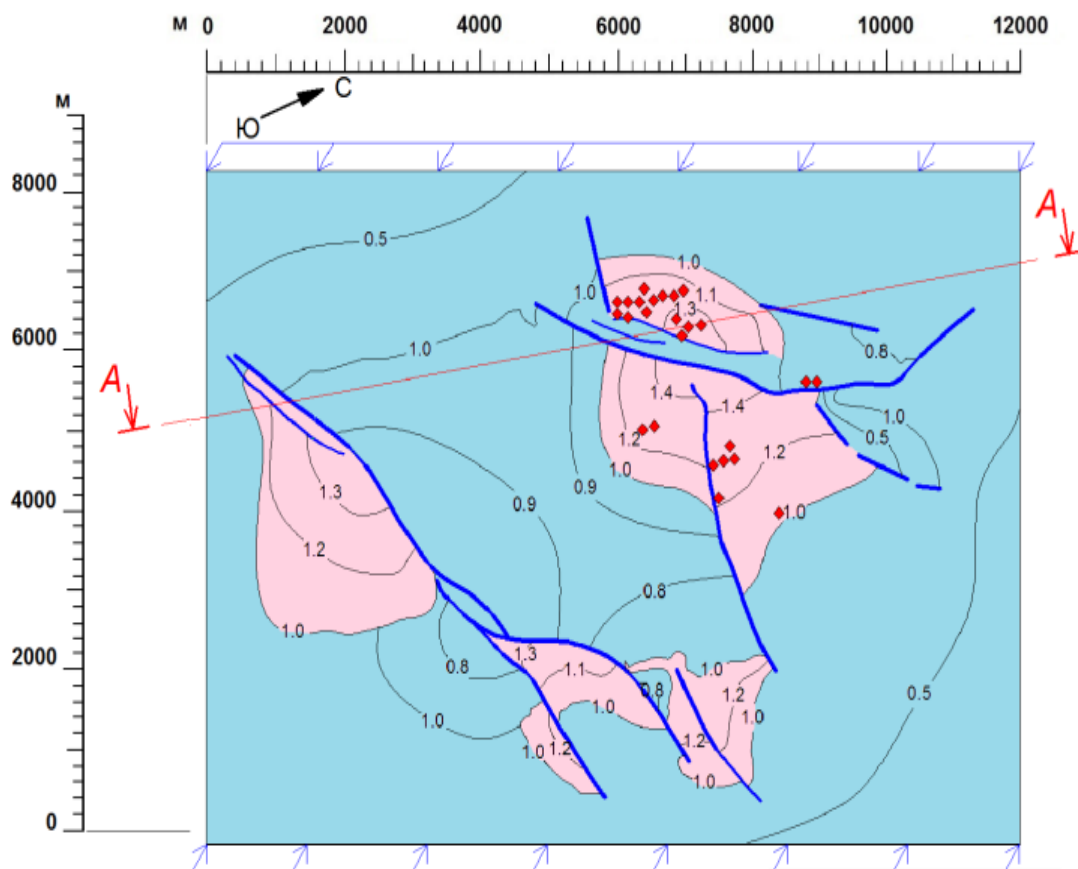


✚ – выбранные точки моделируемого участка месторождения для иллюстрации вида многоугольников распределения (рис. 3.9)

◆ – точки, соответствующие эпицентрам очагов произошедших горных ударов

1 – направление действия тектонических горизонтальных напряжений, 2 – очаги произошедших горных ударов, 3 – дизъюнктивные нарушения, 4 – отношение горизонтальных напряжений к вертикальным

Рисунок 3.3 – Расчётная схема к постановке задач в горизонтальном сечении



- – зоны, в которых коэффициент перед γH превышает 1 (зоны пригрузки);
- – зоны, в которых коэффициент ниже 1 (зоны разгрузки);
- ◆ – точки, соответствующие эпицентрам очагов произошедших горных ударов

Рисунок 3.4 – Определение тектонических горизонтальных составляющих горного давления путём решения обратной задачи

Полученные направления горизонтальных составляющих принимаются за базовые, при помощи которых в дальнейших решениях осуществляется прогноз горных ударов.

Направление напряжений, определённое в результате компьютерного моделирования, совпадает с направлением, определённым АО «ВНИМИ». Различие наблюдается в пространственной ориентации тектонически напряжённых зон. Пригрузка возникает за счёт взаимодействия горизонтальных тектонических сил и геологических нарушений, в устьях которых имеются повышенные напряжения. Количественную оценку искомых напряжений, создаваемых горизонтальными силами, близкую к

реальным условиям, возможно получить, увеличивая действующую горизонтальную нагрузку в соответствии с решениями плоской задачи в плоскости в вертикальном сечении (изменение напряжений с глубиной). Такой подход к моделированию с определениями направлений горизонтальных напряжений позволит уточнить выводы, полученные А.С. Батугиным [10] на основе анализа стереограмм (рис. 1.7). Решение 2D задачи в плоскости в вертикальном сечении уточняет граничные условия. К значениям тектонических сил, принятым в обратной задаче, добавляется учёт напряжений по А.Н. Диннику. Силы, создаваемые за счёт бокового распора по теории А.Н. Динника, в вертикальном сечении определяются автоматически через соответствующие расчётные формулы. Последующие расчёты в горизонтальном сечении производятся с этой поправкой.

Вертикальное сечение проводится по линии А-А (рис. 3.4). Сечение А-А выбирается в направлении значительного количества реализовавшихся горных ударов и наибольшего числа геологических нарушений.

В зоне рассматриваемого шахтного поля отрабатывают два пласта Мощный ($n_{14+13+12+11}$) и Пятый (n_7), пласты имеют пологое залегание, средняя мощность соответственно 4,1 м и 0,9 м. В дальнейшем пласт Мощный разделяется на два пласта: Тройной ($n_{14+13+12}$) и Четвёртый (n_{11}). Средние мощности соответственно – 2,4 м; 1,5 м; а для Пятого – 1,0 м.

В модель внесены геологические нарушения, такие как: сбросы, взбросы, грабены, перегибы пласта, бифуркация.

В соответствии с известными аналитическими решениями задач геомеханики σ_x принимаем в качестве горизонтальных напряжений, σ_y – вертикальных (гравитационных). Установлено, что «распределение горизонтальных напряжений σ_x в основных чертах повторяет картину распределения вертикальных напряжений σ_y » [41].

Одним из условий ДЯ является наличие свободной поверхности, что свидетельствует о разрушении массива за счёт сдвиговых напряжений. Физически процесс этот объясняют действием касательных напряжений $\tau_{\max}$.

В проанализированных задачах в природных условиях взаимосвязь нормальных напряжений существенно не сказывается на НДС, действие касательных напряжений, сдерживающих рост нарушений, как отмечалось в подразделе 2.4.1, проявляется в большей степени.

На рисунке 3.5 показана карта значений касательных напряжений τ_{xy} в вертикальном сечении по линии А-А. На рисунке 3.6 показана карта значений нормальных напряжений σ_y в вертикальном сечении по линии А-А. Линия Б-Б – сечение в плоскости угольного пласта, позволяющее перейти к рисункам 3.3 и 3.4.

Судя по картам значений касательных и нормальных напряжений в вертикальном сечении можно отметить, что для численного метода моделирования МКЭ значения не существенно зависят от перепада высот и геометрии пласта Тройного ($n_{14+13+12}$). Пласт находится в зоне действия напряжений равных 31-38 МПа, что составляет 5-6 % от предела прочности песчаника на сжатие. На рис. 3.10 эта область для нетронутого угольного пласта так же соответствует виду напряжённого состояния обобщённого сжатия. Рассмотрение дальнейших задач производится в плоскости угольного пласта Тройного. При этом вводим допущения: 1) возможно не учитывать при расчётах вертикальную составляющую горного давления γH (она входит в граничные условия); 2) возможно не учитывать угол наклона рассматриваемого угольного пласта, перепады высот, бифуркацию и угол наклона геологических нарушений.

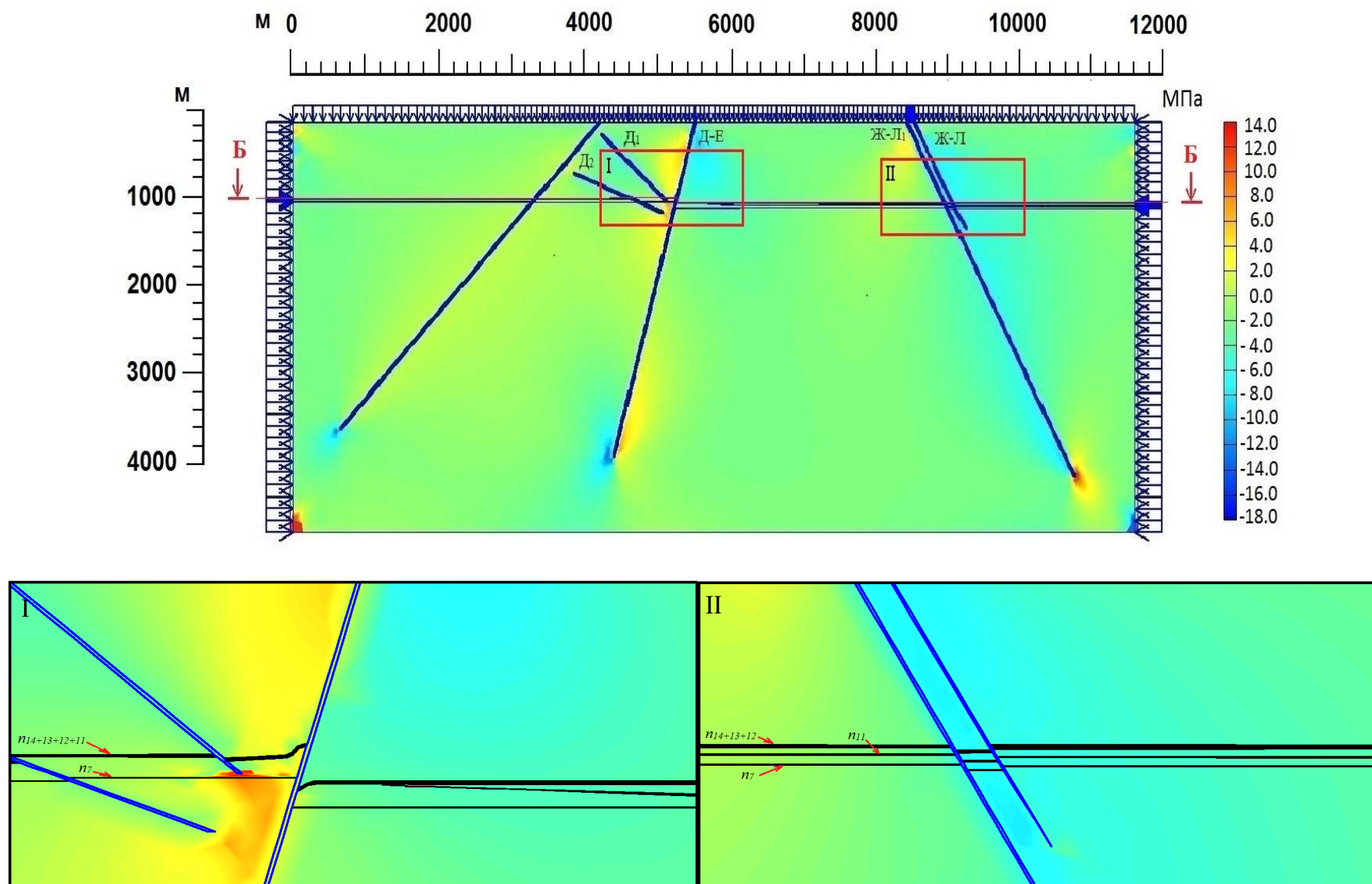


Рисунок 3.5 – Карта значений касательных напряжений с учётом геологической нарушенности

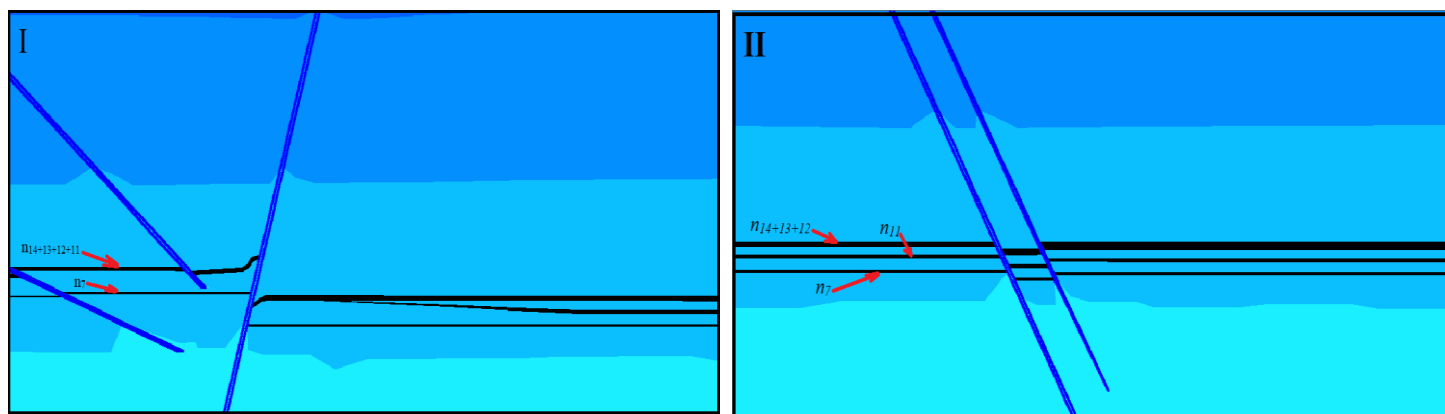
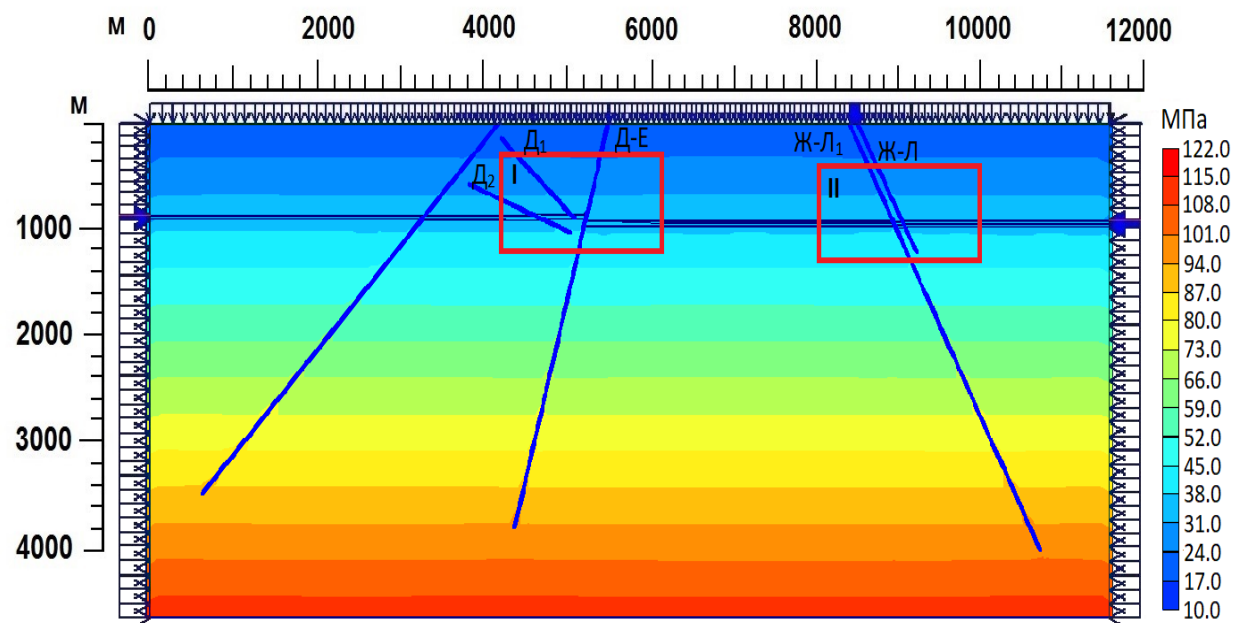


Рисунок 3.6 — Карта значений нормальных напряжений с учётом геологической нарушенности

Решения показывают, что состояние массива формируется с учётом природной тектоники ещё до проведения очистных выработок. Поэтому с точки зрения природы напряжений моделирование производят в два этапа: 1) I этап – определение начального НДС массива (тектоника, дилатансия) – исходное состояние, 2) II этап – определение напряжений от ведения горных работ. Сопоставление результатов II этапа с результатами I, позволило выявить физическую сущность рассматриваемого процесса, заключающуюся в изменении (перераспределении) напряжений, формировании зон, в которых сказываются разгрузка или дополнительная нагрузка. Такую оценку возможно произвести при сопоставлении карт значений удельной потенциальной энергии в нетронутом угольном пласте и карт значений удельной потенциальной энергии при наличии выработок, пройденных в различных направлениях.

В зависимости от горно-геологических условий и физических свойств пород, слагающих массив, и полезного ископаемого горизонтальные составляющие, совпадают с данными, указанными в технической документации дирекции АО «Воркутауголь». Полученные значения находятся в диапазоне $1,3 \gamma H - 1,8 \gamma H$.

3.2.2 Удельная потенциальная энергия в нетронутом массиве под действием тектонических сил в условиях геологической нарушенности

Значения проекций напряжений для горизонтального сечения пересчитаны в главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и получена карта значений удельной потенциальной энергии с применением формул 3.1 и 3.2. Все дальнейшие расчёты произведены в программной среде MathCad.

Плотность (удельная) потенциальной энергии W определяется:

$$W = \frac{\bar{\sigma}^2}{2E}, \quad (3.1)$$

где $\bar{\sigma}$ - среднее значение наибольшего нормального напряжения в очаге горного удара;

E – модуль Юнга.

С учётом в объёме горных ударов не только зоны разгрузки, но и зоны разрушения, рекомендована формула:

$$W = 0,7 \frac{\bar{\sigma}^{-2}}{E}. \quad (3.2)$$

Эти формулы рекомендованы для работы на сейсмостанциях.

В верхней части рисунка 3.7 показан результат расчёта с расплывчатыми границами, объединяющий решения 200 задач, отдельно каждая задача на примере карты значений максимального главного напряжения представлена в «Приложении 1» к диссертационной работе. Задачи выполнены со значениями различных модулей деформации и коэффициентов Пуассона из диапазона разброса значений физических свойств, генерируемых через равномерное случайное распределение. В качестве $\bar{\sigma}$ в формуле (3.2) принято максимальное главное напряжение. Цветом обозначены значения удельной потенциальной энергии, которая изменяется в диапазоне от 10 до 150 кДж/м³.

В нижней части рисунка 3.7 представлено решение отдельной частной задачи, на которой отмечено изменение удельной потенциальной энергии в окрестности геологических нарушений.

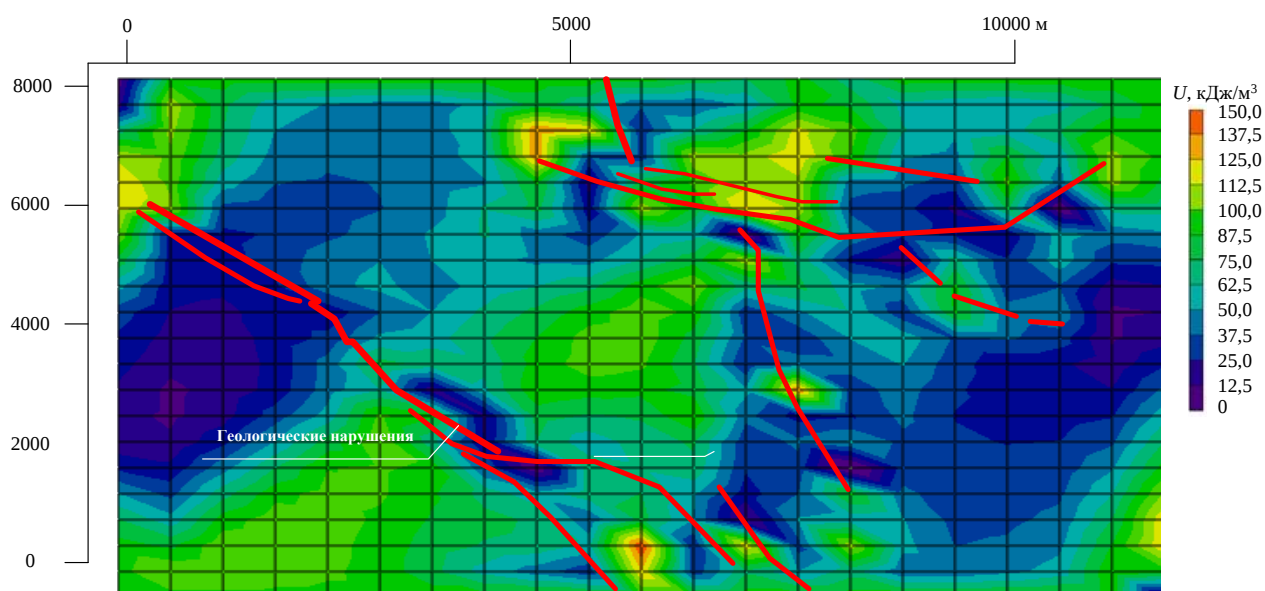
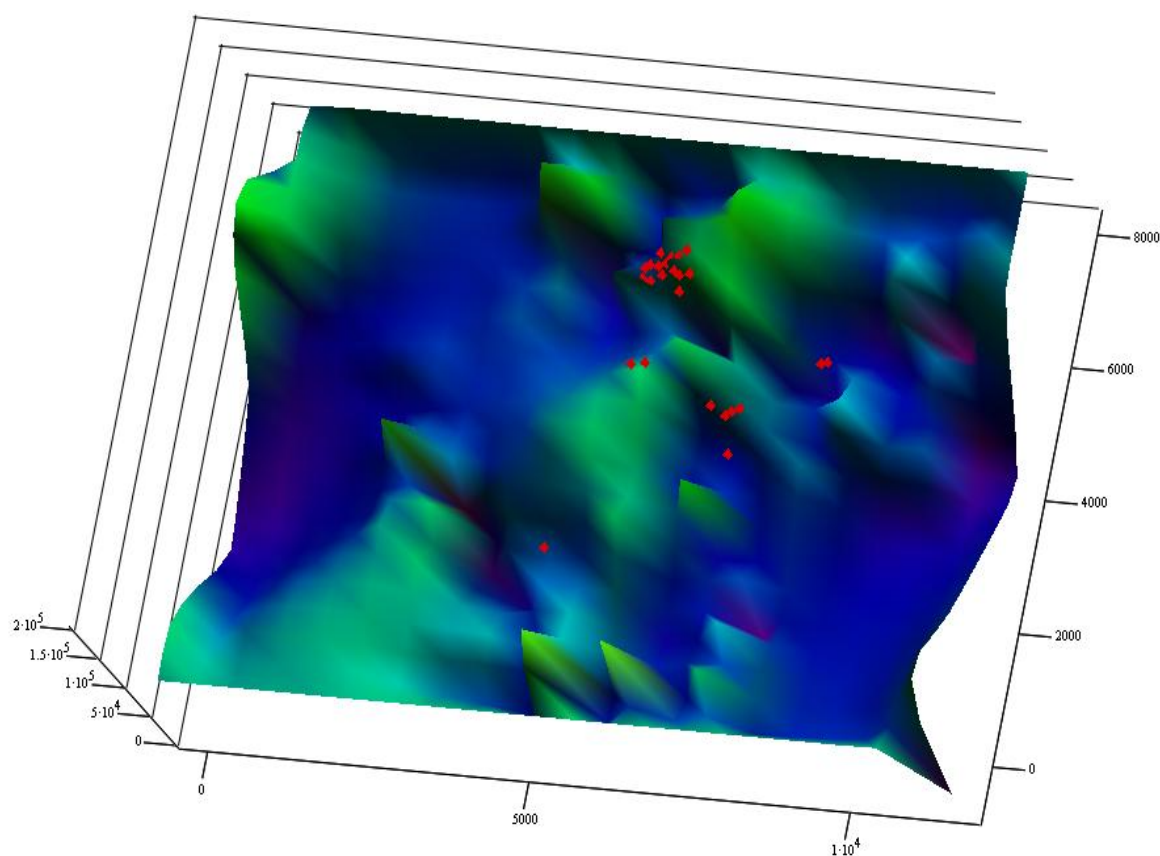


Рисунок 3.7 – Карта значений удельной потенциальной энергии

Полученные карты значений удельной потенциальной энергии согласуется с данными шахтных наблюдений на сеймостанции. На рисунке 3.8 представлена ситуация для шахты «Комсомольская» в условиях отработки угольных пластов, значения энергии представлены в Дж/м^3

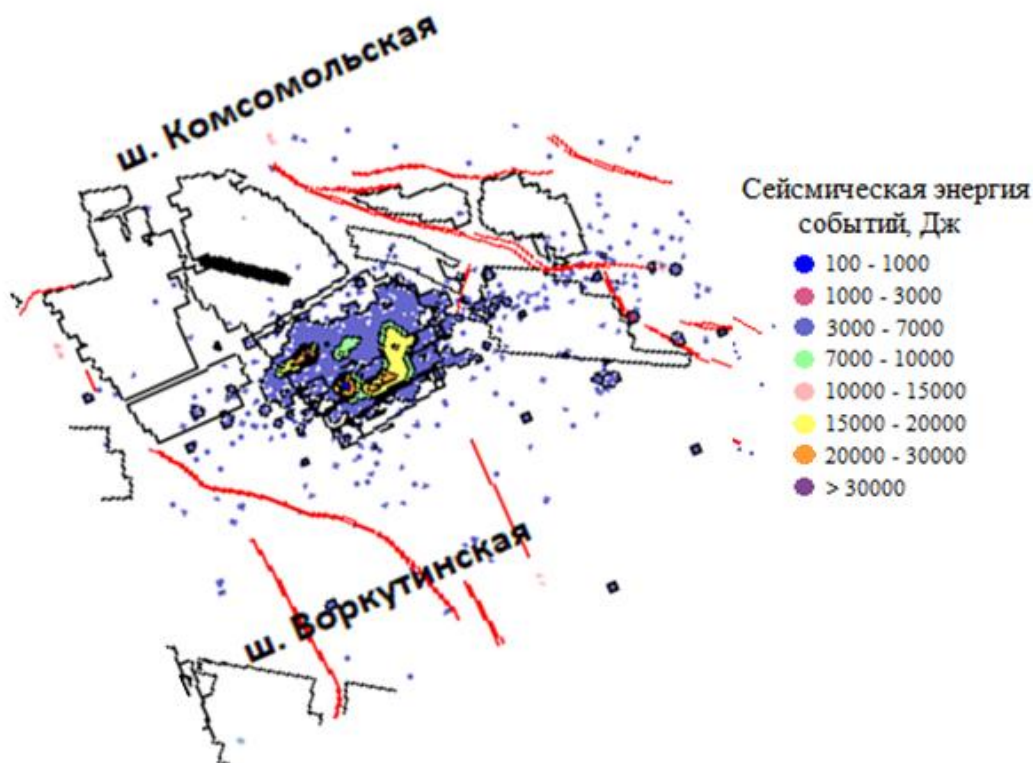


Рисунок 3.8 –Значения энергии по данным прогноза сейсмической станции на ш. «Комсомольская»

Решение на рисунке 3.7 представлено для нетронутого массива, в то время как на рисунке 3.8 данные получены в процессе проведения выработок. Качественная сходимость в пространственном распределении энергии подтверждает нашу гипотезу о преимущественном влиянии естественных напряжений над техногенными. Для оценки потенциальной опасности горных ударов применяем анализ задач, решённых для начального поля напряжений [63]. Учитывая, что 3500 Дж соответствует нижнему энергетическому порогу сейсмического события [94], это значение и принимаем для вывода впоследствии критерия удароопасности. С учётом коэффициента запаса на рисунке 3.7 данной энергии соответствует значение 60 кДж/м^3 .

3.2.3 Многоугольники распределения значений максимальных главных и минимальных главных напряжений с учётом диапазона разброса физических свойств

После того как через анализ удельной потенциальной энергии и данных по энергии, получаемой с сейсмостанции, была обоснована возможность рассмотрения горных ударов, для каждой из 200 решённых задач возьмём максимальные главные напряжения и минимальные главные напряжения, рассчитаем их количество для определённого фиксированного значения. Фиксированные значения для максимальных главных напряжений определялись с шагом: 5 МПа, 4 МПа, 3 МПа, 2 МПа, 1 МПа и 0,5 МПа, для минимальных главных напряжений – с шагом 1 МПа на всём диапазоне разброса физических свойств. Эти значения отложим по оси абсцисс. Вероятность значений главных напряжений находим путём деления полученного количества на число решённых задач. Эти значения откладываем по оси ординат. Соединяя полученные точки, получаем многоугольники распределения значений главных напряжений. В «Приложении 2» представлены результаты такого решения. Здесь же приведём результаты для точек, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов в точках а, b, с и в других точках модели на примере точек d, e, f (рис. 3.3). Многоугольники распределения главных напряжений представлены на рисунке 3.9. На рисунке 3.9 приведён пример для значений с шагом 5 МПа (для максимальных главных напряжений) и 1 МПа (для минимальных главных напряжений).

Для точек, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов (а, b и с) характерны наиболее вероятные (свыше 55%) пиковые значения главных напряжений, в то время как для остальных точек (d, e и f) значения главных напряжений имеют более вариативный характер. Анализ полученных графиков показал, что для точек, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов, вероятность значений главных напряжений имеет одну моду: для σ_1 55% - 70%, для σ_3 30% - 40%. Для остальных точек значения

вероятности имеют несколько мод, что свидетельствует о том, что главные напряжения носят более вариативный характер. На рисунке 3.9 в точках d, e и f присутствует три моды с вероятностями порядка 40%, 20% и 20% для максимальных главных напряжений, для минимальных все три значения составляют приблизительно 20%. Это объясняется тем, что в точках d, e и f система состояний с большей гибкостью может «подстроиться» под непредвиденное изменение деформационных свойств. Происходит постепенное снижение напряжённости массива при техногенном воздействии, в то время, когда неоднородность в точках a, b и c стремится к большему уравниванию, но при образовании свободной поверхности различие в напряжениях будет существенным. В этом случае происходит резкое изменение напряжённого состояния, что и приводит к горному удару.

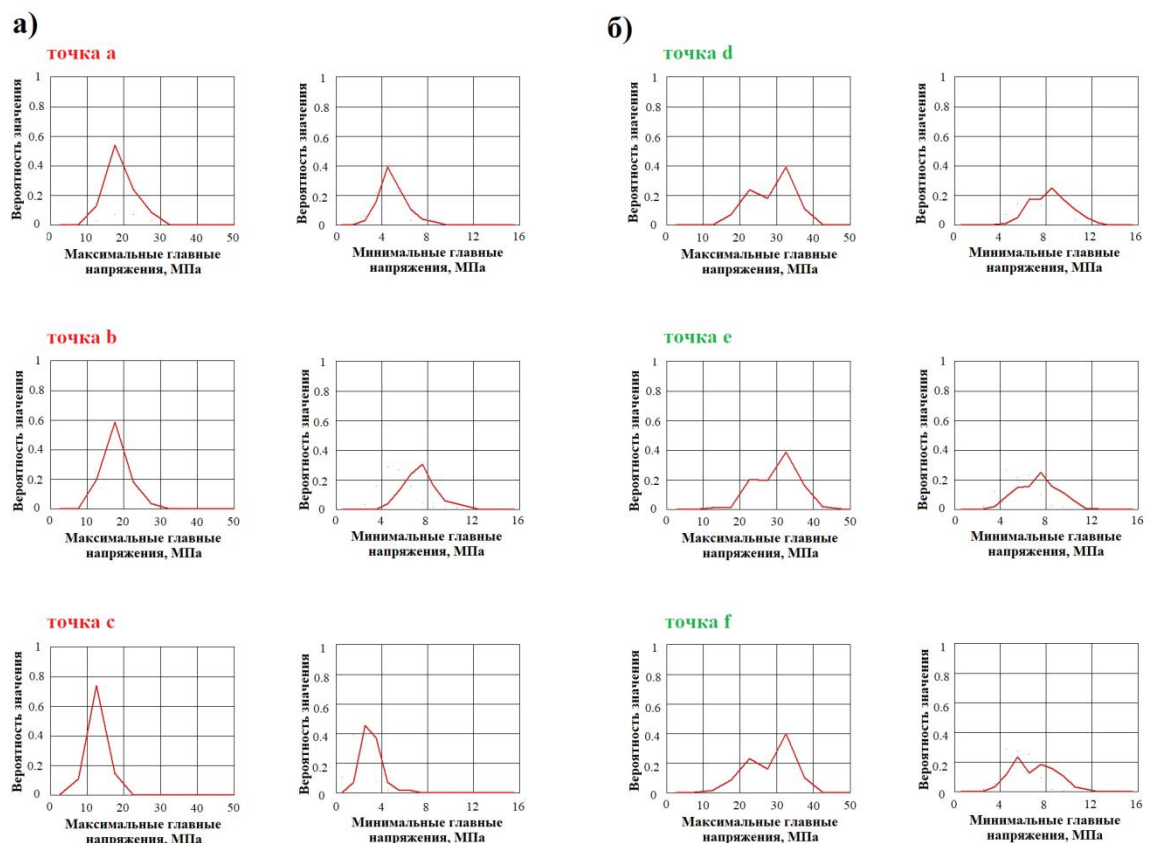


Рисунок 3.9 – Многоугольники распределения значений главных напряжений: а) в точках, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов и б) в остальных точках, где ударов не наблюдалось (на основании решения ряда задач с различными E и ν)

При уменьшении шага главных максимальных и главных минимальных напряжений наблюдается подобный характер поведения для точек, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов, и в любых других точках модели при закономерном уменьшении количества значений в каждом интервале. Вид многоугольников распределения для этих точек будет различным. Тот факт, что решение не зависит от шага, свидетельствует о применении такого подхода вне зависимости от чувствительности системы к изменению максимальных главных напряжений.

После проведённого анализа многоугольников распределения значений главных напряжений в расчётную модель добавляется выемочный участок, представляющий совокупность горных выработок (очистной забой и примыкающие штреки, а также выработанное пространство). Выемочный участок добавляется в окрестности точек с многоугольниками распределения значений максимальных главных напряжений, соответствующими качественному виду в точках а, b, с (рис. 3.9).

Для того чтобы понять характер изменчивости напряжений, был применён параметр Надаи-Лоде.

Параметр Надаи-Лоде рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3.3)$$

и определяет соотношение главных напряжений, а вместе с этим вид напряжённого состояния:

- | | |
|--|--|
| 1) $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ | $\mu_{\sigma} = -1$ – обобщённое сжатие; |
| 2) $\sigma_2 = 1/2(\sigma_1 + \sigma_3)$ | $\mu_{\sigma} = 0$ – обобщённый сдвиг; |
| 3) $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ | $\mu_{\sigma} = +1$ – обобщённое растяжение. |

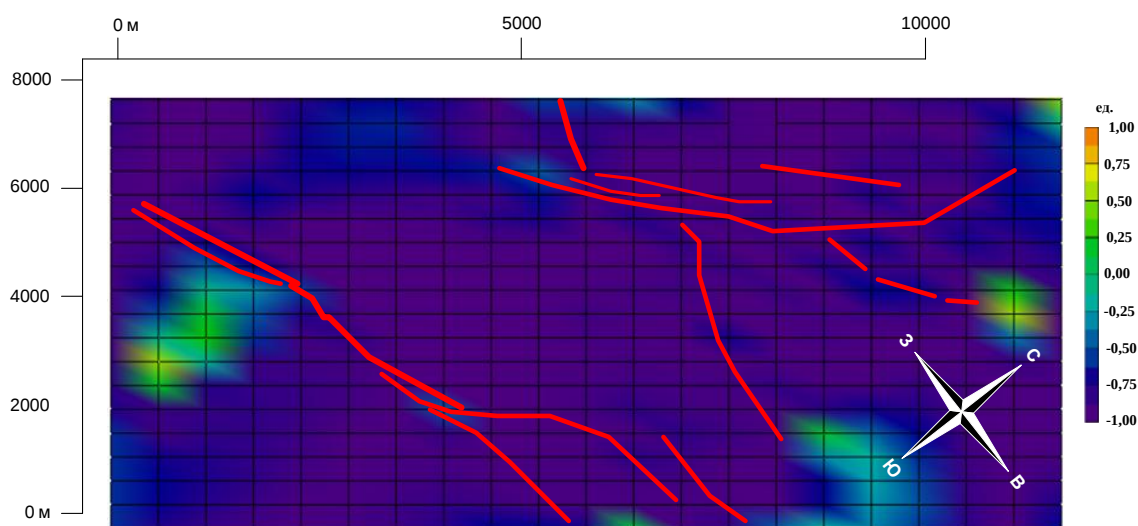


Рисунок 3.10 – Карта значений параметра Надаи-Лоде без выработки

На рисунке 3.10 представлена карта значений параметра Надаи-Лоде без проведения выработок, создаваемых исключительно за счёт наличия геологической нарушенности.

3.3 Обоснование безопасного направления очистных выработок на основе применения модели уплотняющегося массива с учётом геологических нарушений и тектонических сил

На рисунке 3.11 представлена карта значений параметра Надаи-Лоде в зависимости от расположения выемочного участка. Фронт ведения горных работ определён в зоне произошедшего горного удара. В плоскости модели изменение расположения выемочного участка представлено через угол к направлению фронта очистных работ от северного направления по часовой стрелке с шагом в 10° (рис. 3.12).

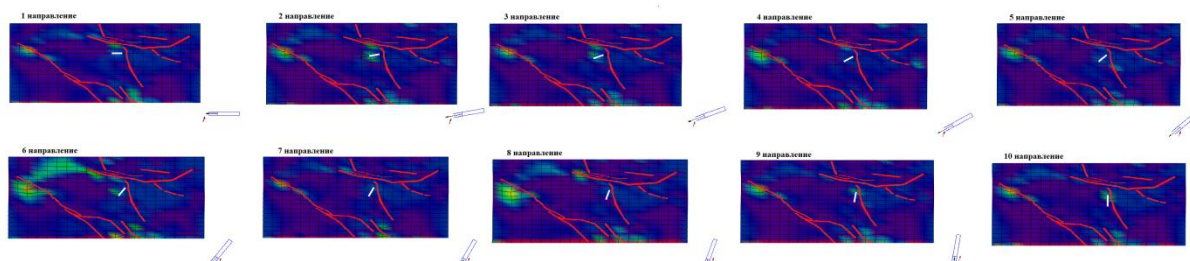


Рисунок 3.11 – Карта значений параметра Надаи-Лоде при различном направлении фронта

На рисунке 3.12 представлена карта значений параметра Надаи–Лоде в зависимости от расположения выемочного участка в пространстве для первого направления фронта очистных работ (угол 218° , отсчитываемый по часовой стрелке от северного направления (СН) к направлению фронта очистных работ) на примере ш. «Комсомольская». Относительно плоскости модели было выбрано изменение направления (начальное положение – угол 218° , отсчитываемый по часовой стрелке от СН) с шагом в 10° . При повороте выемочного участка происходит изменение (перераспределение) напряжений (пример на рисунке 3.13). На ш. «Комсомольская» направление фронта очистных работ выбирают в зависимости от границ шахтного поля (в перпендикулярном направлении от границ). Границы, как правило, соответствуют геометрии нарушений. Фронт очистных работ в этом случае приходится на 5-6 направлений в соответствии с выбранными нами обозначениями (угол к направлению фронта очистных работ 168° - 158° от северного направления по часовой стрелке).

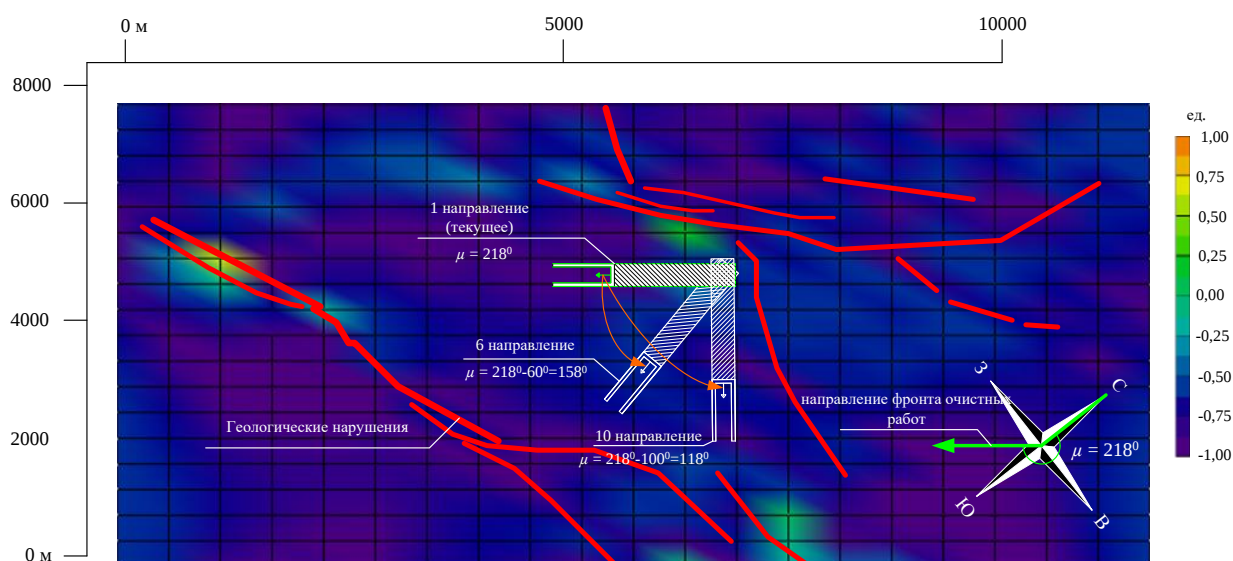


Рисунок 3.12 – Карта значений параметра Надаи–Лоде при первом направлении фронта очистных работ с демонстрацией порядка изменения направления фронта очистных работ

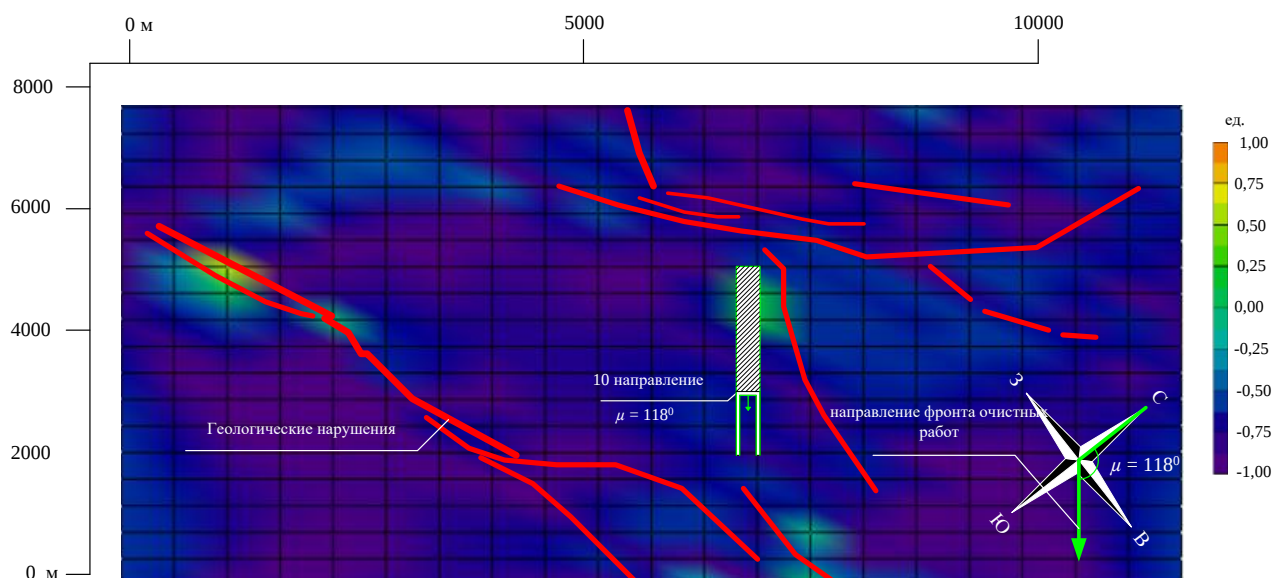


Рисунок 3.13 – Карта значений параметра Надаи-Лоде при десятом направлении (угол 118°) для условий ш. «Комсомольская»

В «Приложении 3» представлены карты значений удельной потенциальной энергии для каждого направления, в «Приложении 4» – карты значений параметра Надаи-Лоде для каждого направления. В качестве набора свойств «модуль деформации – коэффициент Пуассона» выбраны наиболее характерные решения из «Приложения 1»: 1) $E = 1489$ МПа, $\nu = 0,211$; 1) $E = 1335$ МПа, $\nu = 0,181$; 1) $E = 1037$ МПа, $\nu = 0,203$; 1) $E = 1305$ МПа, $\nu = 0,232$; 1) $E = 1296$ МПа, $\nu = 0,162$; 1) $E = 1395$ МПа, $\nu = 0,224$; 1) $E = 1524$ МПа, $\nu = 0,179$; 1) $E = 1036$ МПа, $\nu = 0,160$; 1) $E = 1331$ МПа, $\nu = 0,171$; 1) $E = 1433$ МПа, $\nu = 0,174$.

На рисунке 3.14 показано распределение напряжений в направлении фронта очистных работ при различных комбинациях физических свойств на примере первого направления. На рис. 3.15 дана схема к определению распределения напряжений. Решения задач для остальных направлений представлены в «Приложении 5».

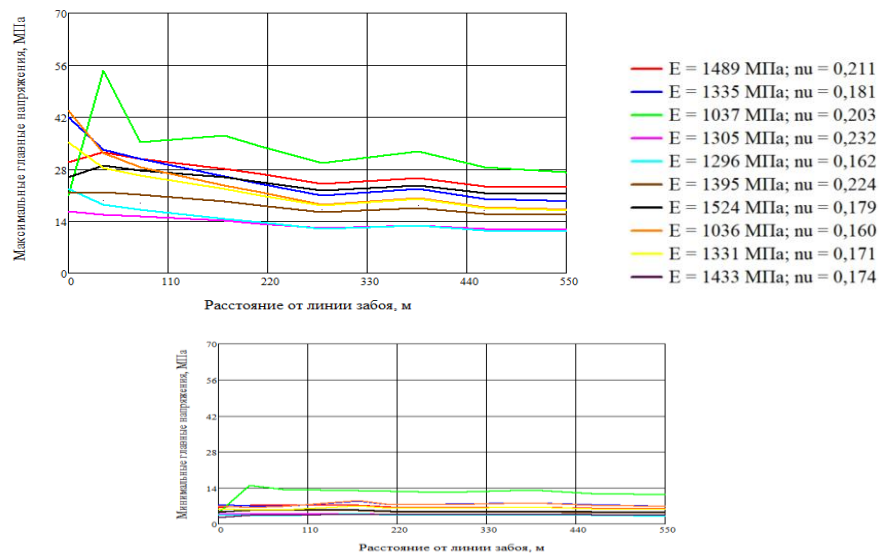


Рисунок 3.14 – Распределение главных напряжений вдоль направления фронта очистных работ на примере первого направления при реализации 10 задач с различными физическими свойствами

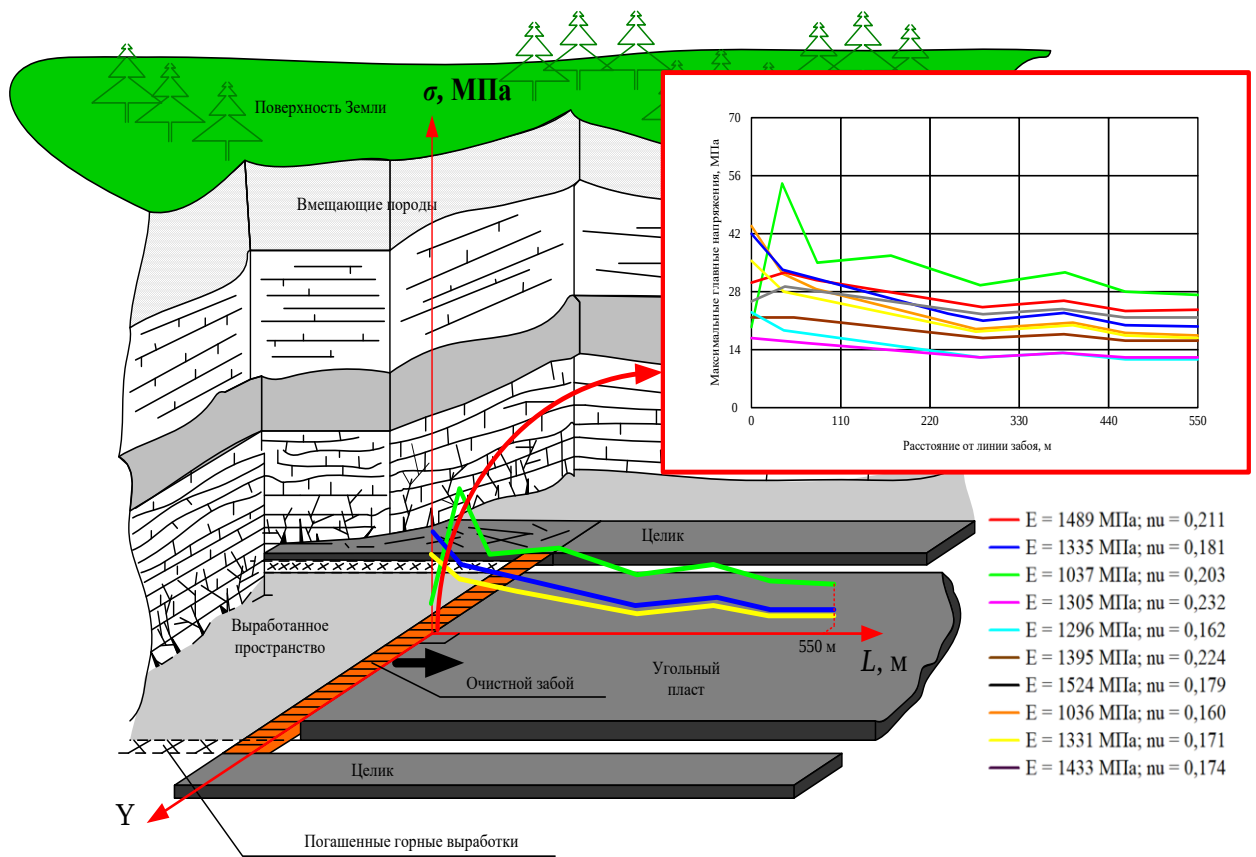


Рисунок 3.15 – Схема к определению распределения максимальных и минимальных главных напряжений вдоль направления фронта очистных работ

По графикам на рисунке 3.14 определяем удельную потенциальную энергию активации (формулы 3.4 и 3.8). Горное давление вышележащих пород (песчаник) представляем в виде силы тяжести, приходящейся на единицу площади (эквивалент напряжения).

Удельная потенциальная энергия веса вышележащих горных пород (песчаника) определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вес_песч.}} = \frac{(\rho_{\text{песч.}} \cdot gH)^2}{2E_{\text{песч.}}}, \quad (3.4)$$

где $\rho_{\text{песч.}}$ – плотность песчаника, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – глубина ведения работ, м;

$E_{\text{песч.}}$ – модуль деформации песчаника, МПа.

Удельная энергии активации (W_a) создаётся градиентом от максимума или минимума напряжений (2 варианта поведения графиков на рисунке 3.14) к свободной поверхности. Её отношение к удельной потенциальной энергии веса вышележащих горных пород ($\mathcal{E}$), будет представлять величину, по которой можно судить о потенциальной возможности удароопасности при выборе варианта направления выработки при раскройке шахтного поля. Это отношение определяем как коэффициент напряжённости (K). Коэффициент напряжённости сравнивается с критическим значением, соответствующим безопасным значениям удельной потенциальной энергии.

В зависимости от наблюдаемых на забое выработки максимальных главных напряжений: локальных максимумов или локальных минимумов, – представим два варианта расчётов.

Ниже представлены формулы для локального максимума напряжений на границе моделируемого очистного пространства выработки. Этому случаю соответствует решения моделей с видом графика, представленного на рис. 3.16 ($E_{\text{ур}} = 1036$ МПа, $\nu = 0,160$).

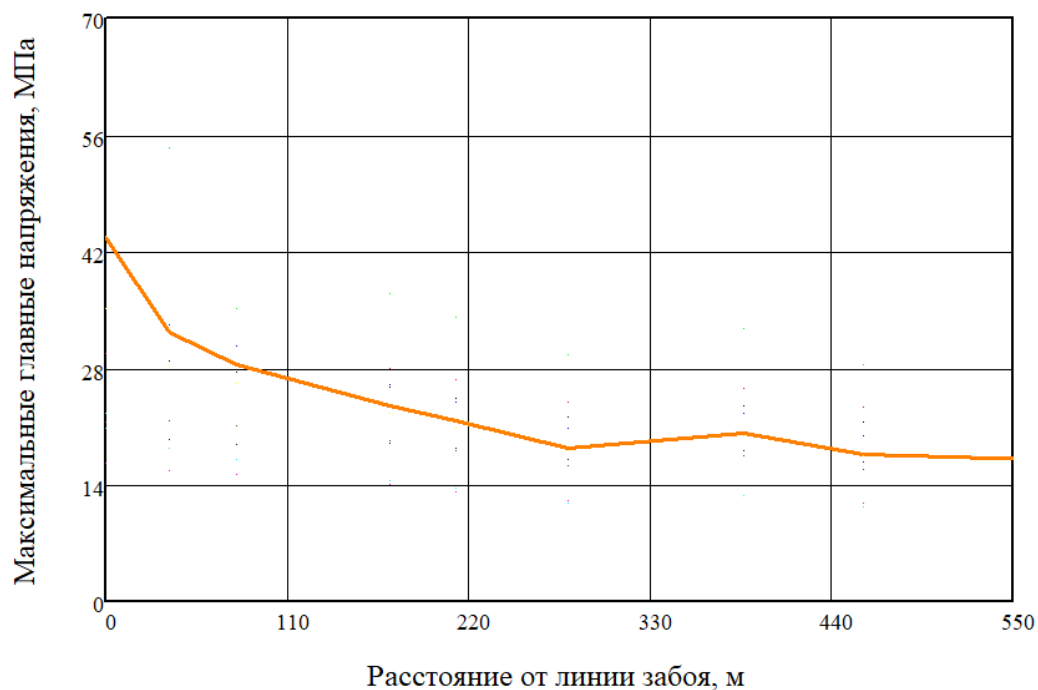


Рисунок 3.16 – Распределение главных напряжений вдоль направления моделируемого очистного пространства выработки вглубь массива на примере 1 направления для $E_{ур} = 1036$ МПа, $\nu = 0,160$

Коэффициент напряжённости при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных максимумов напряжений

$$K = \frac{W_a}{\mathfrak{E}_{\text{вес_песч.}}} . \quad (3.5)$$

Удельная потенциальная энергия активации при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных максимумов напряжений:

$$W_a = 0,5 \left(\frac{[\sigma_1^{\text{max заб}} - \sigma_3^{\text{max заб}}]^2}{E_i} - \frac{[\sigma_1^{\text{min}} - \sigma_3^{\text{min}}]^2}{E_i} \right), \quad (3.6)$$

Градиент напряжений при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных максимумов напряжений

$$grad = \frac{\sigma_1^{\text{min}} - \sigma_1^{\text{max заб}}}{r^{\text{min}}}, \quad (3.7)$$

где $\sigma^{\text{max заб.}}$ – локальные максимумы напряжений на границе моделируемого очистного пространства выработки, МПа;

$\sigma^{\min}$ – локальные минимумы напряжений вглубь массива, МПа;

E_i – рассчитанный модуль деформации в соответствующей максимумам/минимумам напряжений i точке массива, МПа;

$r^{\min}$ – расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки до локального минимума напряжений, м.

В таблице 3.1 представлены значения, по которым было построено распределение.

Таблица 3.1 – Данные для построения распределения максимальных главных напряжений вглубь массива (для $E_{\text{ур}} = 1036$ МПа, $\nu = 0,160$)

Параметры	Значения									
Максимальные главные напряжения σ_1 , МПа	43,86	32,38	28,51	23,53	21,8	18,41	20,26	17,62	16,96	16,67
Расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки вглубь массива r , м	0	38	79	172	212	280	387	459	564	649

Значение $r = 0$ является границей моделируемого очистного пространства – плоскость забоя. Для графика представленного вида определяется $\sigma_1^{\max \text{ заб}} = 43,86$ МПа, $\sigma_1^{\min} = 18,41$ МПа, $r^{\min} = 280$ м, производится расчёт в соответствии с формулами (3.5-3.7).

Далее рассматривается второй случай, когда на границе моделируемого очистного забоя создаются локальные минимумы. Этому случаю соответствует решения моделей с видом графика, показанным на рисунке 3.17 ($E_{\text{ур}} = 1037$ МПа, $\nu = 0,203$).

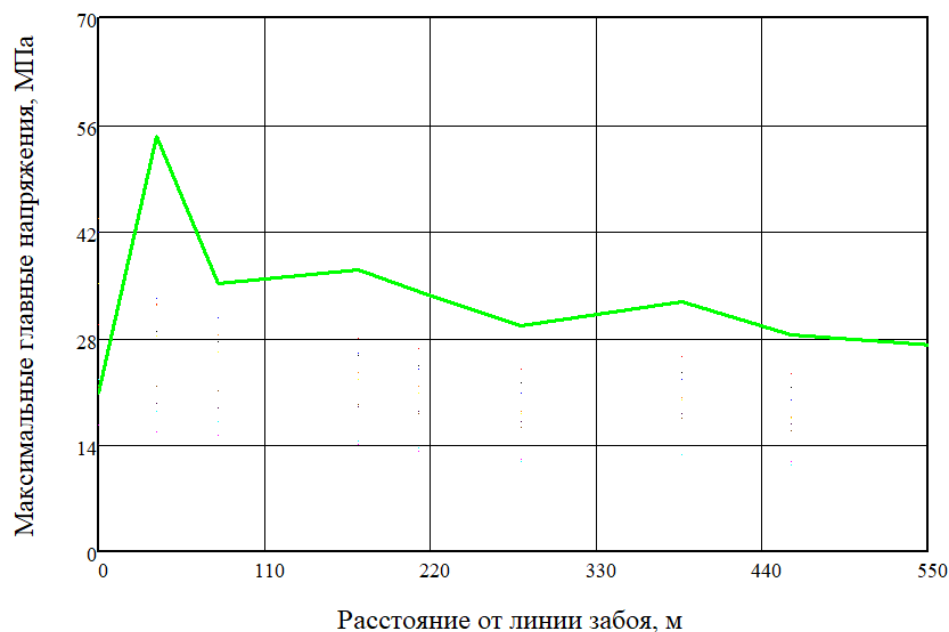


Рисунок 3.17 – Распределение главных напряжений вдоль направления моделируемого очистного пространства выработки вглубь массива на примере 1 направления для $E_{\text{ур}} = 1037$ МПа, $\nu = 0,203$

Коэффициент напряжённости при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных минимумов рассчитывается по той же формуле (3.5).

Удельная потенциальная энергия активации при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных минимумов напряжений равна

$$W_a = 0,5 \left(\frac{[\sigma_1^{\max} - \sigma_3^{\max}]^2}{E_i} - \frac{[\sigma_1^{\min \text{ заб}} - \sigma_3^{\min \text{ заб}}]^2}{E_i} \right), \quad (3.8)$$

Градиент напряжений при наблюдаемых на границе моделируемого очистного пространства выработки локальных минимумов напряжений равен

$$\text{grad} = \frac{\sigma_1^{\max} - \sigma_1^{\min \text{ заб}}}{r^{\max}}, \quad (3.9)$$

где $\sigma^{\min \text{ заб}}$ – локальные минимумы напряжений на границе моделируемого очистного пространства выработки, МПа;

$\sigma^{\max}$ – локальные максимумы напряжений вглубь массива, МПа;

E_i – рассчитанный модуль деформации в соответствующей максимумам/минимумам напряжений i точке массива, МПа;

$r^{\max}$ – расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки до локального максимума напряжений, м.

В таблице 3.2 представлены значения, по которым было построено распределение для этого варианта.

Таблица 3.2 – Данные для построения распределения максимальных главных напряжений вглубь массива (для $E_{\text{уг}} = 1037$ МПа, $\nu = 0,203$)

Параметры	Значения									
Максимальные главные напряжения σ_1 , МПа	20,97	54,54	35,14	36,92	34,1	29,67	32,85	28,39	26,94	25,98
Расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки вглубь массива r , м	0	38	79	172	212	280	387	459	564	649

Тогда $\sigma_1^{\min \text{ заб}} = 20,97$ МПа, $\sigma_1^{\max} = 54,54$ МПа, $r^{\max} = 38$ м подставляем в формулы (3.5, 3.8-3.9) и производим расчёт.

Относя графики на рисунке 3.14 к первому или второму варианту, производим соответствующие расчёты и получаем 10 значений энергий активации для максимальных главных напряжений и 10 значений градиентов напряжений.

Аналогичным образом определяются минимальные главные напряжения для графиков каждого рассматриваемого направления фронта очистных работ (угол μ на рисунке 3.12). Внутри одного направления будет 10 значений энергий активации для максимальных главных напряжений и 10 значений градиентов напряжений. Для каждого из вариантов рассчитываются коэффициент напряжённости K . Описанный порядок расчётов производим для каждого из направлений на рисунке 3.11. Результаты сводим в единую матрицу. Эта матрица значений применяется для построения изограммы.

Выводы по главе

- 1) По данным шахтных исследований с увеличением глубины растут усреднённые значения напряжений. Также с глубиной увеличивается диапазон разброса физических свойств. Деформационно-прочностные свойства массива следует рассматривать в диапазоне разброса физических свойств, а не на основании усреднённых характеристик.
- 2) При региональном прогнозе на пологих участках угольных пластов допустимо проводить решение плоских задач в горизонтальном сечении (по угольному пласту) при этом необходимо учитывать дилатансию. Принимаются допущения по учёту геометрии, пликативным нарушениям, перепадам высот пласта и его бифуркации на основании решения задач в вертикальном сечении (напряжения в пределах угольного пласта составляют 5-6% от предела прочности песчаника на сжатие).
- 3) Разработан порядок сбора и обработки данных для численного моделирования с учётом диапазона разброса физических свойств (модуль деформации, коэффициент Пуассона). После чего осуществляется решение задач с различными вариантами деформационно-прочностных свойств в начальном поле напряжений с учётом геологических нарушений и тектонических сил. Вид получаемых многоугольников распределения значений максимальных и минимальных главных напряжений в точках, соответствующих эпицентрам очагов горных ударов, и в любых других точках модели позволяет сделать выбор участков для дальнейших исследований.
- 4) Очистное пространство выемочного участка моделируется в точках, в которых вид многоугольника распределения значений главных напряжений стремится к одномодальному характеру, наблюдаемому в точках, соответствующих очагам горных ударов. Задаются различные направления фронта очистных работ. Параметр Надаи-Лоде позволяет судить о виде напряжённого состояния, учёт удельной потенциальной

энергии активации и удельной потенциальной энергии веса вышележащих горных пород позволяет получить коэффициент напряжённости вдоль фронта очистных работ в зависимости от градиента напряжений вглубь массива.

4 КРИТЕРИЙ УДАРООПАСНОСТИ ДЛЯ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ФРОНТА ОЧИСТНЫХ РАБОТ. АКТЫ И АВАРИИ, ПРОИЗОШЕДШИЕ НА ШАХТАХ АО «ВОРКУТАУГОЛЬ»

В предыдущих главах было отмечено, что, осуществляя прогноз с применением разрабатываемого метода, можно оценить потенциальную возможность проявления горных ударов. Нами были представлены общие задачи, позволяющие выявить тектонически напряжённые зоны и рассчитать взаимное влияние факторов, отвечающих за их формирование. В данном разделе представим вывод коэффициента удароопасности и обобщим разработанный алгоритм прогноза горных ударов [114]. Отдельно рассмотрим характерные инциденты, произошедшие на шахтах АО «Воркутауголь», и дадим им оценку, основываясь на предлагаемом алгоритме прогноза горных ударов с применением компьютерных вычислений.

4.1 Построение изограммы для выявления наиболее удароопасных направлений фронта очистных работ и критерий удароопасности

Для построения изограммы применяется выведенная выше матрица коэффициентов напряжённости. В качестве строк этой матрицы выступают значения градиентов, определяемых по формулам (3.7) и (3.9) в зависимости от типа распределения; в качестве столбцов – угол, задающий направление фронта очистных работ. Матрица формируется из векторов коэффициентов напряжённостей для каждого направления, рассчитанных по аналогии с показанным в подразделе 3.3 примером.

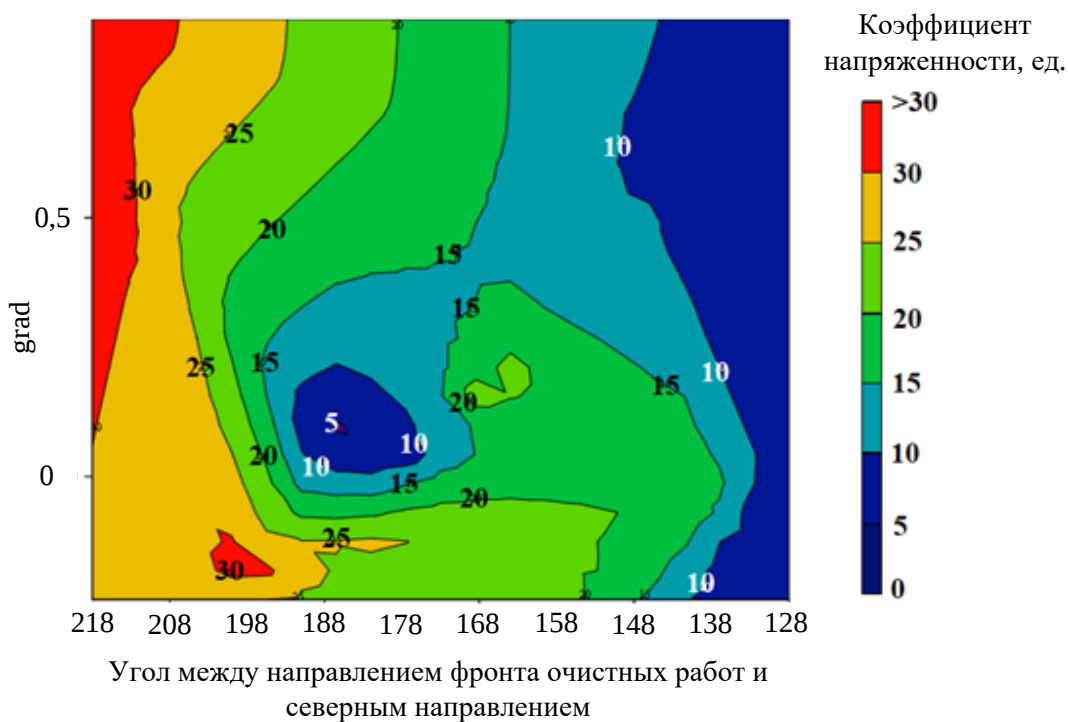


Рисунок 4.1 – Изограмма коэффициента напряжённости в зависимости от градиента напряжений и угла между направлением фронта очистных работ и северным направлением для условий шахты «Комсомольская»

Для оценки и выбора направления ведения горных работ нами был введён критерий ударопасности [K]. Критерий определяется на основе сопоставления данных с сейсмостанции и отношения рассчитанной удельной потенциальной энергии активации, отнесённой к удельной потенциальной энергии силы тяжести вышележащих горных пород $\mathcal{E}_{\text{вес_песч.}}$ (3.4) и (3.5). [K] сравнивается с K.

Для прогноза горных ударов применяем оценку событий на основании данных о их сейсмичности [44]. Согласно документам [94, 95], регламентирующим работу сейсмических станций, выделяют 4 энергетических уровня. II уровень энергии соответствует разрушению в приконтурном массиве горных выработок и определяется от 3500 Дж. III уровень энергии соответствует влиянию очистных работ при выемке угля и определяется от 6000 Дж. Такое введение энергетических уровней обусловлено представлениями выбора критерия ударопасности и рекомендациями работ сейсмических служб. В задаче рассматриваем II и III

энергетические уровни, а остальные исключаем, поскольку при уровне энергии от 3500 Дж начинают вести учёт опасности по проявлению горных ударов. II и III уровни служат пороговыми значениями минимальных нарушений, поскольку при добыче угля влияние очистных работ будет сказываться в любом случае. Таким образом, мы определяем пограничную зону между разрушением в приконтурном массиве горных выработок и влиянием очистных работ. Применение IV энергетического уровня будет завышать значение критерия удароопасности.

При этом можно отметить общую тенденцию в пространственном распределении энергий, рассчитанных для нетронутого состояния угольного пласта в соответствии с разработанной математической моделью (рис. 3.7) и определяемых работой сейсмостанции (рис. 3.8). В основу математической модели заложены представления о природе тектонических сил [45], модели поведения геоматериалов [116, 115, 103], результаты лабораторных испытаний образцов [113] и их физические свойства [131].

В исследованиях отмечается, что от правильного выбора модели зависит точность описания поведения массива [89]. Эти подходы были обобщены нами в единый метод прогноза. Значения сейсмической энергии, полученные для ш. Комсомольская (рис. 3.8), были сопоставлены с рассчитанными значениями удельной потенциальной энергии в нетронутом угольном пласте (рис. 3.7).

Полученные значения удельной потенциальной энергии в нетронутом массиве лежат в основе исходных данных, необходимых для осуществления прогноза горных ударов. Также в исходных данных должен быть представлен план горных работ.

Ориентируясь на рис. 3.7 и 3.8 и исходные данные по энергетическим уровням, отметим, что границам II энергетического уровня (рис. 3.8) соответствует удельная потенциальная энергия в нетронутом угольном пласте со значением 60 кДж/м^3 (рис. 3.7), границам III уровня (рис. 3.8) – $112,5 \text{ кДж/м}^3$ (рисунок 3.7).

Подставим в формулу (3.5) эти значения в числитель в качестве энергии активации. Рассчитываем удельную потенциальную энергию силы тяжести [114].

$$\mathcal{E}_{\text{вес_песч.}} = 18 \text{ кДж/м}^3.$$

$$\text{При } W_a = 60 \text{ кДж/м}^3 \quad [K]_{\text{нетр.}}^{\text{II}} = 3,333.$$

$$\text{При } W_a = 112,5 \text{ кДж/м}^3 \quad [K]_{\text{нетр.}}^{\text{III}} = 6,25.$$

$[K]_{\text{нетр.}}$ – безопасное значение для нетронутого состояния угольного пласта, верхний индекс обозначает привязку к соответствующему энергетическому уровню.

Действующие в массиве напряжения превышают рассчитываемую в нетронутой среде прочность пород в связи с наличием осложняющих факторов. Для перехода к критерию в условиях проведения выработок воспользуемся тем, что на практике относительно безопасные выработки для угольных шахт на глубоких горизонтах можно отнести к III категории устойчивости согласно работам [87, 88]. III категория устойчивости характеризуется стабилизацией роста деформаций через 1-2 недели. Коэффициент, учитывающий превышение действующими напряжениями рассчитываемой прочности составляет 1,61–3,0. С учётом этого коэффициента $[K]_{\text{нетр.}}^{\text{II}}$ изменяется в диапазоне 5,37...10, $[K]_{\text{нетр.}}^{\text{III}}$ – в диапазоне 10,06...18,75. Данный принцип основан на аналогии с рекомендациями ввода коэффициента изменчивости прочности угля в нормативной документации и Инструкциях по прогнозу динамических явлений [90]. Правомерность такого перехода от нетронутого массива к неустойчивым горным породам находит подтверждение в проводимых исследователями лабораторных испытаниях [8].

Переходя от нетронутого массива к породам III категории устойчивости как относительно устойчивой и определяя границу между разрушением в приконтурном массиве горных выработок (II энергетический уровень) и влиянием очистных выработок при выемке угля (III

энергетический уровень), принимаем критерий безопасности $[K] = 10$ на стадии проведения очистных выработок.

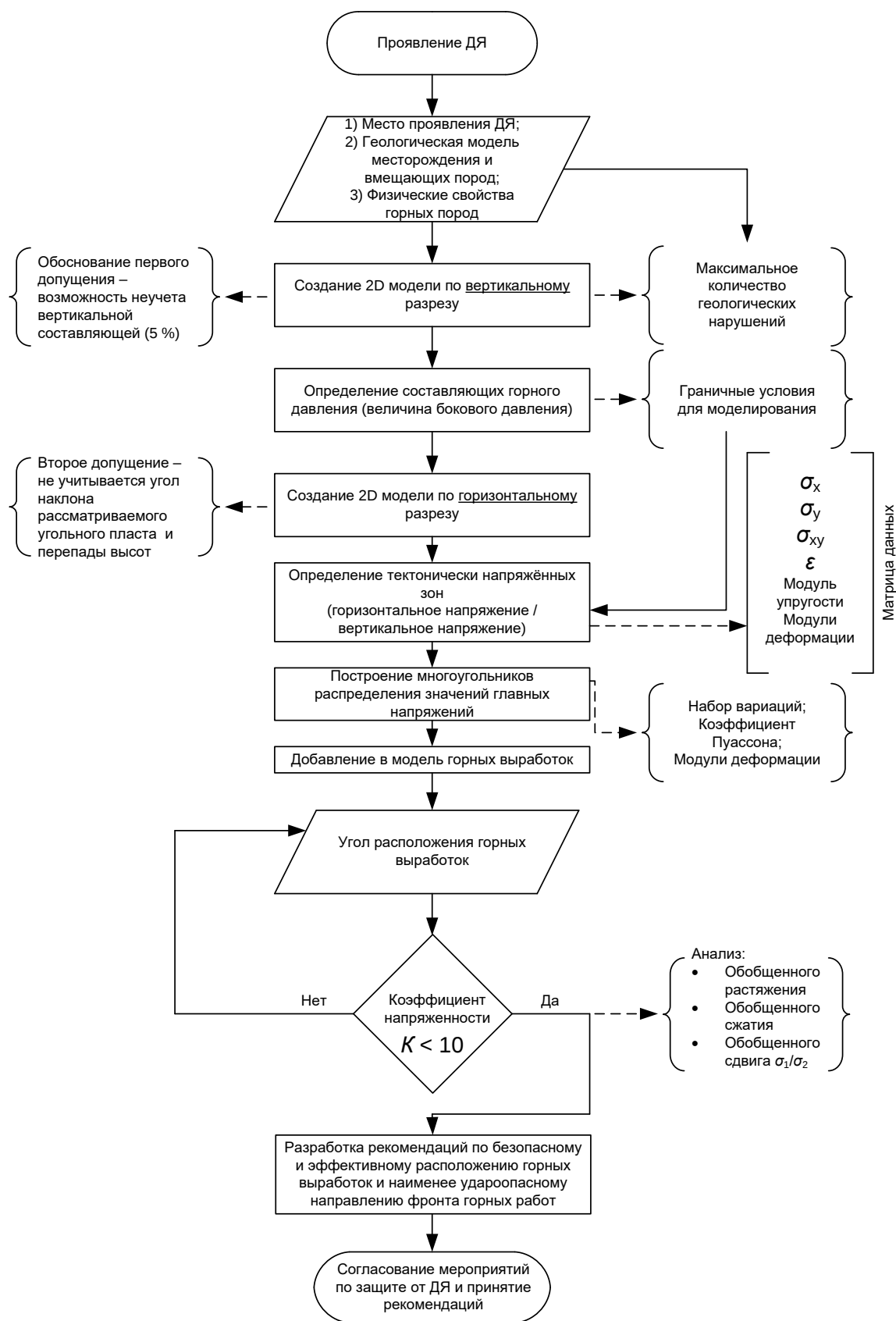
В соответствии с рисунком 4.1 наименее удароопасным для условий ш. «Комсомольская» является вариант направления фронта очистных работ между углами 138° и 128° против часовой стрелки от Северного направления для любых значений модуля деформации и коэффициента Пуассона из диапазона разброса. Направление в районе угла 188° также характеризуется меньшим коэффициентом напряжённости, но не при всех значениях модуля деформации и коэффициента Пуассона. Этим принципом и следует руководствоваться при обосновании параметров безопасной и эффективной отработки угольных пластов на глубоких горизонтах в условиях геологической нарушенности. Незначительные отклонения угла приводят к перераспределению напряжений по плоскости забоя и это может привести к аварии или инциденту.

4.2 Алгоритм осуществления регионального прогноза горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт

В угольных пластах, подверженных действию геологических нарушений, ещё до ведения горных работ создаются неблагоприятные условия, причинами которых служит накопление потенциальной энергии в массиве горных пород. Избытки этой энергии проявляются в виде горных ударов [41, 131]. На угольных шахтах энергетические проявления в массиве фиксируют с помощью датчиков, информация с которых поступает на сейсмостанции. Эти проявления фиксируют как события. Разработанный метод прогноза горных ударов и выбор наименее удароопасного направления фронта очистных работ можно записать в виде алгоритма (рисунок 4.2).

Порядок применения алгоритма:

1. На первом этапе происходит сбор данных (места проявления горного удара, горно-геологические и горно-технические документы предприятия и физические свойства горных пород).
2. Далее строится 2D модель по вертикальному разрезу с учётом пересечения максимального количества геологических нарушений. Подтверждается возможность применения первого допущения, которая проявляется в возможности неучёта вертикальной составляющей горного давления.
3. Также по вертикальному сечению определяются составляющие горного давления (горизонтальные напряжения с учётом коэффициента бокового распора по А.Н. Диннику). Получаем граничные условия для дальнейшей работы.
4. Далее строится 2D модель по горизонтальному разрезу. И определяются направления тектонических сил на основе формирования опасных зон по отношению горизонтальных напряжений к вертикальным. Построение 2D модели по горизонтальному сечению выполняется с допущением, что не рассматривается угол наклона разрабатываемого пласта, перепады высот, локальные нарушения (перемятие пласта, бифуркация, пликативные нарушения). Эти особенности пласта учитываются при более детальном локальном прогнозе.
5. Далее на основании решений строятся многоугольники распределения значений главных напряжений в зависимости от набора вариаций физических свойств в системе задаваемых значений «Модуль деформации – коэффициент Пуассона» (200 наборов в представленном варианте расчёта). По характеру многоугольников распределения (одноmodalный, многоmodalный) определяют участки возможных горных ударов.



Допущения

Примечания

Рисунок 4.2 – Алгоритм регионального прогноза горных ударов на угольных шахтах (критерий выбран на примере ш. «Комсомольская»)

6. После анализа напряжений в нетронutom массиве осуществляется анализ напряжений с учётом горных выработок выемочного участка и выработанного пространства при различном направлении фронта очистных работ. Выработки моделируют в окрестности точки, в которой наблюдается одномодальный характер распределения плотности вероятности (потенциальная возможность проявления горного удара). Параметр Надаи-Лоде рассчитывается в этом случае с целью выявления закономерности перераспределения напряжений.

7. После определяется критерий удароопасности. Критерий удароопасности выбирается на основе сравнения данных сейсмостанции и результатов расчётов удельной потенциальной энергии, как соответствующий наиболее благоприятным условиям. Значение критерия удароопасности принимается с поправкой на нарушение угольного пласта в результате образования зон ослабления (проведение горных выработок выемочного участка). В качестве поправок принимается условие устойчивости горных выработок. Для каждого направления фронта очистных работ и значений из диапазона разброса физических свойств угля получают коэффициент напряжённости, который сравнивают с критерием удароопасности.

8. Для условий ш. Комсомольская АО «Воркутауголь» критерий удароопасности определён равным 10. При коэффициенте напряжённости менее 10 работы более безопасны с точки зрения возможного проявления горного удара. Если коэффициент напряжённости более 10, то рекомендуется разработать дополнительные мероприятия по обеспечению контроля и повышению безопасности и эффективности горных работ.

Представленный алгоритм универсальный для всех горных предприятий. Его применение возможно на любой шахте или в любой проектной организации. Для его реализации могут быть дополнительно использованы специальные программные средства. При использовании

данного алгоритма для условий шахты «Комсомольская» применялись Plaxis и MathCad.

Все этапы разработанного алгоритма регионального прогноза горных ударов более подробно были изложены в 3 главе настоящей работы.

4.3 Аварии, имевшие место на шахтах АО «Воркутауголь»

При произошедшем на шахте событии созывают комиссию, целью которой является расследование инцидента. По результатам работы составляют Акт, затем по всем сервисным предприятиям (СП), принадлежащим АО «Воркутауголь», рассылают информационные листы, содержащие краткое описание несчастного случая, его причины как основные, так и сопутствующие, последствия и корректирующие мероприятия, с формулировкой: «Сообщение рассылается с целью ознакомления работников и в надежде на то, что этот пример поможет избежать подобного происшествия на вашем предприятии».

Рассмотрим информационные листы, описывающие крупные аварии.

4.3.1 Несчастный случай на СП АО «Воркутауголь» шахта «Комсомольская»

Выписка из информационного листа от 10 августа 2007 г. №11-2-1/878:

«25 июня 2007 г. в СП ОАО «Воркутауголь» шахта «Комсомольская» в результате аварии в выработках горизонта -820м травмированы 13 человек»

«Причины несчастного случая:

основная: образование объёма метановоздушной смеси взрывчатой концентрации в верхней части (над крепью и за крепью) вентиляционного штрека 622-с пласта «Мощного» в районе сопряжения с конвейерным штреком 432-с «бис» пласта «Мощного», и внезапное сдвижение массива пород над крепью выработок <...> и самого сопряжения выработок, в результате чего произошло проскальзывание элементов крепи в замковых

соединениях с последующим возникновением температурного импульса (более 700⁰ С) за счёт их трения.

Сопутствующие: снижение прочностных свойств горного массива <...> в результате влияния геологического нарушения и длительного времени существования выработок, что обуславливало дренаж метана из выработанного пространства...»

4.3.2 Несчастный случай на СП ОАО «Воркутауголь» шахта «Северная»

Информационный лист от 17 октября 2011 г. №18-45/000.

16 июля 2011 г. произошла авария в СП ОАО «Воркутауголь» шахта «Северная» на вентиляционном бремсберге 32-2-з от сопряжения СОШ -748 (северный откаточный штрек) на пласт «Мощный», горизонт -630 м по падению, травмировано 3 человека.

Причины несчастного случая:

«основная: зависание породной консоли (балки), которая сформировалась на границе выработанного пространства (отработанной лавы 212-з пласта Мощного) и краевой частью массива над ВБ 32-2-з, и которая с резким (динамическим) сдвижением по линии разлома (в месте заделки породной балки) просела над углепородным массивом параллельных выработок (КБ 22-з, ВБ 32-з, ВБ 32-2-з) вследствие того, что межбремсберговые целики потеряли свои геометрические параметры и свою несущую способность в результате полной разрушенности верхней пачки пласта Мощного в его краевых частях».

На рисунке 4.3 изображён ситуационный план места аварии, на рисунке 4.4 – состояние выработок до и после инцидента.

Ситуационный план места аварии произошедшей
в вент.бр-ге 32-2 з пл Мощного 16.07.11

Состояние выработок после аварии



Состояние выработок после мероприятий по спасению

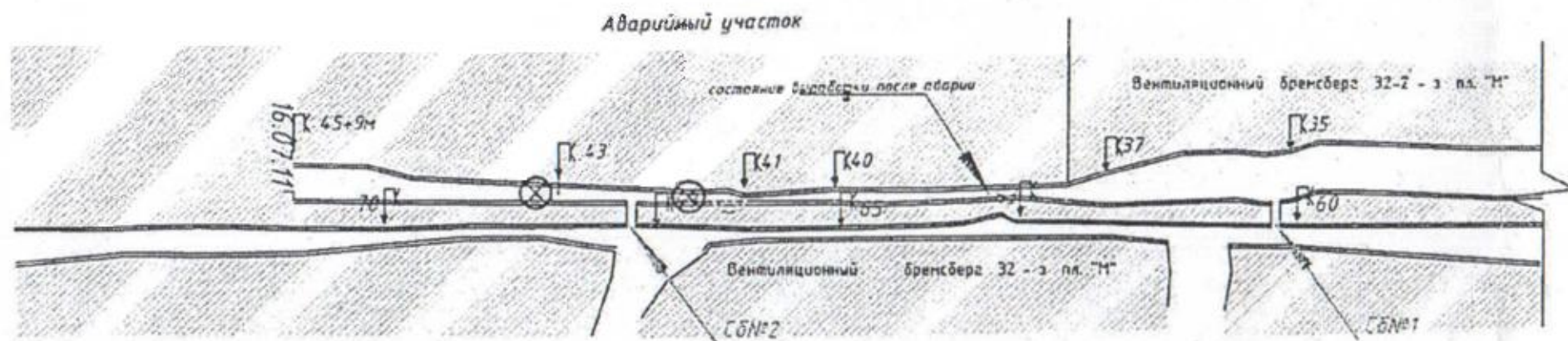


Рисунок 4.3 – Ситуационный план места аварии, произошедшей 16.07.'11 г. на ш. Северная. Выкопировка из
информационного листа от 17 октября 2011 г. №18-45/000

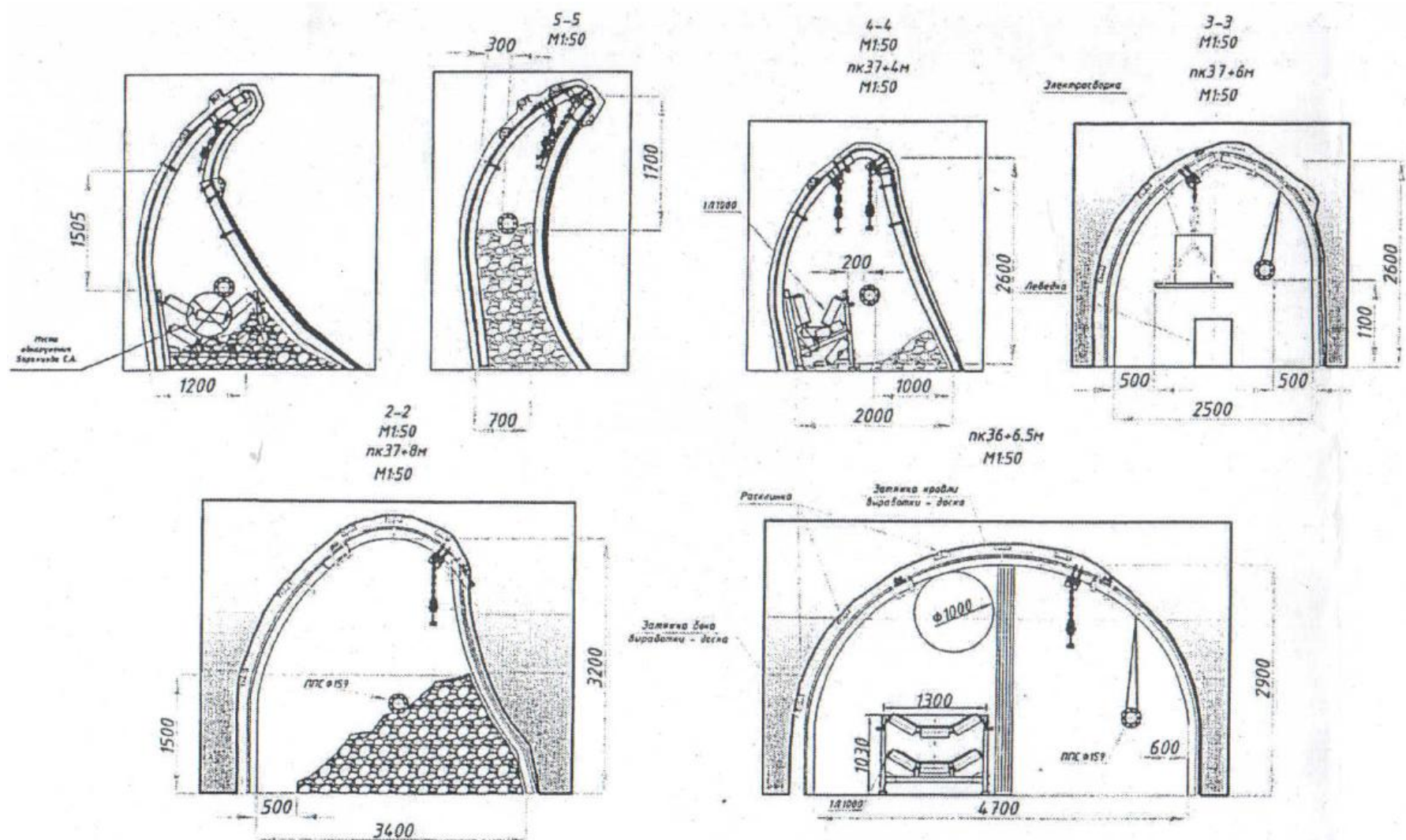


Рисунок 4.4 – Деформирование арочной крепи. Выкопировка из информационного листа от 17 октября 2011 г. №18-

45/000

4.3.3 Несчастный случай на СП АО «Воркутауголь» шахта «Воркутинская»

Информационный лист от 28 марта 2013 г. №72/343-1

11 февраля 2013 г. произошла авария в СП АО «Воркутауголь» шахта «Воркутинская» на участке лавы пл. «Тройного» и в прилегающих горных выработках, травмирован 21 человек

Причины несчастного случая:

«основная: скопление, воспламенение и взрыв метановоздушной смеси в камере привода ленточного конвейера 1-ЛУ120, установленного в рельсовом уклоне 35-ю пласта Тройного, произошедшее в результате:

1.1. невыполнения противопопылевых мероприятий по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли в горных выработках выемочного участка лавы 832-ю пласта Тройного в соответствии с нормативными требованиями,

1.2. нарушения взрывобезопасности при эксплуатации электрооборудования ленточного конвейера 1-ЛУ120 по рельсовому уклону 35-ю пласта Тройного...»

4.4 Теоретическое обоснование методики шахтного эксперимента по прогнозу тектонически напряжённых зон с ПГД

Мероприятия, позволяющие гарантировать безопасность, могут относиться как к технологическим, в процессе которых, например, обеспечивают устойчивость, охрану и поддержание горных выработок, разупрочняют породы основной кровли при пластовой отработке, предусматривают закладку пустот за крепью в подготовительных выработках, либо осуществляют крепеусиления (применение гидродомкратов, дополнительных анкерров); так и методологическим.

Прогноз горных ударов с применением программных комплексов позволяет выявить тектонически напряженные зоны с ПГД и оценить эффективность мероприятий, способных предупредить аварию.

К выделенным в группу методологических мероприятий относят: 1) приведение в соответствии с регламентом Службы геодинамических наблюдений со статусом сейсмостанции GITS; 2) разработка критериев удароопасности при проведении подготовительных и капитальных выработок; 3) внедрение современных способов обнаружения и контроля повышенных напряжений, в том числе и на локальных участках при проведении выработок.

Анализ информационных листов показывает на геомеханическую природу аварий.

Объединив все позиции, делаем вывод, что угольная промышленность остро нуждается в современных методах решения, при этом методология должна опираться на натурные эксперименты, причём перечисленные мероприятия можно существенно расширить.

В итоге следует создать методику шахтных испытаний для уточнения теоретических положений, разработанных автором. Результаты наблюдений должны быть приняты Межведомственной комиссией, в состав которой входят: 1) Департамент угольной и торфяной промышленности Министерства энергетики РФ, 2) Центр геомеханики и проблем горного производства в составе СПбГУ (бывший Головной институт по подземной шахтной разработке угольных пластов (ВНИМИ)), АО «ВНИМИ», 3) Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору Ростехнадзор, 4) Комитет экологической безопасности и природопользования.

Результатом положительного заключения Межведомственной комиссии о соответствии теоретического обоснования шахтным наблюдениям станет руководство по прогнозу горных ударов с дальнейшим нанесением тектонически напряжённых зон с ПГД на планы горных работ.

Выводы по главе

- 1) Определён критерий удароопасности для выбора направления фронта очистных работ. Разработан алгоритм регионального прогноза горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт.
- 2) Произошедшие на практике несчастные случаи часто подтверждаются влиянием геологической нарушенности и физических свойств массива.
- 3) Решение локальных задач важно производить с учётом регионального прогноза, а удароопасность анализировать с применением программных комплексов.
- 4) Определено наименее удароопасное направление ведения горных работ для различных вариантов модуля деформации и коэффициента Пуассона (через оценку вида обобщённого состояния по параметру Надаи-Лоде и значения удельной потенциальной энергии). Рассчитан коэффициент напряжённости в зависимости от градиента напряжений вглубь массива вдоль фронта очистных работ.
- 5) В качестве критерия удароопасности при выборе направления горных выработок для условий ш. Комсомольская предложен критерий удароопасности $[K] = 10$. Горные работы рекомендуется вести в том направлении, при котором достигается условие $K \leq 10$, где K – коэффициент напряжённости.
- 6) Разработаны методические рекомендации к реализации предлагаемого алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором теоретических и численных исследований решена актуальная научная задача обоснования и разработки метода прогноза горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт, позволяющего при проектировании новых выемочных участков в условиях широкого диапазона разброса физических свойств горных пород и угля, геологической нарушенности и действия тектонических сил определять наименее удароопасное направление фронта очистных работ, что имеет важное значение для повышения безопасности и эффективности горных работ.

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

- 1) Установлено, что с увеличением глубины ведения горных работ увеличивается диапазон разброса деформационно-прочностных физических свойств, что приводит к увеличению последствий ущерба от аварий, связанных с горными ударами, причины аварий носят преимущественно геомеханический характер.
- 2) Определено, что существующие методы прогноза горных ударов на угольных шахтах основаны на использовании граничных состояний промежуточных главных напряжений σ_2 : обобщённое растяжение, обобщённый сдвиг и обобщённое сжатие. Уточнение σ_2 позволило повысить точность расчётов на 25% (на основании параметра Надаи-Лоде μ_σ).
- 3) Предложен метод и разработана математическая модель уплотняющегося массива, позволяющая комплексно учитывать геологические нарушения, взаимное влияние горных выработок выемочного участка и выработанного пространства, действие тектонических сил, уплотнение и дилатансию. Данная модель

позволяет с высокой долей вероятности определять зоны повышенных напряжений в массиве (величина отклонения от экспериментальных данных не превышает 10%, точность повышается на 20%).

- 4) Разработан алгоритм определения наименее удароопасного направления фронта очистных работ, включающий порядок сбора и обработки данных для численного моделирования с учётом диапазона изменений физических свойств (модуль деформации, коэффициент Пуассона). В качестве критерия удароопасности при выборе направления фронта очистных работ предложен новый коэффициент напряжённости K . Горные работы для условий шахты «Комсомольская» рекомендуется вести при условии $K < 10$.
- 5) Метод прогноза горных ударов на пологих участках угольных пластов включает:
 - изучение характера многоугольников распределения значений максимальных главных напряжений;
 - оценку изменения параметра Надаи-Лоде от выбора направления фронта ведения очистных работ;
 - сопоставление рассчитанной удельной потенциальной энергии с данными сейсмостанции угольной шахты;
 - вывод критерия удароопасности с учётом энергетических уровней (техногенное влияние) и с поправкой на категорию устойчивости при создании выработок выемочного участка.
- 6) Создан алгоритм реализации метода прогноза горных ударов на пологих участках угольных пластов с применением современных теорий, описывающих физические процессы, происходящие в земной коре при разработке месторождений;
- 7) Разработаны «Методические рекомендации по региональному прогнозу горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт», которые переданы в СФ АО «ВНИМИ» и предполагаются к практическому использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). – М.: ИНЭК, 2005. – 252 с.
2. Ажгирей Г.Д. Структурная геология. – М.: МГУ, 1956. – 493 с.
3. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В.Н. Морозова. – М.: Горная книга, 2011. – 592с.
4. Ардашев К.А., Ахматов В.Н., Катков Г.А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления – М.: Недра, 1981. – 128 с.
5. Артемьев В.Б., Диколенко Е.Я., Беликова Н.В. и др. Каталог рекомендуемых способов управления геомеханическим состоянием горного массива для угольных шахт России. – М.: изд. ННЦ ГПП-ИГД им. А.А. Скочинского, 2003. – 98 с.
6. АС СССР 1661420 А1. *Способ прогнозирования дилатансии горных пород на больших глубинах* / Мельникова С.А., Мельников Л.Л.; заявл. 26.04.1989. Опубл. 07.07.1991. Бюл. № 25.
7. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. Том 1. Основы геомеханики. – М.: МГГУ, 2004. – 208 с.
8. Басов В. В. Исследование геомеханического состояния неустойчивых пород в окрестности сопряжений горных выработок // Горные науки и технологии. – 2019. – № 4(1). – с. 23-30. – DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-23-30.
9. Батугин А.С. Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности // Методика и техника ведения маркшейдерских и геологических работ на шахтах и разрезах: Сб. Науч. трудов / ВНИМИ – С-Пб., 1997. – с. 206-213.
10. Батугин А.С. Совершенствование методов оценки геодинамического состояния блочного массива горных пород в целях повышения

- экологической безопасности освоения недр и земной поверхности: Дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.36 Москва, 2008.
11. Батугина И.М. Метод геометризации тектонически напряжённых зон в связи с геодинамическими явлениями при ведении горных работ: Дис. ... д-ра техн. наук : ____ Москва, 1984.
 12. Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. – М., 1962.
 13. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
 14. Ващенко К.С., Пугач А.С. Количественная оценка тектонико-технологического напряжённо-деформированного состояния массива на базе компьютерных решений для безопасной отработки свиты пластов // *Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. научных трудов / под общ. ред. В. Е. Кислякова*. Красноярск: Сиб. федер. у-нт. 2012. С. 88-91.
 15. Ващенко К.С., Пугач А.С. Компьютерный анализ тектонически-технологического НДС массива для безопасной отработки свиты пластов на шахтах Кузбасса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. №8. С. 364-366.
 16. Винников В.А., Высотин Н.Г. Методика проведения испытаний по определению статического модуля упругости горных пород с использованием результатов лазерно-ультразвуковой спектроскопии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. №1 (специальный выпуск 1). С. 90-101.
 17. Волошин В. А., Петров А. А., Васильев П. В. Методика проведения шахтных исследований смещений и деформаций элементов крепи в подготовительных выработках // *Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. ст.* – Новокузнецк, 2007. – С. 70-74.
 18. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975.

19. Гущенко О. И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25.
20. Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. – Иркутск: Иркутский политехнический институт, 1961. – 47 с.
21. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчёт крепи круглой шахты // Инж. работник. – 1925. – №7. – С. 1-12.
22. Дрындин В. А., Макогон Ю. Ф., Москаленко Э. М. Прогнозирование выбросоопасных зон в угольных шахтах. – М.: МГИ, ВНИИГАЗ, 1982. – 72 с.
23. Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Оценка эффективности концентрации энергии в окрестности горных выработок и геологических нарушений // XXVI международная научная школа им. академика С.А. Христиановича "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках" Алушта, 19–25 сентября 2016 года.
24. Захаров В.Н., Фейт Г.Н., Малинникова О.Н. Геомеханика и прогноз возникновения газодинамических явлений в тектонически нарушенных (трещиноватых) газоносных техногенно изменяемых углепородных массивах // Современные проблемы шахтного метана // Сборник научных трудов к 85-летию профессора Н. В. Ножкина. Москва, 2014.
25. Зубков В. В. Разработка методов математического моделирования напряженного состояния массива горных пород для выделения опасных зон при отработке пластовых месторождений: Дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.20 СПб., 2005. – 334 с.
26. Иванов В.В., Зыков В.С., Ли К.Х., Семенцов В.В., Потапов П.В. Определение дополнительных тектонических горизонтальных напряжений вблизи разломов и нарушений в земной коре на основе

- теории разломообразования Андерсона // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 2. С. 6-9.
27. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. (РД-05-350-00) – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.
28. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках: Утв. М-вом угольной пром-сти СССР 02.04.90, 99 [2] – Л.: ВНИМИ, 1991 – 105 с.
29. Каркашадзе Г.Г. Моделирование физических процессов горного производства – М.: МГГУ, 2013, - 98 с.
30. Картозия Б. А. Натурные методы исследования механических процессов в массивах горных пород – М.: МГИ, 1980.
31. Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Полухин П. И., Чиченёв Н. А. Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений – Киев.: Издательство «Наукова думка», 1981. – 583 с.
32. Коньков Г. А. Задачи шахтной геологии в связи с проблемой внезапных выбросов угля и газа. – Воркута: Воркутинский горисполком, 1955 – 86 с.
33. Кравцов А., Иванов П.Н., Малинникова О.Н., Черепецкая Е.Б., Гапеев А.А. Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2019. – № 6. – с. 56-65.
34. Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М. Напряжённое состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. – 1987. – №1.
35. Кропоткин П.Н. Новая геодинамическая модель // Природа. – 1989. – №1.

36. Кропоткин П.Н. Проблемы геодинамики // Тр. ГИН. - М.: 1978. - С. 5-76.
37. Кузьяев Л.С., Олейник К.В., Пугач А.С. Компьютерные технологии в моделировании отработки угольных пластов на глубоких горизонтах шахт ОАО «Воркутауголь» ЗАО «Северсталь-ресурс» // *Научный вестник МГТУ*. 2012. №5. С. 66-74.
38. Кузьяев Л.С., Пугач А.С. Компьютерное обоснование параметров механизированного комплекса с учётом тектоники массива при отработке свиты пластов // *2-ая Российско-Китайская научная конференция Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах*. Новосибирск: 2012. С. 456 – 459.
39. Кузьяев Л.С., Пугач А.С. Метод компьютерного анализа опасных геодинамических процессов на глубоких горизонтах шахт Воркутинского месторождения // *Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27-31 июля*. Владивосток: 2014.
40. Кузьяев Л.С., Пугач А.С. Разработка алгоритма построения механико-математической модели выбросов угля и газа на шахтах Воркутского угольного месторождения // *Научный вестник МГТУ*. 2010. №5. С. 30-35.
41. Курленя М. В., Серяков В. М., Ерёменко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
42. Кучай В. К Трансформация тектонических движений // *Геотектоника*. – 1983. – № 3 – С. 3-14.
43. Лизс Ч. Структурная геология. – М.: Государственное объединённое научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935. – 286 с.

44. Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. – 2020. – № 5(1). – с. 30-38. – DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.
45. Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. – Л.: Наука, 1977. – 213 с.
46. Методические указания по прогнозу сдвижений и деформаций земной поверхности и определение нагрузок на здания при многократных подработках. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 96 с.
47. Миренков В. Е., Шутов В. А. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений. – Новосибирск: Наука, 2009. – 176 с.
48. Михайлов Ю.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю. Безопасность жизнедеятельности. Моделирование и анализ полей напряжений в породных массивах: практикум. – М.: Изд-во МГОУ, 2011. – 53 с.
49. Молчанов А.Е. Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в зонах активных разломов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции. В 2-х томах. Т. 1. – М.: ИФЗ, 2008. – С. 152-154.
50. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Дядьков П.Г. Математическое моделирование кинематики плит Центральной Азии // ФТРПИ. – 2002. – № 5. – С. 3-9.
51. Николаев П. Н. Методика тектонодинамического анализа / под ред. Н. И. Николаева. – М.: Недра, 1992. – 295 с.
52. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. – М.: Недра, 1996. – 448 с.
53. Пейве А.В. Глубинные разломы в геосинклинальных областях //

- Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1945. – № 5.
54. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. – М.: Недра, 1996. – 218 с.
 55. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. – М.: Недра, 1972. – 229 с.
 56. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
 57. Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С. И др. Расчётные методы в механике горных ударов и выбросов : Справочное пособие – М.: Недра, 1992. - 256 с.
 58. Плёткин И.А., Пугач А.С. Применение компьютерного моделирования при освоении подземного пространства шахт, рудников и мегаполисов // *Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 1-3 октября 2013 г.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. С. 355-362.
 59. Попков Ю. Н., Прокопов А. Ю., Прокопова М. В. Информационные технологии в горном деле: Учебное пособие / Шахтинский институт (филиал) – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 202 с.
 60. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок на угольных месторождениях (ПБ 07-269-98) – Л.: М-во топлива и энергетики РФ, РАН, ВНИМИ. – 1998.
 61. Прогнозирование зон возможной тектонической нарушенности: <https://www.micromine.ru>. 2017. URL: <https://www.micromine.ru/possible-zones-of-tectonic-disturbance-prediction/> (дата обращения: 31.12.2021)
 62. Пугач А.С. Геомеханическое обеспечение горных и горно-строительных работ. Ч.1. Геомеханическое обеспечение подземных горных работ: учебное пособие / А.С. Пугач; под ред. Л.С. Кузьева. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 137 с.

63. Пугач А.С. Компьютерное моделирование начального поля напряжений для прогнозирования горных ударов // Проблемы недропользования. – 2022. – № 1(32). – С. 25–37.
64. Пугач А.С. Компьютерное моделирование тектонических напряжений Воркутской мульды с целью прогнозирования выбросоопасных зон // *Рудник будущего*. Пермь: 2011. №3. С. 90-92.
65. Пугач А.С. Компьютерное моделирование технологических процессов с целью обоснования высокоэффективной и безопасной отработки угольных пластов на глубоких горизонтах шахт ОАО «Воркутауголь» ЗАО «Северсталь-ресурс» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – №5. – С. 402-405.
66. Пугач А.С. Компьютерное обоснование оптимальных значений опережения под-, надрабатывающих пластов в свите для условий Воркутского угольного месторождения // *Proceeding of the V-th international geomechanics conference*. Varna: 2012. p. 410-413.
67. Пугач А.С. Компьютерный аудит инцидентов на глубоких горизонтах угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – №6. – С. 65-67.
68. Пугач А.С. Применение математической модели уплотнения горных пород при оценке ведения работ в условиях тектонически-напряжённых зон // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6. – С. 167–181. (ВАК, Scopus)
69. Пузырёв В.Н., Чернов О.И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. – М.: Недра, 1979.
70. Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. – М.: Наука, 1968. – 107 с.
71. Ромашов А.Н., Цыганков С.С. Моделирование блочных структур в верхних слоях Земли // *Динамические процессы в геосферах*. – М., 1994.

72. Ромашов А.Н., Цыганков С.С. Модель поведения Земли как единой конструкции // Деформирование и разрушение горных пород. – Бишкек, 1990.
73. Ромашов А.Н., Цыганков С.С. О природе аномальных напряжений в верхних слоях Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990 – №4.
74. Ромашов А.Н., Цыганков С.С. О природе тектонических напряжений в земной коре // Горный журнал. – 1996. – №7-8 – с. 41 -44.
75. Сдвижение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР. – М.: Углетехиздат, 1958. – 252 с.
76. Сергунин М.П., Еременко В.А. Определение параметров исходного поля напряжённого состояния на руднике «Заполярный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №4. – С. 63-74. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-63-74
77. Сидоров Д.В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения / Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В // Записки Горного института. 2018. №. 234. С. 604- 611. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.604
78. Сим Л.А. Выявление новейших активизированных разломов в условиях слабообнаженных районов (на примере зоны сочленения Мезенской синеклизы и Среднего Тимана): Дис. ... канд. геол.мин. наук. М.: МГУ, 1980.
79. Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряжённое состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 326–350.
80. Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. - М.: Недра, 1977. – кол-во стр.
81. Субботин А. И., Беляк Л. А., Каледина Н. О. и др. Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ 05-618-03). Серия 05. Выпуск 11 – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-

- технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 296 с.
82. Спенсер Э.У. Введение в структурную геологию. Пер. с англ./Под ред. Ю.Е. Погребицкого – Л.: Недра, 1981. – 367 с.
83. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
84. Технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. Часть 2. Набор модулей и пояснительная записка / МУП СССР, Гл. научно-техническое управление АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: изд-во ИГД им. А.А. Скочинского, 1991.
85. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
86. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.
87. Трушко О.В. Оценка геодинамической устойчивости горных выработок глубоких рудников // Наука, техника и образование / Science, technology and education. – 2015. – № 2(8).
88. Трушко О.В., Петров Д.Н., Стрелецкий А.В. Обеспечение устойчивости горных выработок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 2. – с. 51-55.
89. Устинов, Д. В. Влияние выбора модели вмещающего массива на результаты моделирования проходки перегонных тоннелей метрополитена // Геотехника. – 2018. – Т. 10. – № 5-6. – С. 34-50.
90. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» [Электронный ресурс]: Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря

2020 года N 515. Доступ из Электронного фонда правовых и нормативных документов.

91. Хаин В.Е., Шейнманн Ю.М. Сто лет учения о геосинклиналях // Советская геология. – 1960. – № 11.
92. Хлопцов Д.В., Винников В.А. Определение давления горных пород на крепь скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №8. – С. 74-82.
93. Шинкарьук В.А. Оценка параметров устойчивости горного массива в процессе ведения подземных работ на основе сейсмических и инженерно-геологических данных: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013.
94. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. № 2. – с. 34-47.
95. Яковлев Д.В., Исаев Ю.С., Мулев С.Н. и др. «Аппаратно-программный комплекс «Geo Info Trans Sistem (GITS) в системах геодинамического и экологического мониторинга», Междун.конф. «Горная геофизика», 22-25 июня 1998 г. С-Пб, ВНИМИ.
96. Ярошевский В. А. Тектоника разрывов и складок. - М.: Недра, 1981. – кол-во стр.
97. Argiris J.H. Triangular elements with linearly varying strain for the matrix displacement method // J. Roy. Aeron. Soc. – 1965. – Vol. 69. – pp. 711-713.
98. Becker G. F. Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks. Bull. Geol. Soc. of America, vol. 4, 1893.
99. Bolton M. D. The Strength and Dilatancy of Sands // Geotechnique. – 1986 – Vol. 36, № 1. – pp. 65-78.

100. Brinkgreve R. B. J. Plaxis. – Lisse / Abingdon / Exton (PA) / Tokyo: A. A. Balkema publishers, 2002.
101. Cundall P., Strack O. A distinct element model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – №29. – p. 47-65.
102. Coussy O. Poromechanics. – John Wiley & Sons Ltd, 2004. – p. 312.
103. Duncan J.M., Chang C.-Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil. *ASCE Journal of the Soil Mechanics And Foundation Division*, 1970, Vol. 96, pp. 1629-1653.
104. Farazmand A., Newcomb S., Missen J. Loy Yang mine ground movement investigation and modeling (case study) // 5th Asian rock mechanics symposium, Tehran, 2008.
105. Fotieva N. N., Bulychev N. S., Deev P.V., Vladova V.V. Design of support of multiple non-circular workings in tectonic areas // 21st world mining congress & expo 2008, Krakow, Poland 10.09.2008 – Vol. 53 – №3, pp. 361-370.
106. Ghazar R., Hadj-Hassen F., Tijani M. A new numerical model to study isolated rock block around underground excavations taking into account in-situ stresses // 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. – San Fransisco 2011.
107. Goodman R.E. Analysis in jointed rocks // *Finite Elem. Geomech.* – London e.a., 1977.
108. Goodman R.E., Dubois J. Duplication of dilatancy in analysis of joint rocks // *J.I Soil Mech. Div.: Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* – 1972. – Vol. 98, N 4. – P. 399-422.
109. Goodman R.E. Introduction lecture on finite element analysis for jointed rocks // *Cours. Lect. CJSM: Int. Cent. Mech. Sci.* – 1974. – № 165.
110. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // *Advanced in Rock Mechanics: Proc. Third. Congr. Intern. Soc. Rock Mech.* – Washington, D.C., 1974. – Vol. 1, Pt. A. – P. 127-140.

111. Hast N. The state of stresses in the upper part of the Earth's crust. // *Tectonophysics*, 1969. – vol.8, № 3. – P. 169-211.
112. Hrubešová E., Kaláb Z., Kořínek R., Žůrek P. Geotechnical monitoring and mathematical modeling in medieval mine Jeroným (Czech Republic) // *Gornictwo i Geoinżynieria*. – 2007. – Rok 31, Zeszyt 3. – s. 183-190.
113. Janbu J. Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests. *Proc. ECSMFE Wiesbaden*, 1963, Vol. 1, pp. 19-25.
114. Kobylkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126-136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136> (BAK, Scopus)
115. Kondner R. L. A Hyperbolic Stress Strain Formulation for Sands. 2. *Pan. Am. ICOSFE Brazil*, 1963, Vol. 1, pp. 289-324.
116. Kovtanyuk L. V., Panchenko G. L. On Compression of a Heavy Compressible Layer of an Elastoplastic or Elastoviscoplastic // *Medium. Mechanics of Solids*. – 2017. – Vol. 52. – № 6. – P. 653-662. – DOI 10.3103/S002565441706005X.
117. Lan T., Sun J., Batugin A. S., Jia W., Zhang Z. Dynamic characteristics of fault structure and its controlling impact on rock burst in mines. *Shock and Vibration*. 2021;2021:7954876 <https://doi.org/10.1155/2021/7954876>
118. Malinnikova O., Uchaev D., Uchaev D., Malinnikov V. The Study of Coal Tectonic Disturbance Using Multifractal Analysis of Coal Specimen Images Obtained by Means of Scanning Electron Microscopy // 1st International Scientific Conference "Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Massifs", GHCRRM 2019 Vladivostok, 15–22 июля 2019 года.
119. Mead W.J The geological role of dilatancy // *Journal Geological*. – vol. 33. – 1925. – P. 678-685.
120. Minster J.B., Jordan T.H., Molnar P., Haines E. Numerical Modelling of Instantaneous Plate Tectonics. "Geophys. J. R. A. Soc.", 1974.

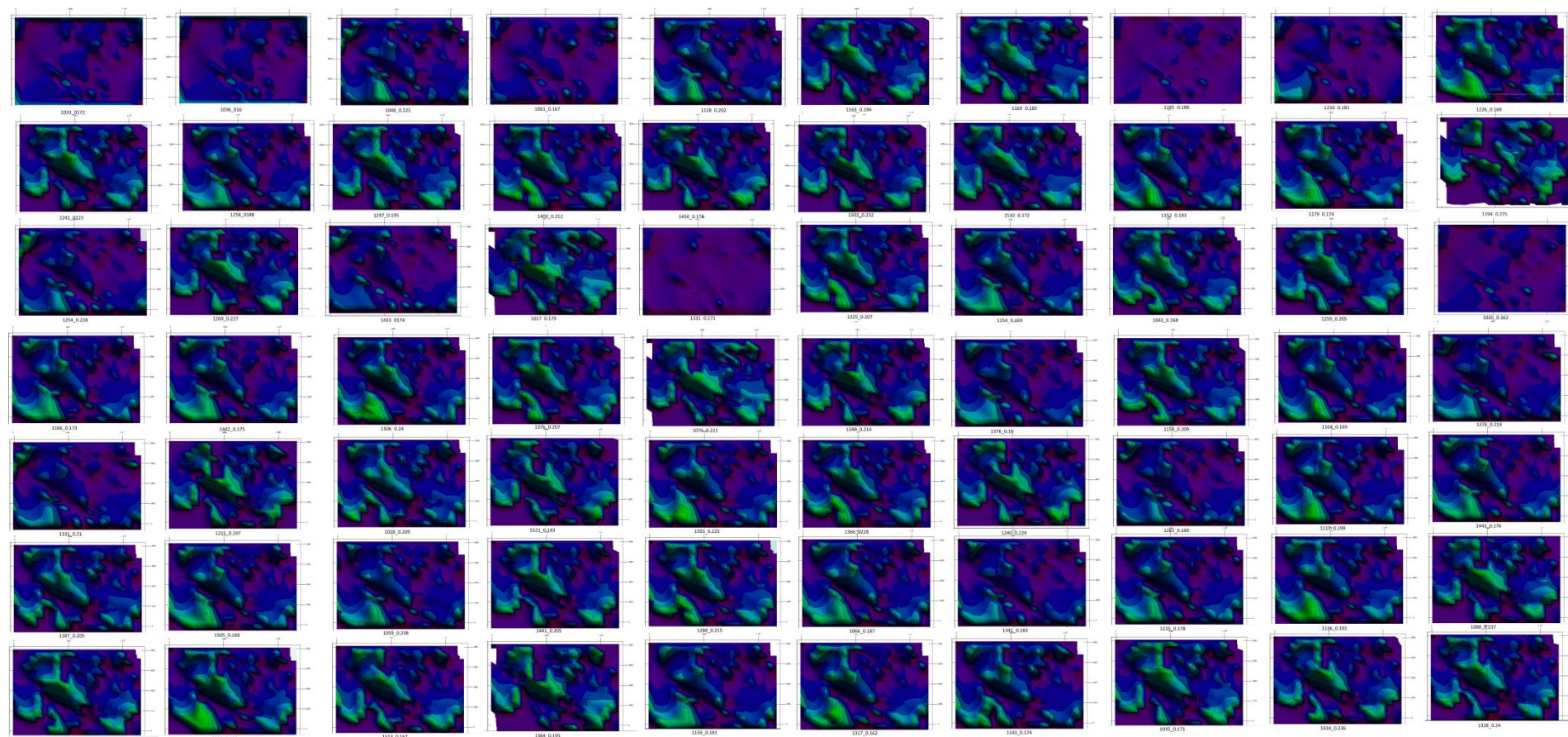
121. Mustafin M. Forecasting hazardous areas when mining coal layers // Int. Soc. for Mine Surveying XIII Int. Congr. – Aachen, Germany. – 16-20 September 2013. – pp. 201-205.
122. Naylor M. A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states // J. Struct. Geol. 1986. V. 8. P. 737-752.
123. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. Int. J. Solids & Struct. Vol. 15, pp. 529-551. 1979.
124. Rouvray A.L., Goodman R.E. Finite element analysis of crack initiation in a block model experiment // Rock Mech. – Vol. 4, № 4. – 1972.
125. Schanz T., Vermeer P.A. Angles of Friction and Dilatancy of Sand // Geotechnique. 1996 – № 46. – pp. 145-151.
126. Sylvester G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull.. 1988. V. 100, No 31. P. 1666-1703.
127. Turner M., Clough R., Martin H., Topp L. Stiffness and deflection analysis of complex structures // J. Aero. Sci. – 1956. – Vol. 23, № 9. – pp. 805-823.
128. Vermeer P. A. A modified initial strain method for plasticity problems. In: Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech. Balkema, Rotterdam, pp. 377-387. 1979
129. Vermeer P. A., Van Langen H. Soil collapse computations with finite elements // Ingenier-Archiv 59. – 1989 – pp. 221-236.
130. Vermeer P.A., Van Langen H. Automatic step size correction for non-associated plasticity problems. Int. J. Num. Meth. Eng. Vol. 29, pp. 579-598. 1990.
131. von Soos P. Properties of Soil and Rock (in German), 1990, Grundbautaschenbuch Part 4, Edition 4, Ernst & Sohn, Berlin.
132. Zakharov V.N., Malinnikova O.N. Modeling geomechanical and geodynamic behavior of miningaltered rock mass with justifying mechanisms of initiation and growth of failure zones // International

European Rock Mechanics Symposium, Eurock 2018 Saint Petersburg, 22–
26 мая 2018 года

133. http://ukrainiancomputing.org/LEBEDEV/Lebedev_r.html – 07.05.2013 г.
134. http://www.mines-paristech.fr/Donnees/data16/1640-brochure_CIC_2013.pdf – 05.04.2014 г.
135. <http://www.itascacg.com/> – 08.04.2014 г.

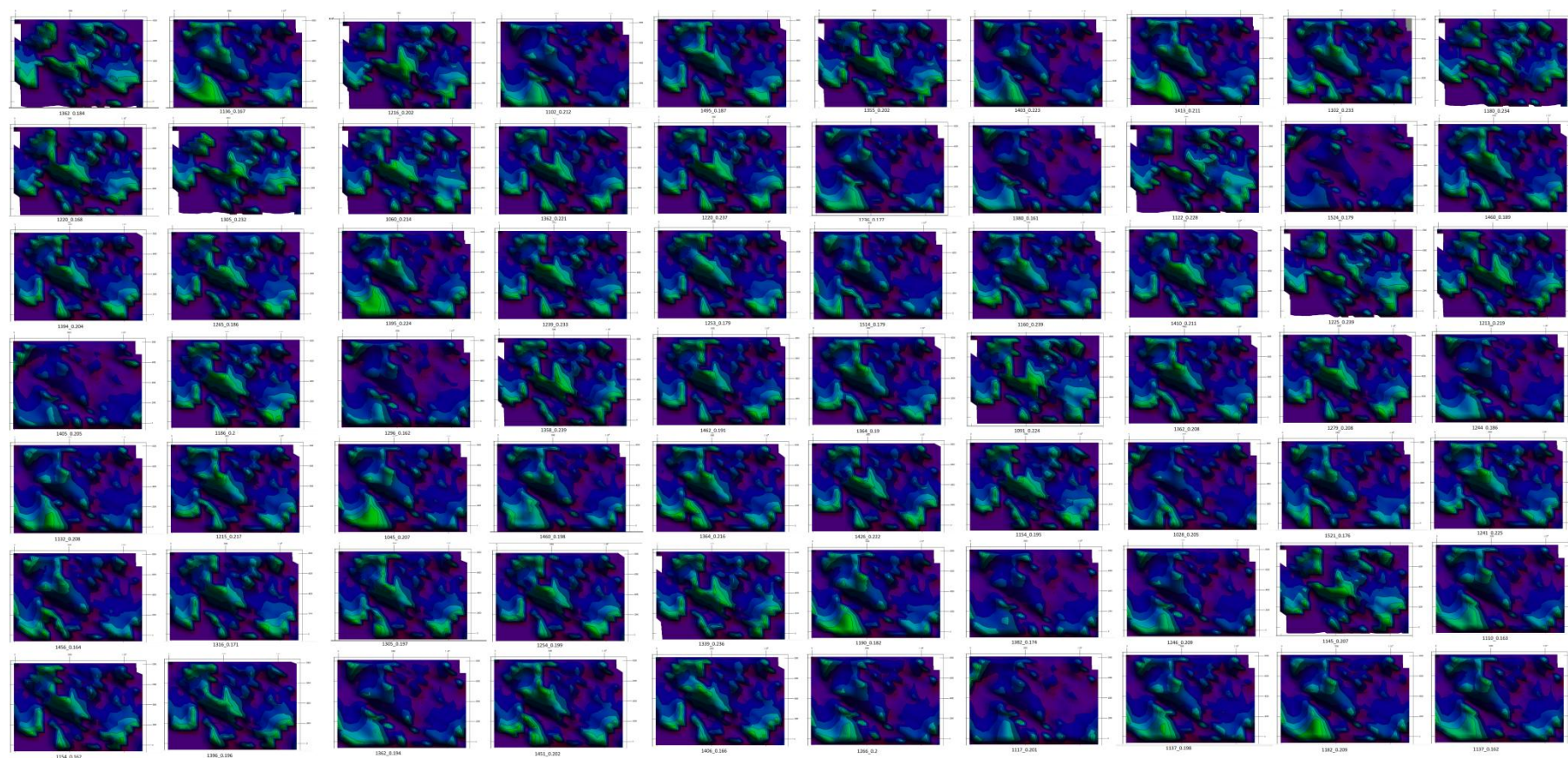
Карта значений главных напряжений

σ_1

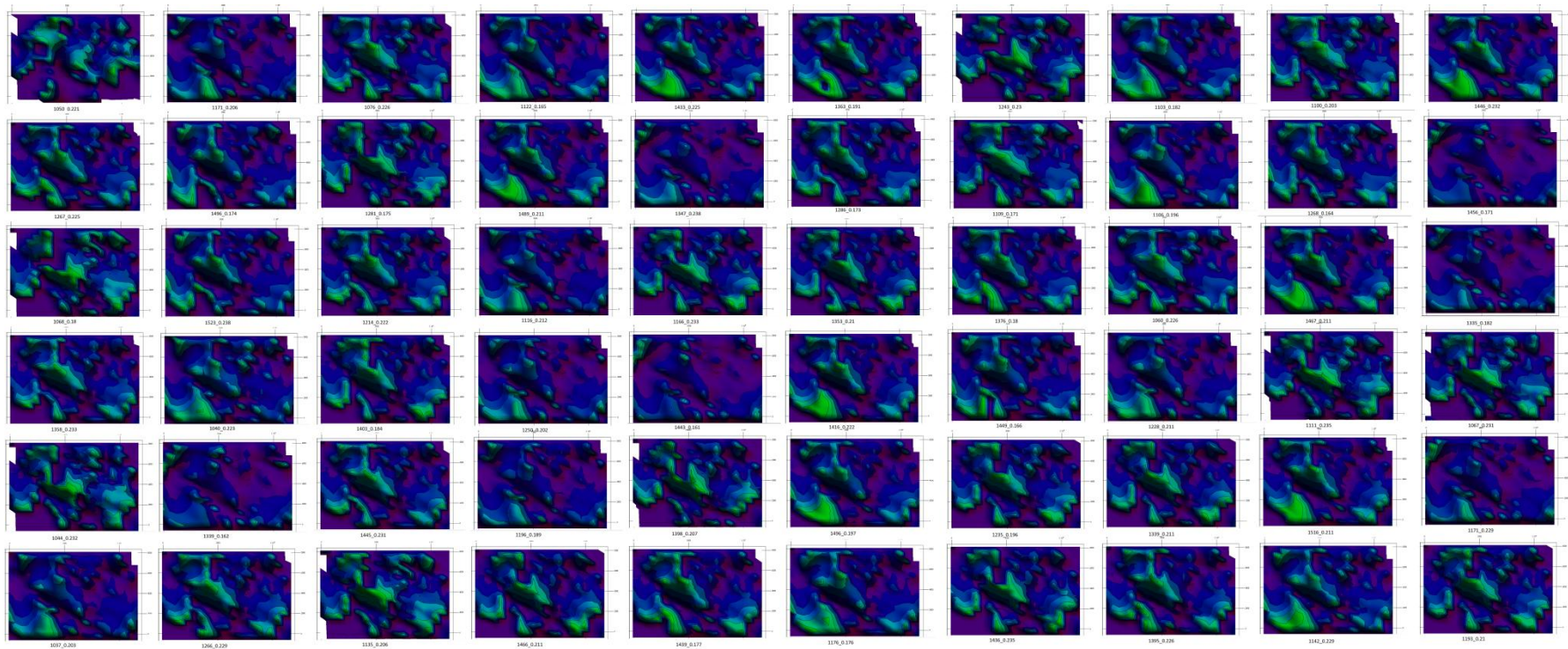


Карта значений главных напряжений

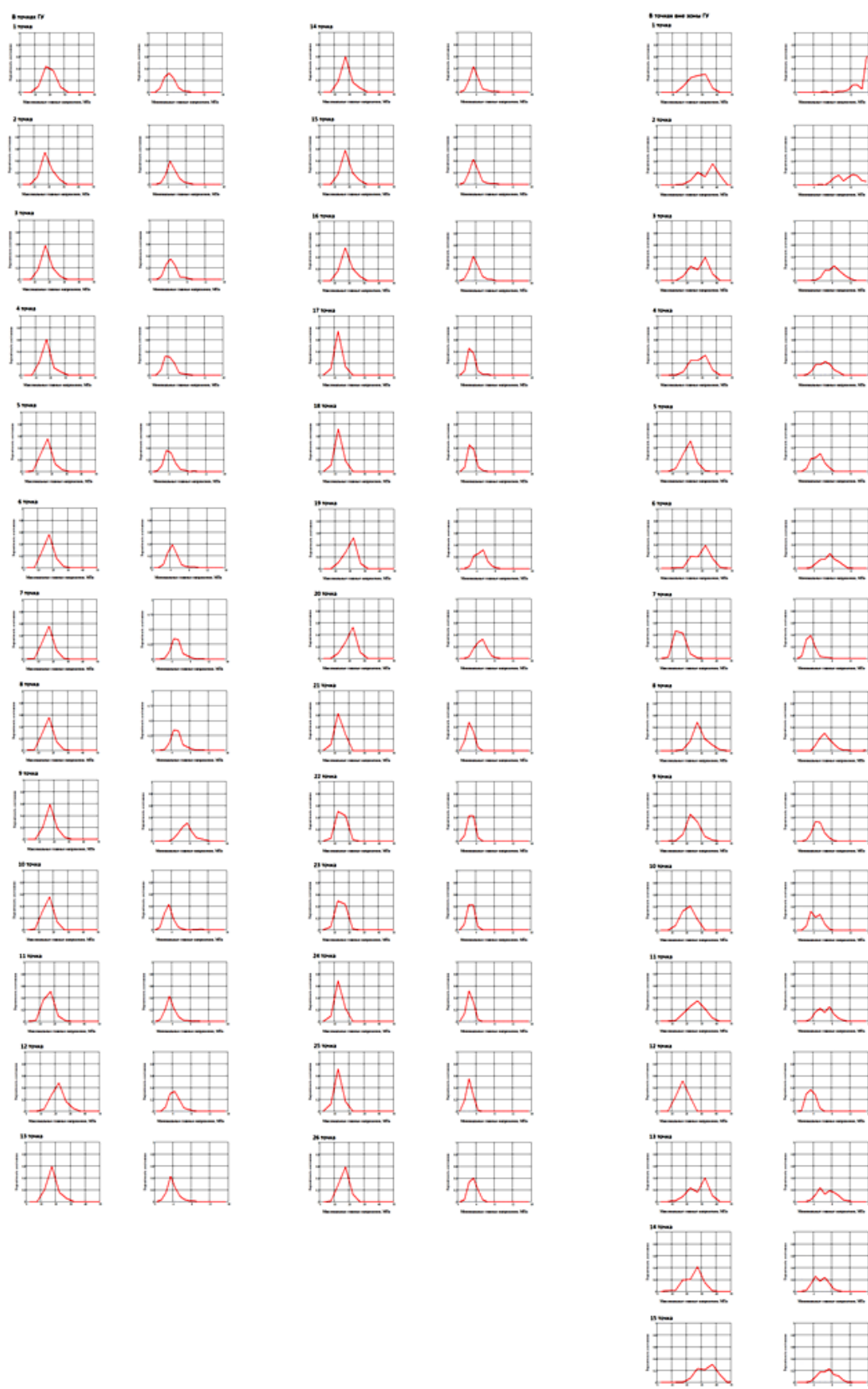
σ_1



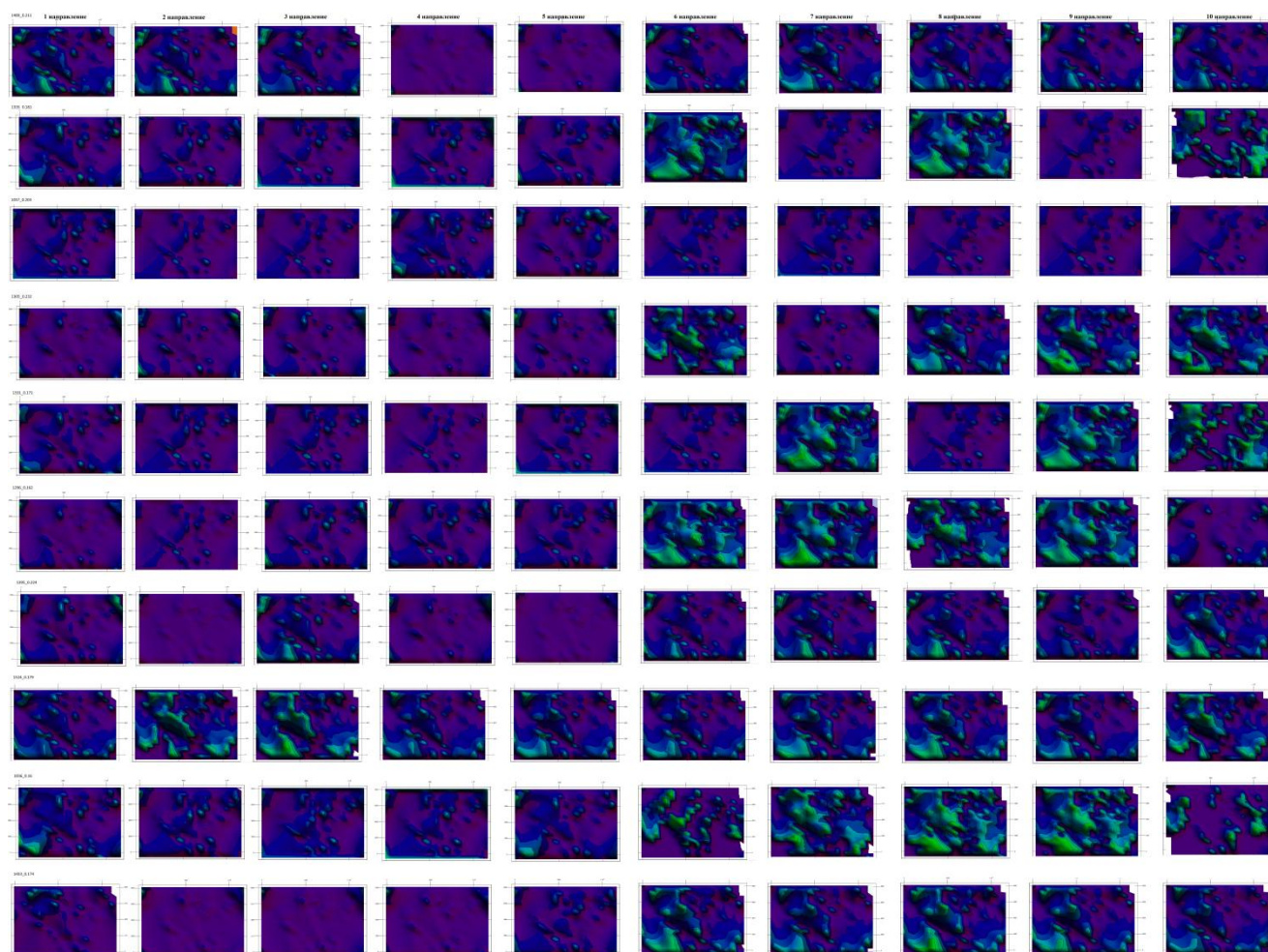
Карта значений главных напряжений σ_1



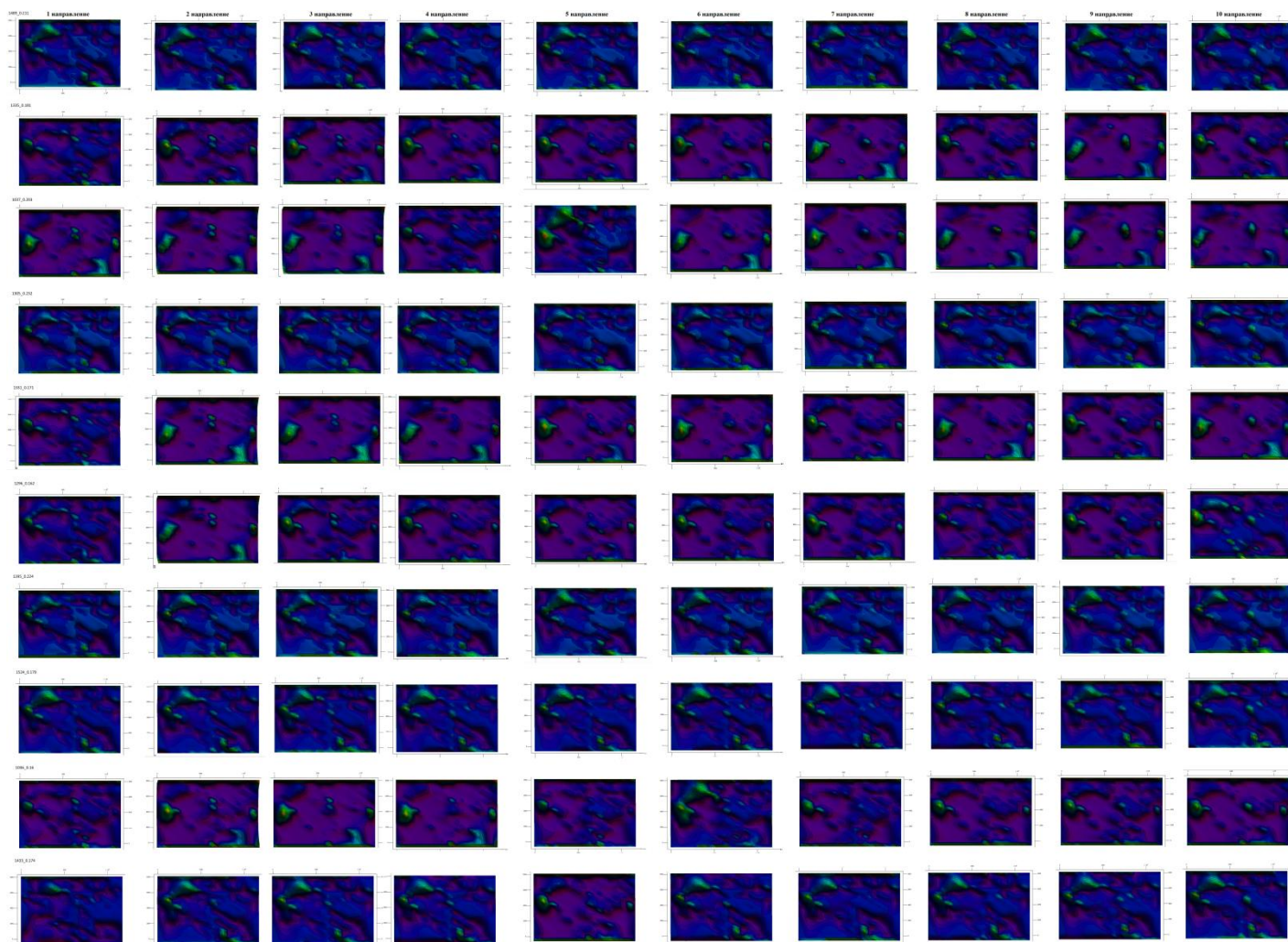
Многоугольники распределения максимальных главных и минимальных главных напряжений



Карта значений удельной потенциальной энергии при различной ориентации выемочного участка

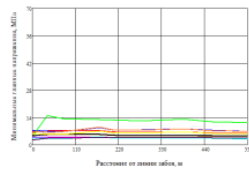
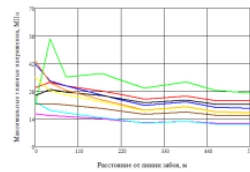


Карта значений параметра Надаи-Лоде при различной ориентации выемочного участка

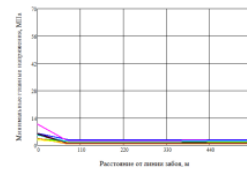
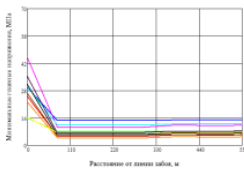


Распределение максимальных и минимальных главных напряжений вдоль направления фронта очистных работ

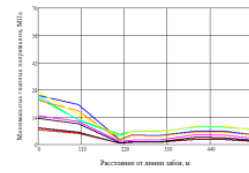
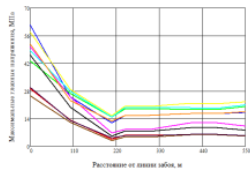
1 направление



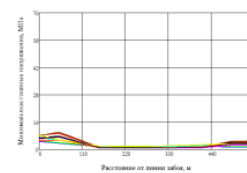
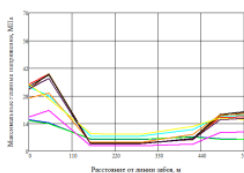
6 направление



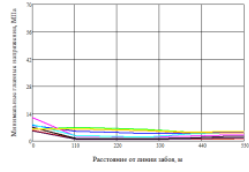
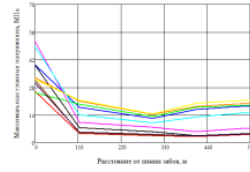
2 направление



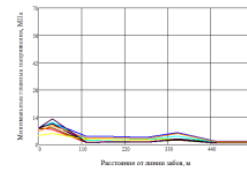
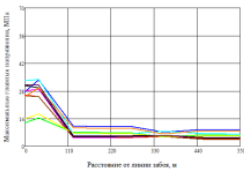
7 направление



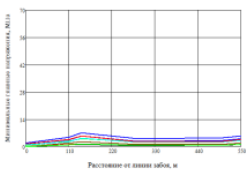
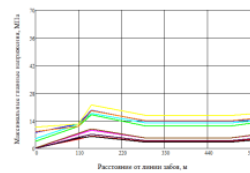
3 направление



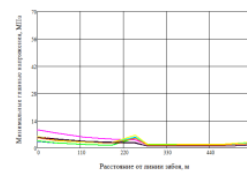
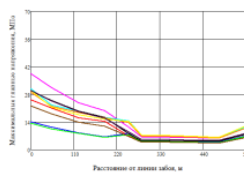
8 направление



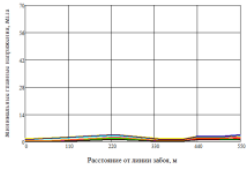
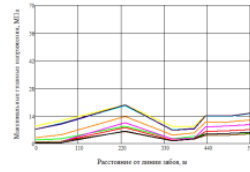
4 направление



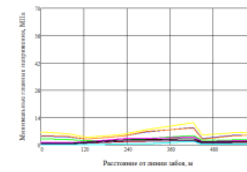
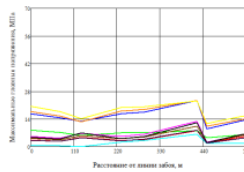
9 направление



5 направление



10 направление



- $E = 1489 \text{ МПа}; \nu = 0,211$
- $E = 1335 \text{ МПа}; \nu = 0,181$
- $E = 1037 \text{ МПа}; \nu = 0,203$
- $E = 1305 \text{ МПа}; \nu = 0,232$
- $E = 1296 \text{ МПа}; \nu = 0,162$
- $E = 1395 \text{ МПа}; \nu = 0,224$
- $E = 1524 \text{ МПа}; \nu = 0,179$
- $E = 1036 \text{ МПа}; \nu = 0,160$
- $E = 1331 \text{ МПа}; \nu = 0,171$
- $E = 1433 \text{ МПа}; \nu = 0,174$

**Справка о практическом применении «Методических рекомендаций по
региональному прогнозу горных ударов на пологих участках пластов
угольных шахт**



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА –
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВНИМИ
СИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ

Пр. Гагарина, 24, г. Прокопьевск, Кемеровская область, 653004, Россия
Телефон (3846) 66-77-33, факс (3846) 62-23-84
E-mail: vnimi@inbox.ru

Справка

Результаты диссертации Пугача Александра Сергеевича «Разработка метода регионального прогноза горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» в виде документа «Методические рекомендации по региональному прогнозу горных ударов на пологих участках пластов угольных шахт», представляют интерес для организации и предполагаются к практическому использованию.

Директор СФ АО "ВНИМИ"



Е.А. Разумов