

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные руководители

кандидат технических наук Кузьяев Лев Сергеевич доктор технических наук Кобылкин Сергей Сергеевич
--

Москва – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 прослеживать 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 обрабатываемого 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, заключения и 6 приложений, содержит 45 рисунков, 5 таблиц, список литературы включает 135 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу аварийности на угольных шахтах, анализу методов прогноза динамических явлений, аналитическим исследованиям и основным вычислительным подходам, в том числе осуществляемым с применением современных компьютерных программ. Актуальные вопросы определения тектонически напряжённых и геодинамически опасных зон отражены в исследованиях учёных, работавших в КузПИ (ныне КузГТУ), ОАО ННЦГП ИГД им. А.А. Скочинского, АО «ВНИМИ», ФЛ Институт ПечорНИИПроект, АО «НЦ ВостНИИ», АО «Воркутауголь», КузГТУ, ФГБУН ИПКОН РАН, ФГБОУ ВПО МГГУ (ныне МГИ в составе ФГАОУ «НИТУ «МИСиС»), СПбГУ, ИГД СО РАН. В этих исследованиях обоснована безопасность работ при добыче угля.

Термин «тектонически напряжённые зоны» применительно к вопросам геомеханики был введён И.М. Батугиной в рамках докторской диссертации.

Основополагающие теории, научные представления о процессах формирования дизъюнктивных нарушений, влиянии технологического воздействия, тектонических сил, действии горизонтальных составляющих горного давления на углепородный массив и в смежных областях выдвигали Г.Д. Ажгирей, Е. Андерсон, И.М. Батугина, А.С. Батугин, И.В. Баклашов, Г. Беккер, В. Берлер, М.П. Бондаренко, В.М. Вернигор, М.В. Гзовский, О.И. Гущенко, В.Н. Данилович, Б.В. Залесский, В.Н. Захаров, В.С. Зыков, В.В. Иванов, В.И. Иванов, Б.А. Картозия, П.Н. Кропоткин, А.М. Линьков, Г.А. Марков, О.Н. Малинникова, П.Н. Николаев, Д.Н. Осокина, Е.И. Паталаха, И.М. Петухов, П.А. Ребиндер, Ю.А. Розанов, Д.В. Сидоров, А.А. Скочинский, И.А. Турчанинов, В.Л. Шкуратник, Г.Н. Фейт, В.В. Эз, В.С. Ямщиков и др. Эти теории были применены при физическом моделировании, которое осуществляли следующие исследователи: С.А. Борняков, А. Добрэ, Х. Кедель, Г. Клоос, Э. Клоос, Г.Н. Кузнецов, Т. Липк, А.В. Михайлова, В.Д. Парфёнов, Э. Рейер, В. Ридель, С.С. Стоянов, И.С. Чаленко и др.

В развитии методов компьютерного моделирования геомеханических процессов следует выделить учёных А.С. Вознесенского, В.В. Зубкова, В.А. Ерёменко, В.Н. Морозова, М. Тиджани, Е.Б. Черепецкую и др.

Среди компьютерных пакетов программ, в которых производят соответствующие геомеханические расчёты, следует отметить SUIT2D, SUIT3D, BLOCKS2D, FAULT3D, LAYERS3D, GEODYN, ANSYS, COMSOL Multiphysics, PLAXIS, ABAQUS, FLAC, UDEC, VIPLEF и др.

Анализ аварийности отечественных угольных шахт за последние 10 лет, связанной с динамическими явлениями, показывает относительное постоянство

частоты случаев обрушений и внезапных выбросов (рисунок 1а). При этом наблюдается значительное число пострадавших (рисунок 1б) и погибших людей (рисунок 1в).

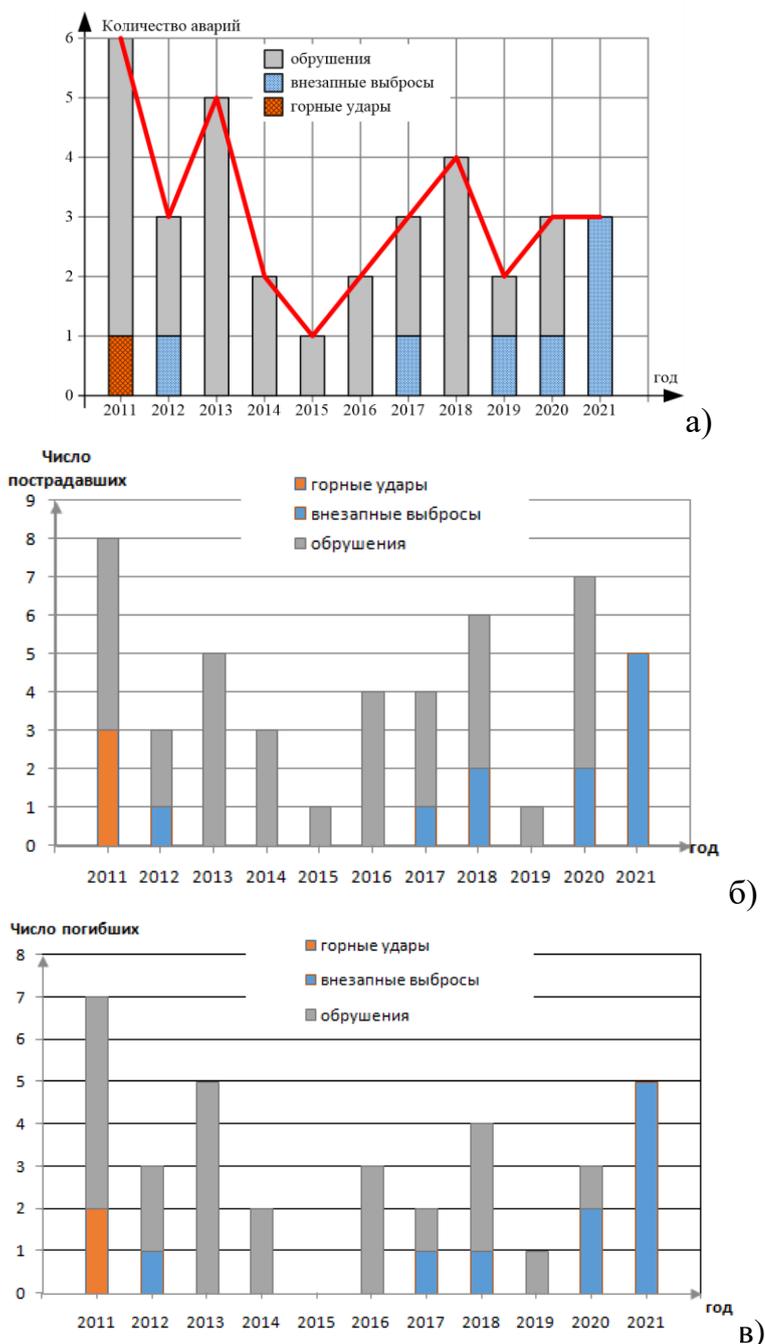


Рисунок 1 – Причины аварийности (по фактору динамических явлений): а) распределение аварий по годам; б) распределение пострадавших и в) погибших вследствие обрушения горных пород, горных ударов и внезапных выбросов (данные ВГСЧ)

Для обоснования безаварийных технологий ведения горных работ осуществляют прогноз горных ударов. Выделяют региональный, локальный и текущий прогнозы. Первый этап (региональный) позволяет оценить общую закономерность протекания физических процессов и характер перераспределения напряжений. 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 динамических явлений (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.

В работах д.т.н., проф. А. С. Батугина рассматриваются новые тектонофизические методы определения ориентации главных напряжений. Определяются параметры, позволяющие оценить соотношение между величинами главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 , ориентацией нарушений в пространстве и учитывающие морфологию сместителя нарушения. На основании данных значений строятся стереограммы, определяющие опасность при различном положении сместителя относительно максимальных нормальных главных напряжений σ_1 , при различных значениях параметра Надаи-Лоде μ_σ .

Нормальные к плоскости сместителя нарушения 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 растяжение, обобщённое сжатие, обобщённый сдвиг соответственно). Более строгое определение σ_2 позволит уточнить результаты расчёта, что применяется в предлагаемом методе прогноза. Проведённый анализ позволил сформулировать цель и решаемые задачи работы.

Во второй главе рассмотрены физические процессы и описаны факторы, влияющие на формирование напряжённо-деформированного состояния массива. Такое рассмотрение позволило разработать многофакторную математическую модель уплотняющегося массива, предлагаемую для осуществления регионального прогноза горных ударов на глубоких горизонтах угольных шахт в условиях геологической нарушенности угольных пластов и под действием тектонических сил.

В отличие от модели Кулона-Мора в разработанной модели задаются дополнительные модули деформации: секущий модуль E_{50} , модуль деформации при нагружении образца при всестороннем сжатии E_{oed} (при исключении его поперечного расширения) и модуль общей деформации при трёхосной разгрузке E_{ur} .

Для определения параболической формы огибающей кругов Мора предлагается использовать уравнение:

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

где

$$B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1, \quad (2)$$

$$C = B \cdot \sigma_p. \quad (3)$$

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 с поправками Дж. М. Дункана и Ц.-Й. Чанга

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \cdot \frac{\sigma}{1 - \sigma/\sigma_a}, \quad (4)$$

где ε_1 – продольные деформации, σ_a – асимптотическое девиаторное напряжение.

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

$$\sigma_a = \frac{\sigma_f}{R_f}, \quad (5)$$

$$\sigma_f = (C \cdot \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_3) \cdot \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (6)$$

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

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

$$2E_{50} < E_{ur} < 20E_{50}, \quad (7)$$

$$0,1E_{50} < E_{oed} < 3E_{50}. \quad (8)$$

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

Модули деформации под влиянием действующих в массиве сил изменяются в процессе уплотнения. Для учёта этого 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

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \cdot \left(\frac{\sigma}{p^{\text{ref}}} \right)^m, \quad (9)$$

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 по Дж. Джанбу, значения для горных пород следует принимать в диапазоне $0,5 < m < 1,0$.

$$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = \frac{p^{\text{ref}}}{\lambda^*}. \quad (10)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1+e_0)}. \quad (11)$$

В выражении (10) модули деформации, определяются при нагружении образца в условиях всестороннего сжатия, для конкретных эталонных давлений p^{ref} . Кроме того, начальный модуль деформации при нагружении образца имеет отношение к модифицированному коэффициенту 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

$$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = \frac{3p^{\text{ref}}(1-2\nu_{\text{ur}})}{k^*}, \quad (12)$$

$$k^* = \frac{k}{(1+e_0)}. \quad (13)$$

Значение угла дилатансии для угля определяется графическим путем (рисунок 2а) 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

$$\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2, \quad (14)$$

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

Аналогичным образом определяют угол дилатансии для песчаника (рисунок 2б).

Из рисунка 2 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \sin \psi}{1 - \sin \psi}, \quad (15)$$

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

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{2(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right). \quad (16)$$

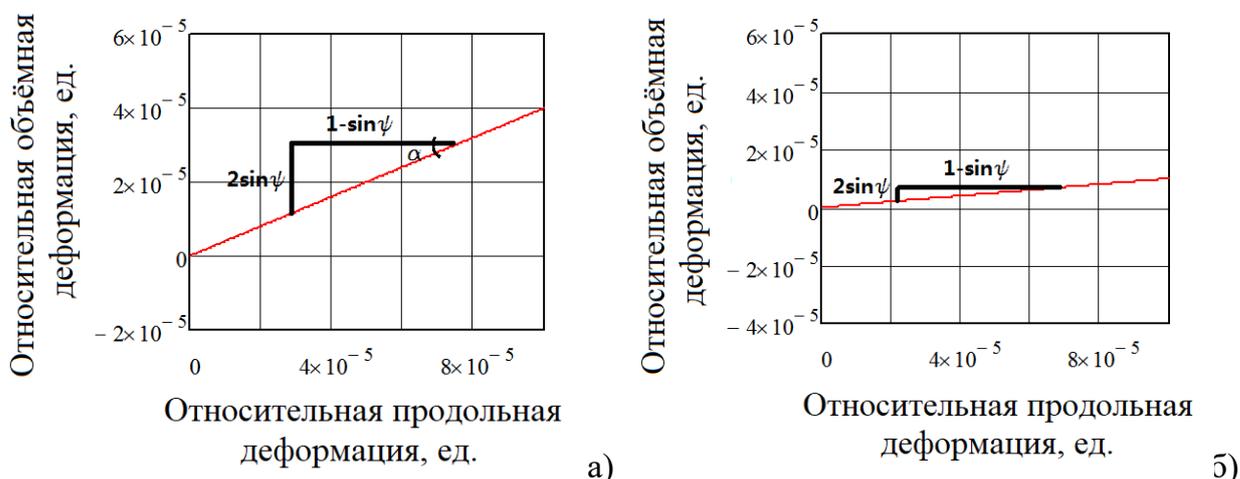


Рисунок 2 – Определение угла дилатансии для угля (а) и песчаника (б)

Базой для применения метода прогноза служит проектная документация, паспорта ведения горных работ с учетом требований в области промышленной безопасности. В качестве исходной информации используются планы горных работ с выделенными тектонически нарушенными зонами. На основании документов строится геометрическая модель и проводятся расчёты. При последующем анализе полученных результатов выполняют оценку потенциальной возможности проявления горных ударов. Если состояние превышает выбранный критерий удароопасности, то предлагается рассмотреть возможность изменения направления фронта очистных работ или дополнительные мероприятия для снижения НДС в зоне ведения горных работ.

Верификация разработанной математической модели, проведенная для ряда контрольных задач, показала возможность ее применения для одновременного учета зоны ослабления: около выработанного пространства, вблизи геологических нарушений, – а также мест, подверженных влиянию тектонических сил Т. Оценка величины отклонения результатов, полученных по разработанной модели от экспериментальных данных, не превышает 10 % (рисунок 3). Положительная сходимость подтвердила обоснованность предлагаемой математической модели.

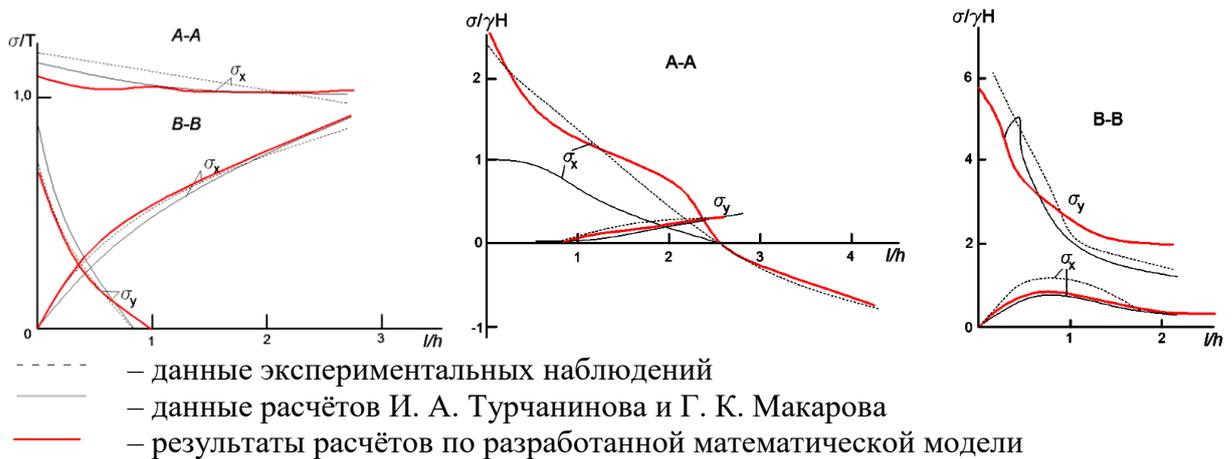


Рисунок 3 – Линии равных отношений σ_x/T , σ_y/T , $\sigma_x/\gamma H$ и $\sigma_y/\gamma H$

Создания комплексная модель позволяет проследить взаимное влияние нескольких факторов, характерных для каждого конкретного случая в зоне ведения добычных работ.

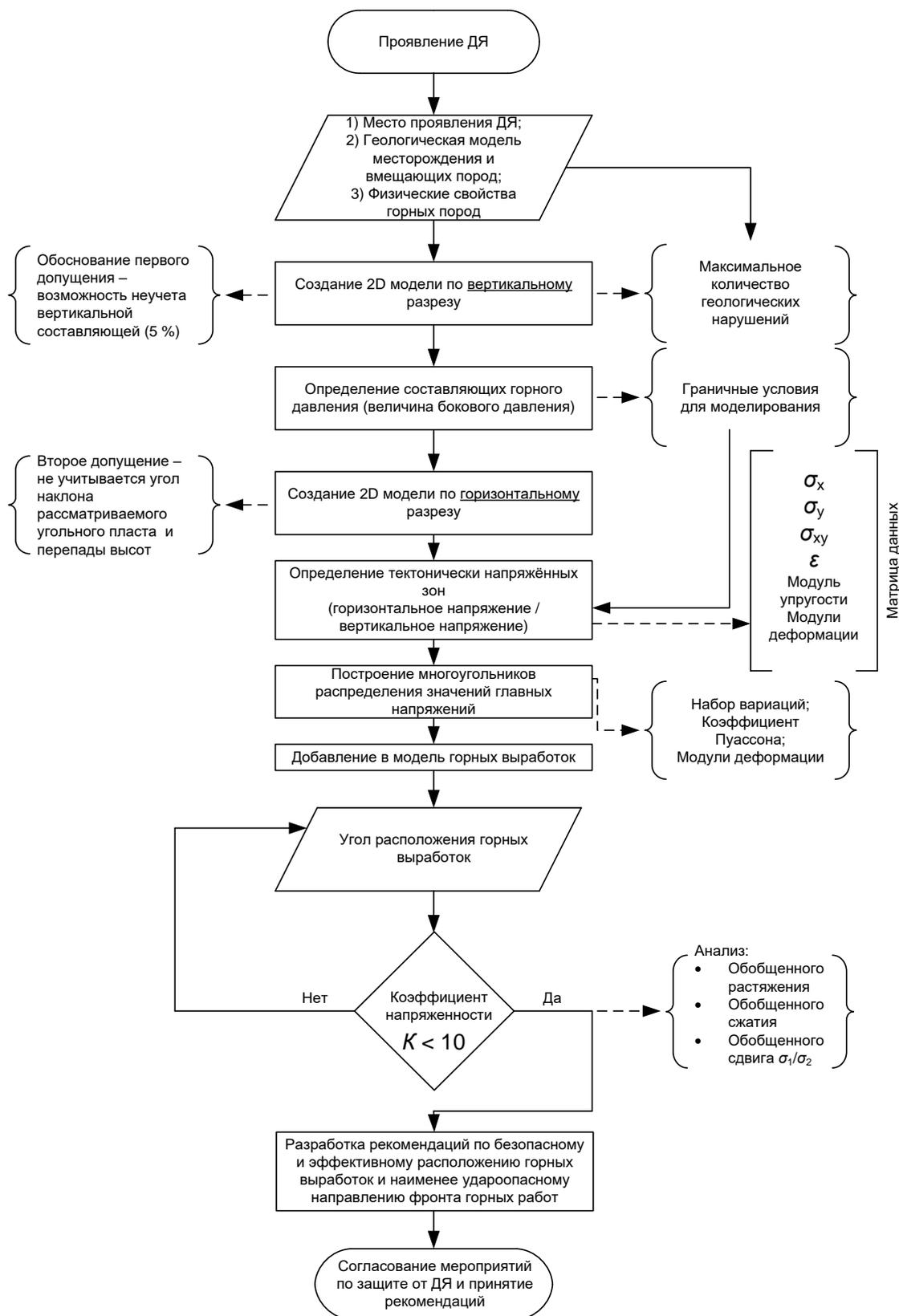
В третьей главе представлены результаты компьютерного моделирования напряжённо-деформированного состояния массива, разработан метод прогноза и обоснован подход к определению наименее удароопасного направления фронта очистных работ.

Метод прогноза представлен в виде алгоритма на рисунке 4. Представленный алгоритм был реализован на примере пласта Тройного шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь».

При решении задачи прогноза проявления горных ударов при различных значениях модуля деформации $E_{\text{ур}}$ и коэффициента Пуассона ν для нетронутого массива в зоне геологической нарушенности производится оценка напряжённо-деформированного состояния угольного пласта. Физические свойства, закладываемые в модель, определяются в соответствии с технической документацией шахты и справочника (кадастра) физических свойств горных пород. При этом на первом этапе решаются задачи с различным набором значений модуля деформации и коэффициента Пуассона. В результате строятся многоугольники распределения значений главных напряжений. Многоугольники распределения рассчитываются от числа реализованных решений для каждой расчётной точки модели. На рисунке 5 представлены примеры построенных многоугольников распределений значений максимальных и минимальных главных напряжений для отдельных точек модели.

Далее производится сопоставление полученных многоугольников распределения значений главных напряжений с нанесёнными на планы горных работ горными ударами. Для точек, соответствующих очагам горных ударов, многоугольники распределения значений главных напряжений представляется по типу, характерному для точек a, b и c (рисунок 5а). Для любых других точек модели – по типу, характерному для точек d, e, f (рисунок 5б). Поведение многоугольников распределения значений главных напряжений в этих точках различно, как следует из рисунка. В точках d, e и f происходит постепенное снижение напряжённости

массива при техногенном воздействии. В точках а, в и с напряжённость стремится к уравниванию, но при образовании свободной поверхности будет наблюдаться резкое изменение напряжённого состояния.



Допущения

Примечания

Рисунок 4 – Алгоритм регионального прогноза горных ударов на угольных шахтах (критерий выбран на примере ш. «Комсомольская»)

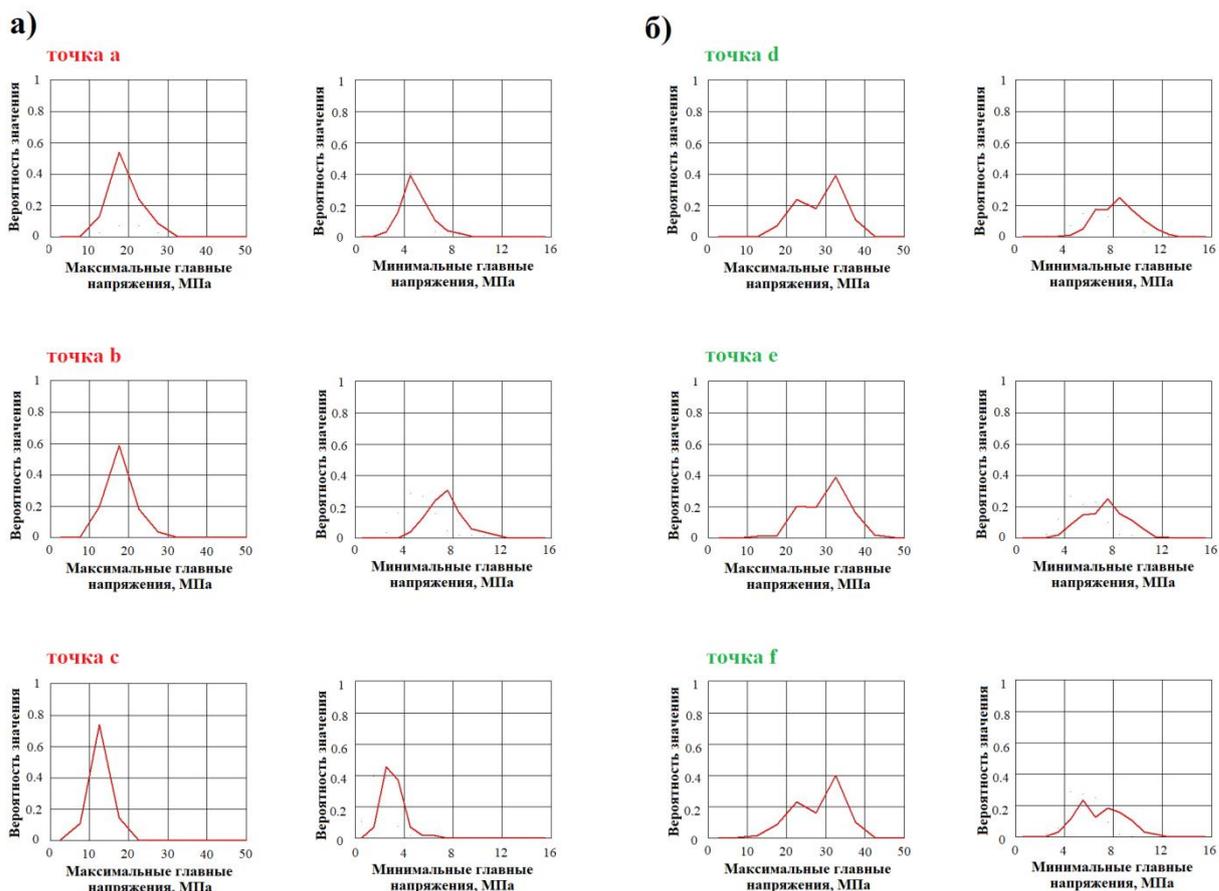


Рисунок 5 – Многоугольники распределения значений максимальных и минимальных главных напряжений

Значения главных напряжений принимают для расчёта удельной потенциальной энергии. По полученным картам значений удельной потенциальной энергии (пример приведен на рисунке б) выбираются наиболее характерные варианты задач (имеющие более выраженные качественные отличия).

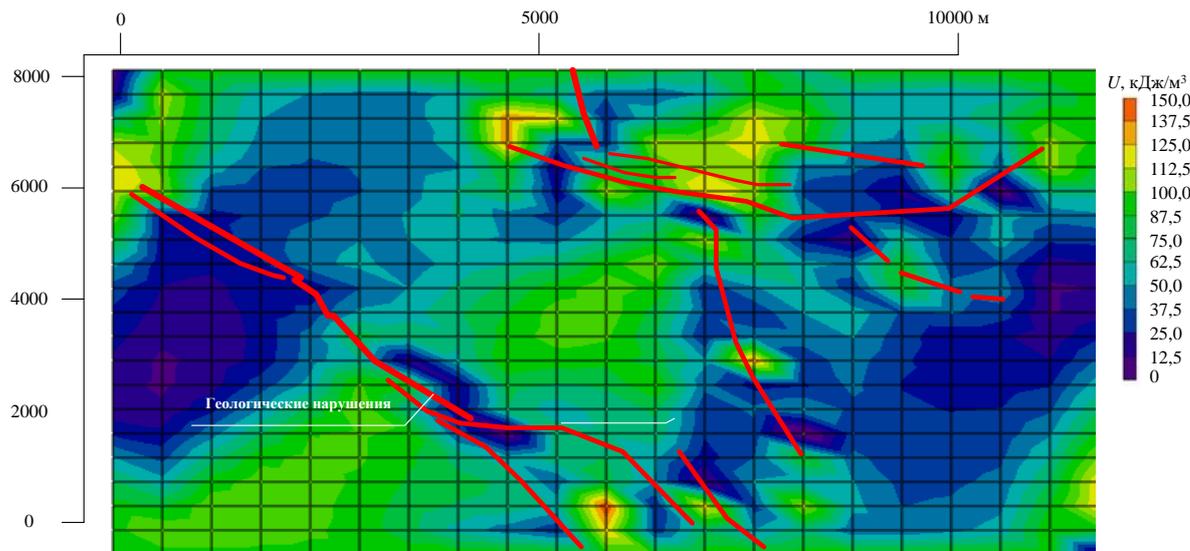


Рисунок 6 – Пример карты значений удельной потенциальной энергии в нетронутом массиве для условий ш. «Комсомольская»

Далее в расчётную модель добавляется рассматриваемый 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, соответствующим типу в точках а, в, с (рисунок 5). Для каждого набора рассматриваемых параметров производится оценка параметра Надаи–Лоде в сравнении с его изменением по отношению к нетронутому состоянию угольного пласта. На рисунке 7 представлена карта значений параметра Надаи–Лоде в зависимости от расположения выемочного участка в пространстве для первого направления фронта очистных работ (угол 218° от северного направления) на примере шахты «Комсомольская». Относительно плоскости модели было выбрано изменение направления (начальное положение – 218° по часовой стрелке от северного направления) с шагом в 10° . При повороте выемочного участка происходит изменение карты значений напряжений (пример на рисунке 8).

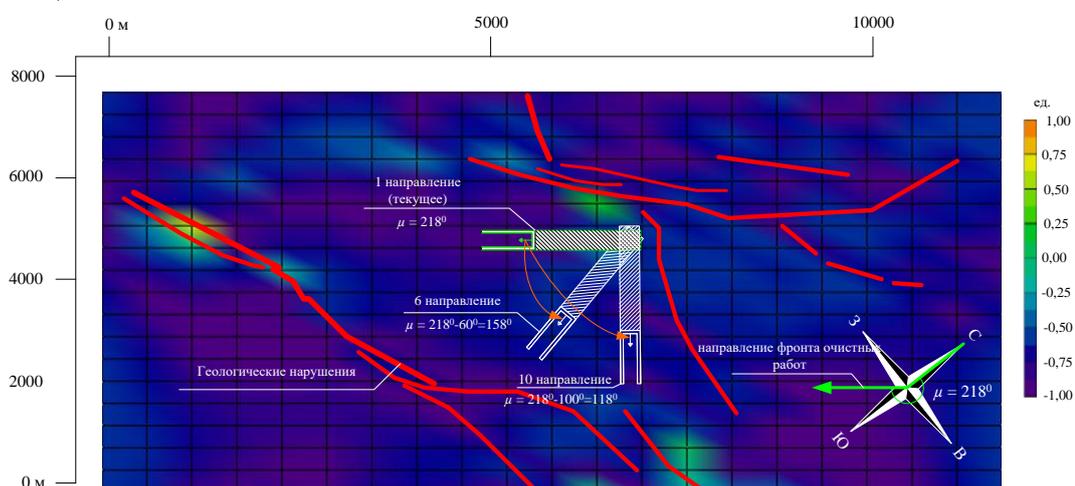


Рисунок 7 – Карта значений параметра Надаи–Лоде при первом направлении фронта очистных работ (угол 218° от северного направления) с демонстрацией порядка изменения направления фронта очистных работ

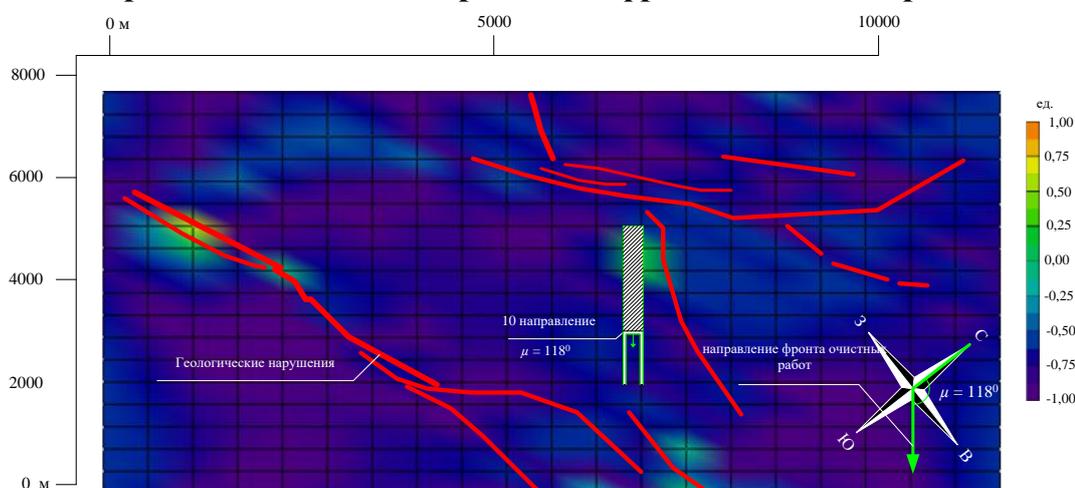


Рисунок 8 – Карта значений параметра Надаи-Лоде при десятом направлении (угол 118° от северного направления) для условий ш. «Комсомольская»

По распределению максимальных (вынесенный график на рисунке 9) главных напряжений вдоль направления фронта очистных работ (рисунок 9) вглубь массива при различных комбинациях физических свойств определяется удельная потенциальная энергия, определяется градиент между максимальным главным напряжением и напряжением на границе моделируемого очистного забоя.

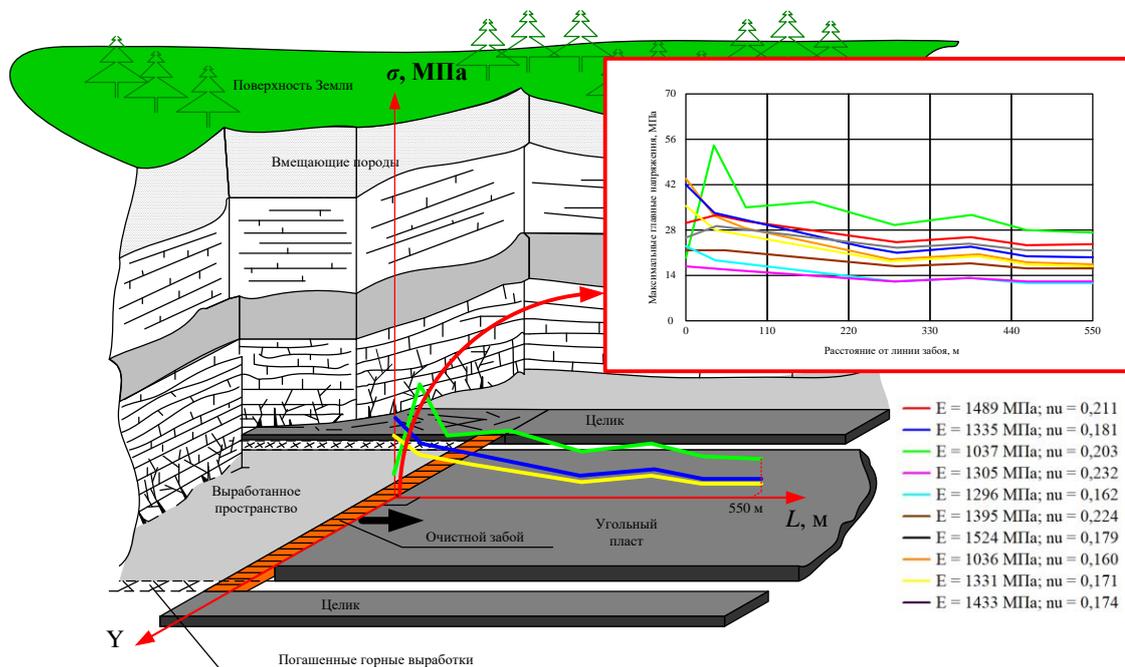


Рисунок 9 – Схема к определению распределения максимальных главных напряжений вдоль направления фронта очистных работ (угол 218° от северного направления) и распределение главных напряжений вдоль направления моделируемого очистного пространства выработки вглубь массива для первого направления для условий шахты «Комсомольская»

Горное давление вмещающих угольный пласт пород представляется в виде силы тяжести, приходящейся на единицу площади (эквивалент напряжения). Исходя из этого рассчитывается удельная энергия веса вышележащих горных пород

$$\mathcal{E}_{\text{вес_песч.}} = \frac{(\rho_{\text{песч.}} g H)^2}{2E_{\text{песч.}}}, \quad (17)$$

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.

Отношение удельной энергии активации W_a , представляющей градиент от максимума или минимума напряжений (2 варианта распределения напряжений, как следует из вынесенного графика на рисунке 9) к свободной поверхности, к удельной потенциальной энергии веса вышележащих горных пород \mathcal{E} , будет представлять величину, по которой можно судить о возможности проявления горного удара при выборе варианта направления фронта очистных работ при раскрытие шахтного поля. Это отношение называем коэффициентом напряжённости K . Полученные значения коэффициентов напряжённости сравниваются с критическим значением, соответствующим безопасной удельной

потенциальной энергии.

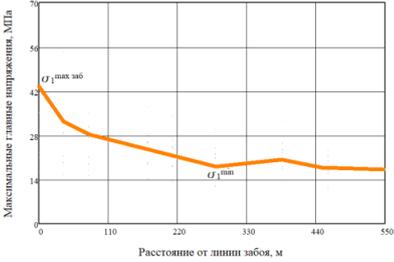
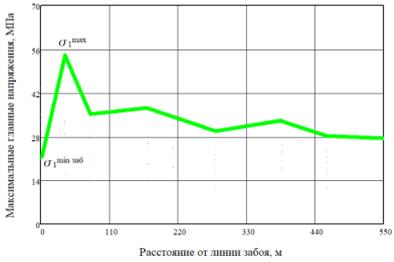
Коэффициент напряжённости определяется по формуле

$$K = \frac{W_a}{\mathfrak{E}_{\text{всс_песч}}}, \quad (18)$$

где W_a – удельная потенциальная энергия активации, МДж/м³.

Выбор формулы, по которой производится дальнейший расчёт величины W_a , зависит от варианта распределения напряжений. Если на границе моделируемого очистного пространства наблюдается локальный максимум, то выбирается вариант 1, если наблюдается локальный минимум – вариант 2. Локальные максимумы и минимумы определяются относительно напряжений вглубь массива. (таблица 1).

Таблица 1 – Формулы, применяемые для построения изограммы коэффициента напряжённости

Определяемая величина	Вариант 1 (на примере для $E_{ur} = 1036$ МПа, $\nu = 0,160$)	Вариант 2 (на примере для $E_{ur} = 1037$ МПа, $\nu = 0,203$)
Вид распределения напряжений (из вынесенного графика на рисунке 10)		
Удельная потенциальная энергия активации, W_a [МДж/м ³]	$W_a = 0,5 \left(\frac{[\sigma_1^{\text{max заб}} - \sigma_3^{\text{max заб}}]^2}{E_i} - \frac{[\sigma_1^{\text{min}} - \sigma_3^{\text{min}}]^2}{E_i} \right)$	$W_a = 0,5 \left(\frac{[\sigma_1^{\text{max}} - \sigma_3^{\text{max}}]^2}{E_i} - \frac{[\sigma_1^{\text{min заб}} - \sigma_3^{\text{min заб}}]^2}{E_i} \right)$ (19)
Градиент напряжений, grad [МПа/м]	$\text{grad} = \frac{\sigma_1^{\text{min}} - \sigma_1^{\text{max заб}}}{r^{\text{min}}}$	$\text{grad} = \frac{\sigma_1^{\text{max}} - \sigma_1^{\text{min заб}}}{r^{\text{max}}}$ (20)
	где $\sigma^{\text{max заб}}$ – локальные максимумы напряжений на границе моделируемого очистного пространства выработки, МПа; σ^{min} – локальные минимумы напряжений вглубь массива, МПа; r^{min} – расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки до локального минимума напряжений, м; E_i – рассчитанный модуль деформации в соответствующей максимумам/минимумам напряжений i -й точке массива, МПа	где $\sigma^{\text{min заб}}$ – локальные минимумы напряжений на границе моделируемого очистного пространства выработки, МПа; σ^{max} – локальные максимумы напряжений вглубь массива, МПа; r^{max} – расстояние от границы моделируемого очистного пространства выработки до локального максимума напряжений, м;

В четвёртой главе обоснован критерий удароопасности и рассмотрена конкретная задача, решаемая при локальном прогнозе горных ударов на пологих участках пластов угольной шахты «Комсомольская».

По разработанному методу, описанному в третьей главе, определяются максимальные главные напряжения для каждого рассматриваемого направления фронта очистных работ (угол μ на рисунке 7). Внутри одного направления определяются значения энергий активации для максимальных главных напряжений и значения градиентов напряжений в соответствии с таблицей 1. Количество значений определяется по числу решённых характерных задач (вынесенный график на рисунке 9 с 10 построениями). Результаты сводятся в единую матрицу значений, по которой осуществляются построения изограммы (рисунок 10).

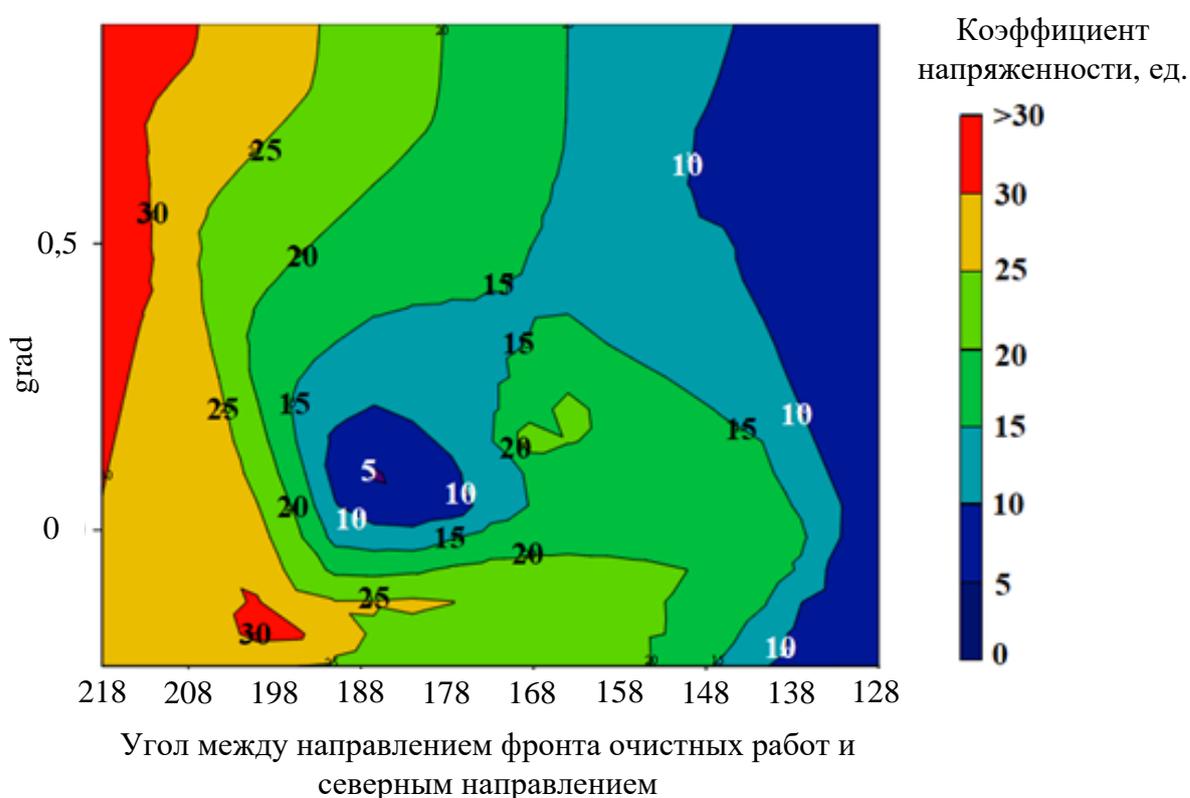


Рисунок 10 – Изограмма коэффициента напряжённости в зависимости от градиента напряжений и угла между направлением фронта очистных работ и северным направлением для условий шахты «Комсомольская»

Изограмма является поверхностью коэффициентов напряжённости. В качестве строк этой матрицы выступают значения градиентов, определяемых по формуле (20) в зависимости от типа распределения напряжений; в качестве столбцов – моделируемое направление фронта движения очистного забоя. Матрица формируется из векторов коэффициентов напряжённости для каждого направления.

Для оценки безопасности выбранного направления ведения горных работ предлагается использовать безразмерный критерий удароопасности [K]. Критерий определяется на основе сопоставления данных с сейсмостанции (безопасные

значения удельной потенциальной энергии) и отношения рассчитанной удельной потенциальной энергии активации, отнесённой к удельной потенциальной энергии силы тяжести вышележащих горных пород $\mathcal{E}_{\text{вес_песч}}$, т.е. $[K]$ сравнивается с K . В критерий удароопасности вводятся поправки на основании представлений об энергетических уровнях напряжений для учёта нарушенного состоянию массива (создание выемочного участка). Вводятся дополнительные поправки, учитывающие категорию устойчивости при техногенном воздействии.

По построенной изограмме (рисунок 10) наименее удароопасным для условий шахты «Комсомольская» является вариант угла направления фронта очистных работ 138° и 128° по часовой стрелке от северного направления для любых реализаций модуля деформации и коэффициента Пуассона. Угол в районе 188° также характеризуется меньшим коэффициентом напряжённости, но не во всех реализациях модуля деформации и коэффициента Пуассона. Этим принципом и следует руководствоваться при обосновании параметров эффективной и безопасной отработки угольных пластов на глубоких горизонтах. Незначительные отклонения угла приводят к перераспределению напряжений по плоскости забоя, и это может привести к аварии или инциденту.

Данный критерий удароопасности используется в разработанной методике и представленном алгоритме (рисунок 4). Он универсален 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.

По данному алгоритму, базирующемуся на разработанном способе прогноза горных ударов, для условий шахты «Комсомольская» был определен критерий удароопасности, равный 10. Также для данной шахты было определено направление фронта очистных работ, при котором существенно снижается вероятность проявления горных ударов. Наименее удароопасным для условий ш. «Комсомольская» является вариант угла между 138 и 128° против часовой стрелки от северного направления для любых возможных реализаций модуля деформации и коэффициента Пуассона.

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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. 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, DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-126-136 (ВАК, Scopus)
2. 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, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_167 (ВАК, Scopus)
3. 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. (ВАК)
4. Пугач А.С. Компьютерный аудит инцидентов на глубоких горизонтах угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – №6. – С. 65-67. (ВАК)
5. 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. (ВАК)

В прочих изданиях:

6. Пугач А.С. Компьютерное моделирование начального поля напряжений для прогнозирования горных ударов // *Проблемы недропользования*. – 2022. – № 1(32). – С. 25–37.
7. Кузьяев Л.С., Пугач А.С. Разработка алгоритма построения механико-математической модели выбросов угля и газа на шахтах Воркутского угольного месторождения // *Научный вестник МГГУ*. – 2010. – №5. – С. 30-35.
8. Пугач А.С. Компьютерное моделирование тектонических напряжений Воркутской мульды с целью прогнозирования выбросоопасных зон // *Рудник будущего*. – Пермь: 2011. – №3. – С. 90-92.
9. 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 МГГУ.* – 2012.– №5. – С. 66-74.
10. 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. – р. 410-413.
 11. 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.
 12. 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. ун-т. 2012. – С. 88-91.
 13. Плёнкин 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.
 14. 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.
 15. Пугач А.С. Геомеханическое обеспечение горных и горно-строительных работ. Ч.1. Геомеханическое обеспечение подземных горных работ / под научн. ред. Л.С. Кузьяева. – М.: Изд. Дом МИСиС. – 2014. – 137 с.