

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»

На правах рукописи



КИМ ТАТЬЯНА ЛЕОНИДОВНА

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗА
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ
ВЫРАБОТКАХ С УЧЕТОМ ГАЗОГИДРАТОВ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Дырдин Валерий Васильевич

Кемерово – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАГАЗИРОВАНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК И ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ УГЛЯ И ГАЗА.....	12
1.1 Газодинамические явления в подготовительных выработках при подземной разработке угольных пластов.....	12
1.2 Основные факторы, влияющие на загазирование выработок и формирование выбросоопасных ситуаций.....	15
1.3 Основные модели и методы прогноза газодинамических явлений.....	20
1.4 Возможность существования твердого углегазового раствора по типу газогидратов и их влияние на газодинамические явления в краевых зонах угольных пластов	33
ВЫВОДЫ. Цель и задачи исследований.....	40
2. ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В УГОЛЬНОЙ МАТРИЦЕ.....	42
2.1 Исследование процессов образования твердого углегазового раствора в угольной матрице при различных условиях.....	42
2.2 Исследование распределения газогидратных частиц по размерам пор угольной матрицы	52
ВЫВОДЫ.....	57
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИАЦИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В УГОЛЬНОЙ МАТРИЦЕ.....	58
3.1 Математическое моделирование скорости диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов в зависимости от их размеров в угольной матрице.....	58
3.2 Влияние размеров твердого углегазового раствора по типу	

газогидратов и газового давления на скорость подвигания границы их диссоциации.....	63
ВЫВОДЫ.....	68
4. ВЛИЯНИЕ ДИССОЦИАЦИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ.....	69
4.1 Оценка влияния диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов на газодинамические процессы в краевой зоне угольных пластов.....	69
4.2 Математическое моделирование распределения давления газа при диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов в краевой зоне угольного пласта.....	75
4.3 Математическое моделирование загазирования выработки при диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов при постоянной и переменной проницаемости краевой зоны.....	81
ВЫВОДЫ.....	86
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В МАССИВЕ.....	87
5.1 Определение наличия твердого углегазового раствора в угольных пластах впереди забоя подготовительных выработок геофизическими методами.....	87
5.2 Лабораторные исследования по определению скорости упругих волн	91
5.3 Сравнительный анализ величины скорости упругих волн угольной матрицы без газа и содержащей твердый углегазовый раствор по типу газогидратов в зависимости от температуры.....	94
5.4 Разработка метода определения вида газодинамических явлений для	

участка пласта, содержащего твердый углегазовый раствор по типу газогидратов.....	96
ВЫВОДЫ.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
Приложение 1. Решение о выдаче патента на изобретение.....	115
Приложение 2. Методическое руководство по прогнозу зон, потенциально опасных по ГДЯ, при проведении подготовительных выработок с учетом газогидратов.....	116
Приложение 3. Свидетельство о государственной регистрации программы по расчету показателя выбросоопасности при подземной разработке угольных пластов.....	117
Приложение 4. Акт внедрения ОАО Угольной компании «Северный Кузбасс» шахта «Первомайская».....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Темпы роста добычи угля в России подземным способом постоянно увеличиваются. К 2020 г. прогнозируемая добыча может составить около 380 млн. т угля. В 2012 г. в Кузбассе добыто 201,4 млн. т угля. По состоянию на 01.09.2013 г. в Кемеровской области функционировало 120 угледобывающих предприятий (63 шахты и 57 разрезов). Кемеровская область поставляет уголь внутри страны в 76 из 88 регионов и на экспорт – в 48 стран. В настоящее время более 30 шахт России ведут горные работы ниже критической по газодинамическим явлениям (ГДЯ) глубины. При подземной разработке угольных месторождений в призабойное пространство очистных и подготовительных выработок выделяется метан, который разбавляется свежей струей воздуха до безопасных концентраций. С увеличением глубины ведения горных работ количество ГДЯ увеличивается. Существующие методы прогноза и предупреждения ГДЯ дают большой запас «прочности», не учитывают дополнительный объем газа, выделяющийся при ГДЯ, происходящих нерегулярно и не на всех участках шахтного поля. Это связано с дополнительными факторами, которые до сих пор не учитывались ни при разработке теории ГДЯ, ни при разработке методов их предупреждения.

Одной из причин выделения добавочного количества газа является разложение твердого углегазового раствора (ТУГР) по типу газогидратов в угольных пластах. Это приводит к нарушению равновесия активных и пассивных сил в краевой зоне и формированию различных ГДЯ.

В угольных пластах в зависимости от давления и температуры природный газ может находиться в различных состояниях: свободном, сорбированном и в виде твердого углегазового раствора природного газа по типу газогидратов. Фазовые переходы газа из твердой фазы в свободную и обратно возможны при условии, что термодинамические параметры больше или меньше равновесных.

Газовые гидраты – соединения включения, в которых молекулы метана встраиваются в каркас, построенный из молекул воды. При диссоциации ТУГР по типу газогидратов выделяется дополнительный объем газа, влияющий на

формирование различных видов ГДЯ. В этой связи научная задача, направленная на установление необходимых параметров образования ТУГР по типу газогидратов в угольных пластах, закономерностей их диссоциации и их влияния на формирование различных видов ГДЯ в краевых зонах угольных пластов, является актуальной.

Диссертационная работа выполнена по гранту фонда Михаила Прохорова – 2013 г., а также по внутривузовскому гранту для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов в КузГТУ – 2014 г. и гранту «СУЭК - Кузбасс» и отражает результаты исследований, выполненных в Кузбасском государственном техническом университете в период с 2009–2014 г. и в Институте неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН в 2012 г.

Объектом исследования являются краевые зоны угольных пластов.

Предметом исследования являются процессы образования и диссоциации ТУГР по типу газогидратов в краевых зонах угольных пластов и их влияние на проявление ГДЯ.

Целью работы является разработка и обоснование метода прогноза ГДЯ в подготовительных выработках с учетом ТУГР по типу газогидратов в угольных пластах.

Идея работы заключается в использовании зависимости динамики нарастания газового давления от скорости диссоциации ТУГР по типу газогидратов, их распределения и размеров в краевой зоне угольного пласта, приводящего к формированию различных видов ГДЯ.

Задачи исследования:

1. Установить термодинамические условия образования ТУГР по типу газогидратов, их размеры и распределение в угольной матрице.

2. Разработать математические модели процесса диссоциации ТУГР по типу газогидратов для расчета скорости диссоциации и подвигания границы разложения в зависимости от размеров кристаллогидратов и распределения в угольной матрице.

3. Установить зависимость давления свободного газа при диссоциации ТУГР по типу газогидратов от гидратонасыщенности и с учетом коэффициента проницаемости краевой зоны угольного пласта.

4. Определить условия, при которых формируются внезапные выбросы угля и газа или загазирования выработок, с учетом зон, содержащих ТУГР по типу газогидратов в краевой зоне угольного пласта.

Методы исследований. Для решения поставленных задач принят комплексный метод исследований, включающий в себя анализ и обобщение производственных данных о газодинамических явлениях, теоретические исследования, обзор и анализ литературы по теме исследования, лабораторные эксперименты, статистические методы обработки экспериментальных данных, сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, численные и аналитические методы математического моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. ТУГР по типу газовых гидратов образуются в угольной матрице при превышении температуры и давления значений, определяемых равновесной кривой, и влажности 1,5% и более, при этом ТУГР по типу газогидратов образуются в поровых каналах и распределены кристаллами по всему объему угля, где поддерживаются данные параметры.

2. Скорость диссоциации ТУГР по типу газогидратов для частиц размером от 4 до 10 нм составляет 4–28 нм/мс и убывает по экспоненте с увеличением их диаметра, а скорость подвигания границы диссоциации газогидрата увеличивается с 2,0 до 6,0 м/с с ростом газового давления в диапазоне от 2 до 8 МПа и соответствует скорости распространения волны дробления.

3. Давление свободного газа в краевой зоне угольного пласта при диссоциации ТУГР по типу газогидратов увеличивается в 2–2,5 раза при гидратонасыщенности от 1,9 до 5,2% и минимальной проницаемости массива 0,015 Дарси.

4. Вид ГДЯ зависит от критического значения коэффициента проницаемости краевой зоны, который для различных условий и свойств угольных пластов

составляет 0,001 Дарси $< k_{кр} < 0,01$ Дарси: при k , превышающем критическое значение для данного угольного пласта, происходит загазирование выработки, а при $k < k_{кр}$ – формирование выбросоопасной ситуации.

Научная новизна работы заключается:

1. В установлении термодинамических параметров и минимальной влажности, необходимой для образования ТУГР по типу газогидратов, и их распределения по объему угольной матрицы.
2. В определении скорости диссоциации ТУГР по типу газогидратов в зависимости от размера частиц, а также в установлении соответствия между скоростью подвигания границы диссоциации ТУГР по типу газогидратов и скоростью распространения волны дробления.
3. В разработке математических моделей распределения газового давления в краевой зоне угольного пласта после начала процесса диссоциации ТУГР по типу газогидратов с учетом переменного коэффициента проницаемости краевой зоны угольного пласта.
4. В определении критического значения проницаемости краевой зоны угольного пласта для определения вида ГДЯ (внезапный выброс или загазирование выработки) с учетом зон, содержащих ТУГР по типу газогидратов.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в том, что определены минимальная влажность и термодинамические условия образования ТУГР по типу газогидратов в поровых каналах угольной матрицы; определена скорость диссоциации ТУГР по типу газогидратов в зависимости от размеров частиц и установлено соответствие между скоростями подвигания границы разложения и волны дробления; установлена зависимость давления свободного газа при диссоциации ТУГР по типу газогидратов от величины коэффициента проницаемости и гидратонасыщенности; разработана методика определения участков угольного пласта, содержащих ТУГР по типу газогидратов, основанная на измерении УЭС и скорости упругих волн.

Достоверность научных положений и выводов подтверждается:

корректностью математической постановки задачи и применения численных методов; применением основных положений классической термодинамики, механики сплошных сред и методов статистической обработки экспериментальных данных; сходимостью (90-95) % результатов лабораторных исследований с данными других авторов.

Личный вклад автора заключается: в постановке задач, обработке и анализе результатов теоретических и лабораторных исследований, направленных на выявление влияния диссоциации газовых гидратов на формирование ГДЯ в угольных пластах; в разработке программ для ЭВМ по расчету показателя выбросоопасности угольных пластов и вида ГДЯ; в разработке математической модели для установления зависимости давления газа в краевой зоне угольного пласта от количества газа, выделяющегося при диссоциации газовых гидратов; в проведении комплекса лабораторных измерений удельного электрического сопротивления и скорости упругих волн в угольной матрице (КузГТУ), содержащих ТУГР по типу газогидратов, а также в определении термодинамических параметров образования ТУГР по типу газогидратов в угольной матрице (Институт неорганической химии имени А. В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск); в разработке методики прогноза ГДЯ при проведении подготовительных выработок с учетом ТУГР по типу газогидратов.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей образования и диссоциации ТУГР по типу газогидратов в угольной матрице, расширяющих наши представления о газодинамических процессах в краевых зонах массива при подземной разработке угольных пластов и наличии газогидратов.

Практическое значение работы заключается в разработке методики прогноза ГДЯ при проведении подготовительных выработок с учетом ТУГР по типу газогидратов, позволяющей разработать мероприятия по их предотвращению и повысить безопасность горных работ.

Реализация работы. Результаты данной работы применены на шахте «Первомайская» по пласту XXIV, при прогнозе зон, опасных по ГДЯ при

проведении подготовительных выработок и вошли в «Методическое руководство по прогнозу зон, потенциально опасных по ГДЯ, при проведении подготовительных выработок с учетом газогидратов природного газа», согласованного с НЦ ВостНИИ, по заявке № 2013-134-695 02.06.2014 г. принято положительное решение о выдаче патента на изобретение «Способ определения выбросоопасных зон в угольных пластах», а также результаты работы используются при чтении лекций по курсу «Теплотехника» в Кузбасском государственном техническом университете имени Т. Ф. Горбачева.

Апробация работы. Основные положения и выводы работы в период ее выполнения докладывались и обсуждались на III Всероссийской, 56 научно-практической конференции студентов, аспирантов, докторантов и преподавателей «Россия Молодая» (11–15 апреля 2011 г., Кемерово, КузГТУ); Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (4–6 сентября 2012 г., Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, энергетический институт); XIV Международной научно–практической конференции «Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности» (18–21 сентября 2012 г., Кемерово, Министерство энергетики РФ); IX Международной научно – практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (1–2 ноября 2012 г., Кемерово, КузГТУ); IV Всероссийской, 57 научно–практической конференции молодых ученых «Россия Молодая» (24–27 апреля 2012 г., Кемерово, КузГТУ); Материалах IX Международной научно-практической конференции «Доклады научных идей–2013». – 2013. – Прага: Наука и образование. – С. 65 – 69.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе 6 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 118 страниц текста, 29 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 101 наименования.

Автор благодарен своему научному руководителю д.т.н., проф. В. В. Дырдину за активную помощь, консультирование и требовательность; выражает благодарность д.х.н. А. Ю. Манакову за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований в лаборатории клатратной химии, а также д.т.н., проф. А. А. Ли, д.т.н., проф. В. И. Мурашеву и к.т.н., зав. лаб. газодинамических явлений П. В. Потапову за обсуждение результатов диссертационной работы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАГАЗИРОВАНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК И ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ УГЛЯ И ГАЗА

1.1 Газодинамические явления в подготовительных выработках при подземной разработке угольных пластов

При подземной разработке угольных пластов в ряде случаев происходят различные газодинамические процессы, одними из которых являются загазирование выработок в призабойной части массива, которые могут приводить к внезапным выбросам угля и газа или другим газодинамическим явлениям. Эти явления сопровождаются обильным газовыделением и угрозой загазирования горных выработок, выносом угольной мелочи, т.е. приводят к последствиям, характерным для внезапных выбросов угля и газа. Загазирование горных выработок ведет к взрывам газопылевоздушных смесей, иногда с катастрофическими последствиями. На шахтах Кузбасса, Печорского и Карагандинского бассейнов только за период 1986-2008 г.г. произошло 162 газодинамических явления, в том числе 24 внезапных выбросов угля и газа со средней интенсивностью 226 т выброшенного угля и 118 м³/т выделившегося газа. Условия возникновения и формы проявления газодинамических явлений очень разнообразны и порой непредсказуемы. Данные явления сопровождаются выбросом огромного числа кубометров природного газа, пыли и сотен тонн измельченного угля, что порой приводит к гибели горнорабочих, а также к разрушению горных выработок и дорогостоящего оборудования.

Изучение газодинамических явлений (ГДЯ) продолжается на протяжении многих лет. Такие ученые, как А.Т. Айруни, А.Д. Алексеев, М.С. Анциферов, И.В. Бобров, Ю.Ф. Васючков, В.Н. Захаров, А.Н. Зорин, Б.М. Иванов, М.А. Иофис, С.В. Кузнецов, Г.Д. Лидин, А.М. Линьков, О. Н. Малинникова, В. И.

Мурашёв, В.Н. Николин, Г. Я. Полевщиков, В.Н. Пузырев, А. Э. Петросян, И. М. Петухов, А.Д. Рубан, А.А. Скочинский, К.Н. Трубецкой, Г. Н. Фейт, В. Н. Фрянов, В.В. Ходот, С.А. Христианович, О.И. Чернов, С.Е. Чирков, И.Л. Эттингер, М.Ф. Яновская, и др. внесли существенный вклад в решение проблем прогноза и борьбы с газодинамическими явлениями.

Проблема прогнозирования и предупреждения газодинамических явлений остается основной из самых сложных проблем по обеспечению безопасности горных работ в подготовительных выработках шахт.

К основным ГДЯ по международной классификации техногенных геодинамических явлений относятся четыре класса явлений: выбросы газа, горные удары, выбросы угля (породы) и газа, горнотектонические явления.

Классификации ГДЯ была разработана еще в 30-х годах А. А. Скочинским и уточнена В. В. Ходотом в 70-х годах прошлого столетия. Наиболее полная классификация газодинамических явлений была представлена в 1991 г. в «Методических указаниях по классификации газодинамических явлений в угольных шахтах» [1]. Она разработана учеными и специалистами научно-исследовательских институтов ИГД им. А. А. Скочинского, ВНИМИ, МакНИИ, ВостНИИ, Министерства угольной промышленности и Госгортехнадзора. На основе этой классификации проф. В. С. Зыковым составлена таблица [2], в которой приведены общие характеристики и отличительные особенности ГДЯ.

Общие характеристики газодинамических явлений, по мнению И. М. Петухова и А. М. Линькова [3], заключаются, во-первых, в огромных запасах потенциальной энергии; во-вторых, предварительной стадией потери устойчивости состояния равновесия; в-третьих, распространением волны разрушения и движением материала (и газа) в выработанное пространство; и последняя стадия завершения, т.е. окончание газодинамического явления.

Тем не менее, нет четкого разграничения протекающих при газодинамических явлениях стадий, так как разные элементы массива могут находиться в один и тот же момент времени в разных стадиях деформирования и

для разных элементов вторая, третья, а также первая стадии протекают одновременно.

Таким образом, газодинамические явления— разрушения массива горных пород под влиянием горного давления, сопровождающиеся кратковременным выделением газа [4]. Наиболее интенсивным проявлением ГДЯ является внезапный выброс угля и газа.

Общими характеристиками и признаками внезапных выбросов является:

- Огромное количество газа, выделяемого при выбросах;
- Образование «бешеной муки», выбрасываемой на большие расстояния от забоя;
- образование языкообразной полости, заполненной дробленой породой;
- относительно небольшое, по сравнению с горными ударами, повреждение крепи и пород вне пределов полости выброса [5].

Основные газы, которые выделяются при ГДЯ, это метан, углекислый газ и азот. Состав и концентрация их при выбросах может сильно различаться, в одних случаях выделяется преимущественно один газ, в других – их смесь, чаще всего выделяется метан. Полости, образуемые впереди забоя в результате внезапного выброса, отличаются разнообразием форм, но чаще всего являются груше- или кармановидными.

В настоящее время более 30 шахт России ведут горные работы ниже критической по внезапным выбросам глубины. На них разрабатывается с применением противовыбросных мероприятий 125 опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа шахтопластов. Всего на шахтах России произошло 918 внезапных выбросов угля и газа по данным на 2012 год (табл.1.1).

Таблица 1.1

Сведения о количестве произошедших внезапных выбросов угля и газа на шахтах
России[2]

Бассейны, месторождения, районы	Количество внезапных выбросов
Кузнецкий бассейн	195
Печорский бассейн	275
Ростовский район Донецкого бассейна	207
Приморский бассейн	25
Егоршинское месторождение Урала	214
Бошняковское месторождение	1
Тунгусский бассейн	1

Большую угрозу представляют внезапные выбросы угля и газа на мощных и газоносных пластах Кузнецкого бассейна, освобождающие газ в огромном количестве, распространение которого по выработкам может привести и приводило не однажды к катастрофам.

1.2 Основные факторы, влияющие на загазирование выработок и формирование выбросоопасных ситуаций

Загазирование горных выработок в угольных шахтах создают взрывоопасную метановоздушную среду и условия для возможных взрывов с

большими человеческими жертвами и материальными потерями. Кроме того, загазирование горных выработок существенно сдерживают добычу угля и темпы проведения подготовительных выработок.

Действующими «Правилами безопасности в угольных шахтах» предусмотрены разгазирования и расследования причин загазирования горных выработок. К загазированию относятся случаи превышения норм концентрации метана в сечении горных выработок в свету и в открытых, незаложенных породой или другими материалами куполах, принимаемые к учету в соответствии с Инструкцией по разгазированию горных выработок. Загазирования выработок делятся на следующие виды: местное, слоевое и общее[6].

Местное загазирование определяется наличием скопления метана в отдельных местах выработок, в том числе у буровых станков, комбайнов и врубовых машин, в открытых, не заложённых породой или другими материалами куполах, с концентрацией 2 % и более, превышения нормы концентрации метана, зафиксированные одним датчиком системы аэрогазового контроля (АГК) в действующих выработках шахты.

Слоеое загазирование определяется наличием скопления метана в виде слоя в выработках на участках длиной свыше 2 м с концентрацией более 2 %.

Общее загазирование определяется превышением нормы концентрации метана в сечении выработки, превышением нормы концентрации метана, зафиксированным двумя и более датчиками системы АГК в подготовительной выработке или в выработках выемочного участка.

По причинам возникновения загазирования разделяются на аварийные или технологические. К технологическим относятся загазирования, обусловленные выбросами угля (породы) и газа при сотрясательном взрывании; повышенным газовыделением при ведении работ по предупреждению внезапных выбросов угля и газа и увлажнению (гидроразрыву) угля в массиве; повышенным газовыделением при бурении разведочных или дегазационных скважин; обрушением пород кровли в выработанном пространстве выемочных участков; выполнением мероприятий по реверсированию

вентиляционной струи; плановыми остановками вентиляторов главного проветривания (ВГП), газоотсасывающих установок (ГОУ), дегазационных установок (ДУ) и вентиляторов местного проветривания (ВМП), в том числе остановками ВМП при определении контрольного времени загазирования подготовительных выработок; проведением плановых технических работ по разгазированию горных выработок, вскрытию изолирующих сооружений, ликвидации последствий аварий и инцидентов [6].

Все загазирования, не относящиеся к технологическим, являются аварийными.

Возникновение и развитие всех ГДЯ формируется под влиянием природных и технологических факторов. Природные факторы определяют способность горного массива к газодинамическим проявлениям. Возможность реализации этой опасности зависит от технологических факторов. К природным факторам относится горное давление, давление газа в угольных пластах, породах и неугольных минералах, характеристики пласта и вмещающих его пород, свойства полезного ископаемого, глубина залегания пласта, рельеф местности, степень метаморфизма угля, газоносность пласта, наличие нарушенности горных пород, влажность угля и др.

В результате влияния этих факторов формируются активные силы, которые стремятся нарушить равновесное состояние горного массива, и пассивные силы, препятствующие развитию динамического явления. Активными являются силы газового и горного давления, пассивными – силы сопротивления угля отрыву. При проведении наклонных выработок на соотношение активных и пассивных сил оказывают влияние гравитационные силы.

При проведении горной выработки нарушается естественное состояние массива. В призабойной области уголь, имеющий меньшую прочность, чем вмещающие породы, под давлением, превышающим его несущую способность, переходит в предельно - напряженное состояние, характеризующееся пониженными напряжениями вблизи обнаженной поверхности и концентрацией их на некотором расстоянии от нее.

По данным работы [7], внезапные выбросы угля и газа в большинстве происходили в подготовительных выработках. Иногда на отдельных пластах происходят одновременно и горные удары, и внезапные выбросы угля и газа, называемые комбинированными газодинамическими явлениями.

Соответственно проявления природных факторов газодинамической опасности зависит от горнотехнических параметров проведения выработки, основными из которых являются глубина разработки, размеры выработки, скорость и равномерность подвигания забоя.

К основным геологическим факторам, неблагоприятно влияющим на безопасность труда и производственно-экономические показатели работы шахт, в первую очередь относится высокая природная газоносность угольных пластов (до 40 – 45 м³/т) [8], чему способствуют специфические условия сохранения метаморфогенных газов в угленосных отложениях. С увеличением глубины горных работ негативное влияние геологических факторов растет. На величину метаноносности угольных пластов существенно влияет природное газовое давление в угле, степень метаморфизма и пористость угля.

Величина давления метана в макропорах и природных трещинах угольных пластов является одним из основных факторов, определяющих объем сорбированного и свободного метана в углях, и одним из основных косвенных показателей выбросоопасности угольных пластов.

Метан в угольных пластах в основном находится в сорбированном состоянии: в абсорбированном (твердый углегазовый раствор - ТУГР) и адсорбированный – на поверхностях макромолекул и микротрещин, а также в сравнительно небольших объемах в свободном состоянии [9]. С глубиной количество свободного газа растет за счет увеличения давления и достигает 10-12% от всего объема, содержащегося в угле метана.

При нарушении установившегося в угле равновесия в системе «уголь-метан - природная влага» движение молекул метана из природных угольных пор происходит путем перемещения их по стенкам пор и путем перехода молекул метана из абсорбированного состояния в адсорбированное и затем выделения в

свободную фазу в зоне снижения давления метана ранее существовавшего в свободной фазе, то есть происходит распад твердого углегазового раствора, который сопровождается снижением давления газа [10, 11].

Природное давление газа в угольных пластах на глубинах ниже верхней границы зоны метановых газов обычно ниже гидростатического, но на ряде месторождений превышает его [11].

При снижении давления газа в процессе десорбции часть метана, определяемая разницей между сорбционной емкостью угля при первоначальном давлении метана и вновь установившемся, переходит в свободное состояние, а количество метана, сохранившегося в угле в сорбированном состоянии, соответствует новым термодинамическим условиям (температуре, давлению и т.д.), поэтому любой метаноносный угольный пласт, обладающий естественной (природной) влажностью, необходимо рассматривать как единую газодинамическую систему, в которой изменение давления газа в какой-либо точке постепенно передается прилегающему массиву пласта, размеры которого зависят от природной газопроницаемости и влажности, а также степени метаморфизма угля.

Таким образом, проявление ГДЯ в большинстве случаев определяется тремя факторами: а) фактором горного давления; б) газовым фактором; в) прочностными свойствами пласта.

До сих пор до конца непонятна роль тектонических нарушений в вопросе проявления внезапных выбросов угля и газа. Многие исследователи считают [12], что основной причиной внезапных выбросов в зонах влияния тектонических нарушений являются высокая природная газоносность пласта и практически нулевая его проницаемость. Другие считают, что основной фактор это напряженно-деформированное состояние массива, которое реализуется только за счет гравитационных сил. Для более точного представления основных факторов и причин возникновения внезапных выбросов и загазирования горных выработок, рассмотрим и проанализируем основные модели и методы прогноза газодинамических явлений в следующем параграфе.

1.3 Основные модели и методы прогноза газодинамических процессов

Разработка аналитических методов описания газодинамического явления предполагает создание сложного математического аппарата, учитывающего основные этапы прохождения процесса внезапного выброса от условий возникновения до выноса газугольной смеси.

Проблемой ГДЯ, а в частности внезапными выбросами занимались и занимаются многие академические научно-исследовательские институты и ученые. У истоков научных исследований по проблеме стояли академики А. А. Скочинский, С. А. Христианович. Их продолжателями и основателями теории газодинамических явлений были В. В. Ходот, В. И. Мурашев, И. В. Петухов, А. М. Линьков и многие другие. Рассмотрим основные из предложенных моделей газодинамических явлений.

Относительно причин и вероятного механизма внезапных выбросов соответственно высказывались различные точки зрения. Одни исследователи приписывают основную роль газовому фактору (давлению газов, заключенных в порах горных пород), другие – напряженному состоянию. В результате обобщения обширных наблюдений за внезапными выбросами в различных горно-геологических условиях, а также проведении экспериментальных и теоретических исследований В. В. Ходот создал энергетическую теорию внезапных выбросов [5]. Согласно которой происходит разрушение с большой скоростью угольного пласта вблизи горной выработки, вызванное изменением напряженного состояния, вследствие резкого внедрения забоя выработки в зону повышенного горного давления (ЗПГД) или в зону пликативного нарушения. Разрушение угля сопровождается десорбцией газа, в результате чего создается значительное газовое давление, и уголь отбрасывается от забоя, в результате образуется поток газа и взвешенного в нем измельченного угля. А также отбрасывание происходит за счет накопленной упругой энергии самого пласта и боковых пород.

Рассмотрев и сравнив все физико-химические и механические свойства угля, особенности проявления горного давления, опасных и не опасных по внезапным выбросам, он пришел к выводу об отсутствии в угольных пластах каких-нибудь других причин возбуждения и развития внезапных выбросов, кроме гравитационных сил и давления газа.

По академику В. В. Ходоту, в процессе внезапного выброса угля и газа может быть выделено три фазы развития: первая стадия, когда происходит начальное разрушение угля в призабойной зоне, вследствие внезапного увеличения градиента напряжений, при внедрении забоя выработки в зону пликативного нарушения; вторая стадия, когда происходит интенсивное газовыделение из микропор в трещины и начальный отброс угля; третья стадия: усиление выделения газа в процессе дробления угля, расширение газа и вынос измельченного угля в выработку в потоке газа.

Анализ распределения напряжений в угольном пласте вблизи горной выработки позволил выявить ему свойства угольного пласта и сочетание этих свойств, которые создают опасность внезапных выбросов угля и газа. Количественная оценка этих свойств дала возможность сформулировать условия возбуждения и развития внезапного выброса.

Первым условием возбуждения внезапного выброса угля и газа по В. В. Ходоту – освобождение вблизи очистной горной выработки таких количеств потенциальной энергии угля W и режущей кинетической энергии горных пород $\mathcal{E}$, которых было бы достаточно для работы смещения угля в сторону горной выработки F и разрушения угля U , т.е.

$$W + \mathcal{E} > F + U. \quad (1.1)$$

В случае подготовительной выработки это условие может быть записано

$$W > F + U,$$

а для случая вскрытия угольного пласта

$$W + Q > F + U,$$

где Q - внутренняя энергия газа, заключенного в «свободном» объеме пор, т.е. вне влияния сорбционных сил. Этот газ обычно составляет не больше 10% всего заключенного в угле газа.

Вторым условием является - скорость разрушения угля v_p должна превышать скорость падения давления газа в трещинах угля v_d :

$$v_p > v_d . \quad (1.2)$$

Третье условие – сохранение давления газа к моменту завершения разрушения угля на уровне более высоком, чем сопротивление разрушенного угля отбросу:

$$p > \frac{m}{S} [g(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + v], \quad (1.3)$$

где S - площадь поперечного сечения разрушения блока угля.

Поскольку, как указывает В. В. Ходот, последние два условия (1.2) и (1.3) выполняются для высокогазонасыщенных пластов почти всегда, основным условием выброса является неравенство (1.1) [5].

Недостатком энергетической теории является невозможность оценки ряда величин, входящих в условия (1.1) - (1.3), до момента самого выброса для предсказания внезапных выбросов угля и газа.

Проф. О. И. Черновым были проведены исследования [13], направленные на установление взаимосвязи между природной газоносностью угольных пластов и их выбросоопасностью, газоносность пластов определялась в соответствии с инструкцией [14] на стадии разведки, в результате чего было установлено, что угольные пласты Кузнецкого бассейна приобретают склонность к внезапным выбросам при газоносности более 11 м³/т.

Исследователями ВостНИИ была установлена взаимосвязь между критическим значением давления газа, при которых могут происходить внезапные выбросы угля и газа и загазирования выработок от глубины земной поверхности [13,14] по формуле:

$$P = 0,012 \cdot H - 0,22, \quad (1.4)$$

где P – газовое давление, МПа; H – глубина залегания угольного пласта, м.

В большинстве случаев для ряда месторождений Кузбасского угольного бассейна прогнозные глубины проявления внезапных выбросов, определяемые по приведенной выше зависимости, не соответствуют фактическим значениям [15].

Большинство теоретических представлений и моделей проявления внезапных выбросов угля и газа не могут пояснить природу их формирования, а отражают в основном их предполагаемые условия и механизм развязывания.

Еще одна модель была представлена проф. В. И. Мурашевым [16, 17], который, как и многие исследователи считает, что развязывание внезапного выброса угля и газа происходит, когда активные силы, действующие на пласт, превосходят пассивные. Предложенный им механизм развязывания внезапных выбросов заключается в образовании трех зон, отличающихся друг от друга по степени разрушения и развитию сети трещин, ориентированных в направлениях, близких к параллельным плоскости обнажения.

В зоне, удаленной от забоя выработки и граничащей с невозмущенным массивом, происходит подготовка массива к переходу из упругого состояния в упруго - пластическое. Начинается и идет процесс раскрытия трещин, массив начинает разгружаться, заметно небольшое зияние трещин и газа в свободном состоянии еще мало.

Во второй зоне, расположенной ближе к забою, происходит дальнейшая дезинтеграция массива, уголь переходит в упруго – пластическое состояние, напряжения в пласте ниже, чем в первой зоне. Данная зона представляет собой систему параллельных забою трещин, заполненных существенными объемами свободного газа и состоящих из плотно прижатых друг к другу вмещающих пород блоков угля. Проницаемость между элементами, а соответственно и в направлении к плоскости забоя очень низкая.

В следующей зоне, прилегающей к забою, массив значительно разгружен от горного и газового давления, здесь развиты системы трещин различных направлений. Чем меньше прочность угля, тем больше он разрушен в данной зоне. Его фильтрационная способность остается довольно низкой вследствие воздействия пород кровли, приводящего к сжатию разрушенной угольной массы.

Для опасной по внезапным выбросам зоны, отличающейся низкой прочностью угля и высокой газоносностью, характерным является наличие ярко выраженной зоны с квазипараллельными забой элементами массива, значительными объемами свободного газа в трещинах между элементами массива и высокой величиной его давления в непосредственной близости от забоя.

Процесс развязывания внезапного выброса можно описать следующим образом. В случае если равнодействующая сил давления газа в некоторой близкой к забою выработке и ориентированной параллельно ему системе трещин превысит равнодействующую сил сопротивления угля отрыву, происходит вынос в выработку слоя между этими трещинами и плоскостью забоя. Затем отторгается следующий слой между вновь образовавшейся поверхностью забоя и другой системой трещин, где активные силы будут также преобладать, и процесс многократно повторяется. Так реализуется эффект газового дробления угля.

Выделяют три стадии внезапного выброса угля и газа. На первой подготовительной стадии в призабойной части пласта, которая находится под действием сил горного давления, формируются выбросоопасные условия: затрудненная фильтрация газа в направлении к выработке способствует сохранению высокого газового давления вблизи забоя, происходит рост дефектов, приводящих к уменьшению прочности материала и облегчению отделения частиц в последующей стадии выброса. Система теряет свою устойчивость обычно при резком обнажении поверхности. Потеря устойчивости объясняется неоднородностью пласта, неравномерное его нагружение и высокое опорное давление. На второй стадии идет распространение волны послойного отделения (газовое давление угля). На третьей стадии происходит движение смеси газа и частиц угля по выработке. Разрушаются движущиеся частицы на мелкие под действием высокого внутреннего давления газа, часть из них превращается в «бешенную муку» [17].

Из представленного выше возникает ощущение о невозможности прогнозирования и предупреждения внезапных выбросов угля и газа, поскольку

создание любой опережающей забой полости для профилактических мероприятий, в том числе шпура может вызвать выброс.

Еще одна теория, созданная И.М. Петуховым и А.М. Линьковым [18], согласно которой условия возникновения выброса определяются в основном силами, вызывающими рост трещин и отделение частиц от массива, независимо от энергии источников этих сил, а характер и последствия выброса - общим энергетическим балансом системы. Условия отрыва частиц описывается в виде

$$s_r(P_1 - P_2) \geq [\sigma_p], \quad (1.5)$$

где P_1 - давление газа перед забоем к началу движения фронта выброса; P_2 - давление газа за фронтом; $[\sigma_p]$ - прочность пород на отрыв; s_r - доля поверхности, к которой приложено давление газа.

Расчеты показывают, что величина s_r может меняться в широких пределах от значений превышающих единицу, до сотых долей (для выбросоопасных углей его значение снижается до 0,05-0,1).

Поскольку между прочностью на отрыв $[\sigma_p]$ и коэффициентом крепости, по М. М. Протодяконову, $f_{кр}$ имеет место корреляция $f_{кр} \approx [\sigma_p]$, формулу (1.5) при $s_r = 0,05$ можно представить в виде

$$P_1 - P_2 \geq 20f_{кр}. \quad (1.6)$$

Процесс внезапного выброса связан как с изменением напряженно-деформированного состояния, т.е. с переходом потенциальной упругой энергии сжатия горных пород, находящихся в условиях предельного напряженного состояния, в кинетическую энергию хрупкого разрушения, так и с дробящим и метательным действием расширяющихся газов, насыщавших под давлением разрушаемый участок массива.

Вместе с тем, как показал А.Э. Петросян [19], на выбросоопасность, помимо давления газа влияет количество свободного газа, находящегося под этим давлением.

В процессе выброса газовое давление резко возрастает и отбрасывает разрушенную массу породы в выработку. В наклонных выработках отброс

разрушенной массы усиливается за счет ее собственного веса. По мере развития выброса разрыхленная масса создает подпор на стенки кратера выброса, который препятствует дальнейшему развитию процесса.

Сравнение динамических явлений разрушения участков массива – горных ударов и внезапных выбросов – показывает, что они имеют ряд общих черт – нахождение участка массива в предельном напряженном состоянии; лавинообразный характер развития процесса разрушения; хрупкая форма разрушения горной породы при горном ударе и внезапном выбросе.

Сложность описания механизмов и прогноза данных явлений заключается в том, что внезапные выбросы происходят нерегулярно и не на всем шахтном поле, а только на отдельных участках. Все вышеуказанные теории внезапных выбросов угля и газа не могут объяснить большое количество газа, выделяющееся при внезапных выбросах угля и газа, чем это возможно по природной газоносности. Это приводит к тому, что большая часть методов прогноза относят к опасным те участки угольных пластов, которые оказываются неопасными.

Исследователи О. Н. Малинникова, Г. Н. Фейт из ИПКОН РАН [20, 21, 22] предполагают, что дополнительный объем метана, выделяющийся при ГДЯ, происходит в ходе механохимической деструкции молекул газа. Выбросоопасное состояние угольного пласта рассматривается как переход в состояние механохимической активации под действием деформации сдвига на органическую массу угля при формировании горногеологических нарушений. Сначала развязываются наиболее слабые метиленовые и кислород – метиленовые связи. В связи с этим, состояние предварительной механохимической активации выступает в роли одного из факторов формирования выбросоопасной ситуации.

Меры прогноза и предупреждения горных ударов и внезапных выбросов в значительной степени базируются на одних и тех же принципах, так как эти явления близки по своей природе и определяются сочетанием ряда схожих факторов.

Прогноз газодинамической опасности разделяется на региональный, локальный и текущий прогнозы.

Региональный прогноз представляет собой определение участков, склонных к газодинамическим явлениям в пределах месторождения или шахтного поля. На стадии регионального прогноза для шахтопластов устанавливаются критические по газодинамическим явлениям глубины. Критическая по внезапным выбросам глубина для угленосного района или месторождения устанавливается по газовому фактору и определяется по формуле [23]:

$$H_{kp} = H_5 + 8 \cdot \sqrt{\left(\frac{H_5}{gradX} - 10\right)^2 + 10} + \frac{1}{3} \cdot (V^{daf} - 22)^2 + \frac{3000}{F+20}, \quad (1.6)$$

где H_5 - глубина залегания поверхности метановой зоны, м; ΔH - приращение глубины залегания пласта между изогазами 5-15 m^3/m , м; $gradX = \frac{10^3}{\Delta H}$ - градиент нарастания метаноносности пласта от поверхности метановой зоны на 100м; V^{daf} - среднее значение выхода летучих веществ из угольного пласта, залегающих в зоне метановых газов, %; F - среднее содержание фюзинита в угольном пласте, %.

Задачами регионального прогноза являются:

1. Определение характера тектонических нарушений с точки зрения влияния их на структуру угольных пластов, резкое изменение элементов залегания и создание зон раздробленного, перемятого угля.

2. Определение степени однородности структуры угольного пласта. Наиболее опасными являются пласты, состоящие из трех и более угольных пачек различной прочности.

3. Установление наличия в почве или кровле прочных пород. Чем больше мощность и прочность таких пород, тем больше образующаяся вокруг выработки область концентраций напряжений, тем больше потенциальная энергия, накапливающаяся в угольном пласте, и тем сильнее может быть горный удар при увеличении давления или обрушении основной кровли.

4. Определение глубины разработки угольных пластов.

5. Определение угла наклона выработок. Влияния наклона выработки проявляется, начиная с угла падения 22-25. Чем больше угол наклона, тем это влияние сильнее.

6. Определение давления газа в угле. Внезапные выбросы могут происходить при давлении газа в угле 1,5-2 атм.

7. Выявление гидрогеологических условий для установления степени влажности угля.

8. Учет взаимного расположения пластов в свите, мощности и прочности пород междупластий[5].

На глубинах ниже критической применяется локальный прогноз выбросоопасности, к которому относится текущий прогноз по структуре пласта и начальной скорости газовыделения при поинтервальном бурении шпуров. Этот метод дает наиболее достоверную информацию, но без учета фактора напряженного состояния угольного пласта. Затем появился метод текущего прогноза – сейсмоакустический, - основанный на фиксации генерирующих трещин под действием горного давления и давления газа [24]. Этот метод плохо защищен от внешних и внутренних помех и шумов действующего оборудования, кроме того, некоторые пласты имеют очень слабую акустическую активность. Поэтому был предложен более надежный способ контролировать напряженное состояние массива горных пород: метод спектрально-акустический, правда, без возможности учета газового фактора. С появлением аппаратуры автоматизированного контроля метана, разработанной ИГД им. Скочинского и институтом угля СО РАН, появилась возможность автоматического контроля газового фактора при прогнозе внезапных выбросов угля и газа [25].

К локальному прогнозу относится определение степени газодинамической опасности в определенной зоне пласта, например в зоне вскрытия, или целике угля. На опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа пластах локальный прогноз выполняется перед вскрытием угольных пластов, на пластах, склонных к горным ударам, - в пластовых выработках и перед вскрытием пластов стволами.

Для выполнения локального прогноза выбросоопасности в месте вскрытия по пласту бурят разведочные скважины (не менее двух), отбирают угольные керны для определения коэффициента крепости слагающих пласт пачек

угля. После чего замеряют давление газа, исходящего из скважины. В Кузнецком бассейне прогноз выбросоопасности пласта в месте вскрытия определяют по показателю P_0 из выражения:

$$P_0 = 0,1P_{\text{зmax}} - 14f_{\text{min}}^2, \quad (1.7)$$

где $P_{\text{зmax}}$ - наибольшее давление газа в пласте на данной глубине от земной поверхности, МПа; f_{min} - наименьшее значение коэффициента крепости угля по угольным пачкам, выявленным разведочной скважиной. При $P_0 \geq 0$ зона пласта в месте вскрытия считается опасным.

В методе локального прогноза выбросоопасности пласта при его вскрытии используются такие факторы, как давление газа в пласте и его прочностные характеристики (крепость). Природная газоносность, степень метаморфизма угля, его вещественный состав, тектоническое строение, а в последнее время и стратиграфическое положение пласта в значительной мере определяют его зональную выбросоопасность и поэтому используются для зонального уточнения критических глубин проявления внезапных выбросов [26]. Поскольку большинство факторов выбросоопасности учтено методами регионального и зонального прогноза, задачей текущего прогноза является выявление участков, на которых имеет место превышение основными факторами, определяющими выбросоопасность, некоторых критериальных значений. Локальные изменения свойств пласта и напряженного состояния были заложены природой в процессе метаморфизма угля и имевших место тектонических движений земной коры, а также появились в процессе ведения горных работ. На выбросоопасных участках это проявляется в изменении структуры пласта (появляются новые или изменяются по мощности, установленные ранее пачки нарушенного угля), что сопровождается изменениями и газового фактора (как правило, газоносность и давление газа здесь возрастают, а коэффициент фильтрации уменьшается), и фактора напряженного состояния (либо появляются дополнительные напряжения тектонического или технологического характера, либо в окрестностях слабых, нарушенных углей появляются зоны повышенного горного давления, либо оба эти фактора

действуют одновременно). Отсюда в способе текущего прогноза выбросоопасности предметом контроля является появление в пласте или изменение по мощности пачек слабого угля, увеличение действующих напряжений и рост давления газа и газоносности.

На практике очень трудно осуществить прогноз выбросоопасности пластов, основываясь на главных положениях и теориях, это связано невозможностью оперативного определения давления газа в пласте. В этой связи особую актуальность приобретают методы текущего контроля и предупреждения газодинамических явлений.

Текущий прогноз представляет собой постоянный контроль за газодинамической опасностью забоя при проведении выработок и ведении очистных работ на опасных и угрожаемых по внезапным выбросам пластах.

При проведении нисходящих подготовительных выработок на крутых пластах применяется автоматизированный прогноз с применением аппаратуры контроля метана (АКМ). Выбросоопасность в очистных выработках шахт Кузбасса оценивается по результатам комплексного прогноза выбросоопасности в очистных забоях. При оценке выбросоопасности на шахтах Кузбасса как дополнительный метод в сочетании с вышеуказанными используется метод прогноза по амплитудно-частотным характеристикам искусственного сигнала. Также допускается сочетание методов сейсмоакустического прогноза и по начальной скорости газовыделения. При этом по начальной скорости газовыделения уточняются наличие и границы опасных зон, установленных сейсмоакустическим методом. На шахтах области применяется прогноз выбросоопасности пород по результатам кернового бурения[27].

Для устранения недостатков сейсмоакустического метода был предложен акустический (спектрально-акустический) метод прогноза выбросоопасности, основанный на спектральном анализе шумов работающего горного оборудования. За последние годы появились усовершенствования метода как аппаратного, так и методического характера [28, 29, 30]. Недостаток его состоит в том, что он не контролирует газовый фактор выбросоопасности.

Еще одним методом прогноза выбросоопасности является температурный метод, который основывается на снижении температуры забоя в тех его выбросоопасных участках, которые интенсивно освобождают газ, находящийся в угле под давлением [31], но он также контролирует только один фактор выбросоопасности – газовый.

В настоящее время существуют достаточно надежные способы текущего прогноза ГДЯ на основе выхода буровой мелочи и начальной скорости газовыделения [32,33,34]. Экспериментально установлено, что в опасных зонах угольных пластов фактический выход буровой мелочи превышает проектный в несколько раз. Категорию выбросоопасности определяют по номограмме, учитывающий выход буровой мелочи с погонного метра скважины и расстояния от борта выработки до участка, где наблюдался выход штыба. По методики ВНИИМ дополнительно определяют в штыбе содержание частиц размером более 3 мм для выделения зон, склонных к обрушениям.

Для выполнения текущего прогноза при проведении по пласту подготовительных выработок бурят контрольные шпуры (не менее двух). Контрольные шпуры бурят интервалами длиной 1 м, за исключением первого интервала, длина которого составляет 0,5 м. После окончания бурения каждого интервала измеряют скорость газовыделения и выход бурового штыба. По максимальным значениям начальной скорости газовыделения и выхода бурового штыба подсчитывают показатель R выбросоопасности:

$$R = (S_{\max} - 1,8) \cdot (q_{H.\max} - 4) - 6, \quad (1.8)$$

где $S_{\max}$ - максимальное значение выхода бурового штыба с 1 м шпура, л/м; $q_{H.\max}$ - максимальное значение начальной скорости газовыделения, л/(мин·м).

При $R \geq 0$ зона пласта считается выбросоопасной. Если по всем контрольным шпурам получено $R < 0$, то пересекаемая выработкой зона пласта неопасная, и забой можно продвинуть безопасно на 4-5 м.

По газовыделению и выходу бурового штыба из контрольных шпуров можно также прогнозировать опасность проявлений суффляров, внезапных

высыпаний угля и горных ударов. Для такого дифференцированного прогноза удобно пользоваться номограммой (рис.1.1)[33].

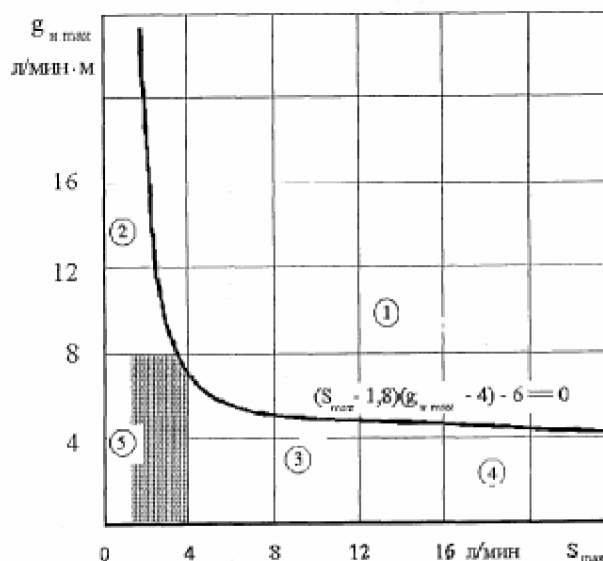


Рис.1.1. Номограмма для оценки опасности газодинамических явлений угольных пластов: 1 – опасно по внезапным выбросам угля и газа; 2 – опасно по суфлярам; 3 – опасно по горным ударам; 4 – опасно по внезапным высыпаниям угля; 5 – не опасно по газодинамическим явлениям

Для оценки выбросоопасности при прогнозе используются параметры, характеризующие прямо или косвенно природные, горнотехнологические и технологические факторы, определяющие возможность проявления техногенных геодинамических явлений.

Причина неудач прогнозирования выбросоопасности угольных пластов в том, что все применяемые в настоящее время методы прогноза (за исключением текущего прогноза по амплитудно-частотным характеристикам искусственного сигнала) физически не обоснованы, а получены чисто статистическим путем. Это приводит к тому, что при обосновании прогноза учитываются только действующие в данной ситуации факторы и при любом изменении ситуации, прогноз перестает правильно работать.

Несмотря на то, что угольный пласт с определенной глубины отнесен к угрожаемому или опасному по внезапным выбросам угля и газа, выбросы происходят нерегулярно и не на всей территории шахтного поля, а в определенных точках, как было указано выше. И это связано с дополнительными

факторами, которые до сих пор не учитывались ни при разработке теории внезапных выбросов, ни при разработке методов их предупреждения.

Условия возникновения и формы проявления внезапных выбросов весьма разнообразны; в ряде случаев процессы, сопутствующие внезапным выбросам, развиваются в диаметрально противоположных направлениях. А так же остается не решенным главный вопрос, почему все-таки происходят и будут происходить внезапные выбросы угля и газа. При относительно небольшой пористости, газоносность угольных выбросоопасных пластов очень велика и количество природного газа, который может находиться в свободной фазе невелико, соответственно нужно рассматривать нахождение природного газа (метана) во всех фазовых состояниях, а в частности, в твердых растворах природного газа по типу газогидратов и с учетом кинетики образования и диссоциации ТУГР прогнозировать газодинамическую ситуацию призабойной части массива угольных пластов.

Для существующих глубин разработки на шахтах Кузбасса характерны термодинамические параметры, предполагающие наличие в угольных пластах твердых углегазовых растворов природных газов по типу газовых гидратов, которые при определенных условиях могут интенсивно диссоциировать, и участвовать в образовании выбросоопасных ситуаций. Следовательно, задача определения границы зоны твердых углегазовых растворов природных газов по типу газогидратов в угольных пластах является актуальной, так как решает проблемы связанные с безопасностью горных работ [34].

1.4 Возможность существования твердого углегазового раствора по типу газогидратов и их влияние на газодинамические явления в краевых зонах угольных пластов

1 декабря 1981г. и 11 июля 1986 г. д.т.н. А. Д. Алексеевым, д.т.н. А. Т. Айруни, д.т.н. И. Л. Эттингером и др. было «Установлено неизвестное ранее

свойство органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов, возникновение которых происходит как в результате метаморфизма угля, так и в результате внедрения свободного газа в межмолекулярное пространство угля при совместном воздействии газового давления и механической нагрузки» [35]. Понятие о твердых растворах и сам термин ввел Вант-Гофф.

Д.т.н. И. Л. Эттингером были перечислены возможные виды существования метана в угольном пласте: 1) в порах угольного пласта; 2) в конденсированном состоянии; в этом случае можно говорить об адсорбции или абсорбции; понятие адсорбции применимо только к тем веществам, у которых имеется значительная внутренняя поверхность, которой нет у подавляющего числа природных углей; остается абсорбция, т. е. существование метана во всем объеме угля; абсорбция метана позволяет создать представление о наличии твердого «метаноугольного раствора» [36].

Возможность образования метана непосредственно в процессе внезапного выброса была впервые рассмотрена Р. Л. Мюллером [37]. Он предполагал, что при энергии активации в 35 ккал/моль можно получить весьма значительные выделения метана, образованного от оторвавшегося от бахромы угля радикалов и атомов водорода. «Происходит разрыв наиболее слабых связей в бахроме угля и образование свободных радикалов, в том числе метильных групп и свободного водорода, которые объединяясь, образуют молекулу метана» [8].

Были проанализированы внезапные выбросы угля и газа на шахтах России, в частности Кузнецкого бассейна по данным ВостНИИ (табл.2). Количество выброшенного газа значительно превышает природную газоносность угольных пластов. Одной из причин дополнительного выделения газа может являться ТУГР по типу газогидратов.

Таблица 1.2

Статистические данные по внезапным выбросам угля и газа на шахтах
Кузнецкого бассейна [38, 39]

Бассейн, Шахта, Пласт	Количество выброшенного:		Количество газа, %		Газоносность пласта, м ³ /т
	Угля, т	Газа, м ³	X ₁	X ₂	
Кузнецкий, Северная, Владимировский	55,0	2250	61,1	38,9	25,0
	90,0	8500	26,5	73,5	
	53,0	4500	29,4	70,6	
	120,0	8000	37,5	62,5	
	200,0	10000	50,0	50,0	
Кузнецкий, Усинская, III	150,0	8000- 10000	30,0- 46,9	70,0- 53,1	20,0-25,0

X₁-количество газа, обусловленное природной газоносностью;

X₂- дополнительный объем выброшенного газа.

Газовые гидраты – твердые кристаллические вещества, - классические представители клатратных соединений [40, 41, 42, 43], похожие на снег или рыхлый лед. Способностью образовывать гидраты обладают все гидрофобные газы, в том числе природный газ, находящийся в угольных пластах.

Известно, что метан в угольных пластах может находиться в различных формах связи с углем: свободном, сорбированном, растворенном, газокристаллическом в виде ТУГР [44]. Формы нахождения метана в угольных пластах до сих пор не учитывались при разработке теории внезапных выбросов, а также при разработке методов их прогноза и предотвращения. Метан в угольных пластах может находиться в виде газовых гидратов и представляет собой молекулярные соединения, в которых молекулы гидрофобных газов включены в полости кристаллического каркаса, построенного посредством водородных связей из молекул воды. Помимо газовых гидратов метан может находиться в виде

твердых растворов природного газа, а также в виде интеркаляционных соединений, т.е. соединений включения, образующиеся в результате обратимой реакции внедрения молекул газа в межслоевое пространство кристаллических веществ со слоистым типом структуры.

При определенном термодинамическом сочетании и снижении горного давления происходит диссоциация ТУГР с выделением свободного газа. В замкнутом объеме пор растет давление свободного газа, существенная часть которого сорбируется поверхностью угля. Поскольку распад твердых растворов сопровождается выделением энергии, то одним из его следствий является образование новой поверхности, развитие микротрещин. В природной среде, где давления близки к атмосферному, в большинстве случаев газовые гидраты встречаются в виде трех структурных типов – КС-I (кубическая структура I), КС-II (кубическая структура-II), ГС-III (гексагональная структура III) табл.1.3. В гидратных соединениях включения кристаллическая решетка хозяина построена из молекул воды, связанных между собой водородными связями, а молекулы (атомы, ионы) гостя полностью или частично располагаются в полиэдрических пустотах этой решетки.

Таблица 1.3

Типы клатратных каркасов, найденные среди газовых гидратов [40]

Тип, пространственная группа	Параметры ячейки a , c (Å), плотность полого каркаса ρ , г/см ³	Формула элементарной ячейки	Гидратное число h	Примеры гостевых молекул
Кубическая I КС-I Pm3n	$a = 12,0$ $\rho = 0,796$	$6T \cdot 2D \cdot 46H_2O$	$7\frac{2}{3}^*$ $5\frac{3}{4}^*$	цикло- C_3H_6 CH_4 , Xe, H_2S
Кубическая II КС-II Fd3m	$a = 17,1$ $\rho = 0,812$	$8H \cdot 16D \cdot 136H_2O$	17^* $5\frac{2}{3}^{**}$	SF_6 , ТГФ, CCl_4 Ar, Kr
Гексагональная III (структура H) ГС-III P6/mmm	$a = 12,3$ $c = 10,2$ $\rho = 0,768$	$E \cdot 2D' \cdot 3D \cdot 34H_2O$	34	$CH_3C_6H_{11} + H_2S$
Тетрагональная I ТС-I P4 ₂ /mmm	$a = 23,5$ $c = 12,3$ $\rho = 0,757$	$4P \cdot 16T \cdot 10D \cdot 172H_2O$	8,6	Br_2

* Заняты только большие полости.

** Заняты и большие и малые полости.

У клатратных гидратов кристаллическая решетка хозяина построена из молекул воды, соединенных друг с другом водородными связями. Молекулы гостя гидратообразователя внедрены во внутренние полости кристаллической решетки и удерживаются в них ван-дер-ваальсовыми силами рис. 1.2.

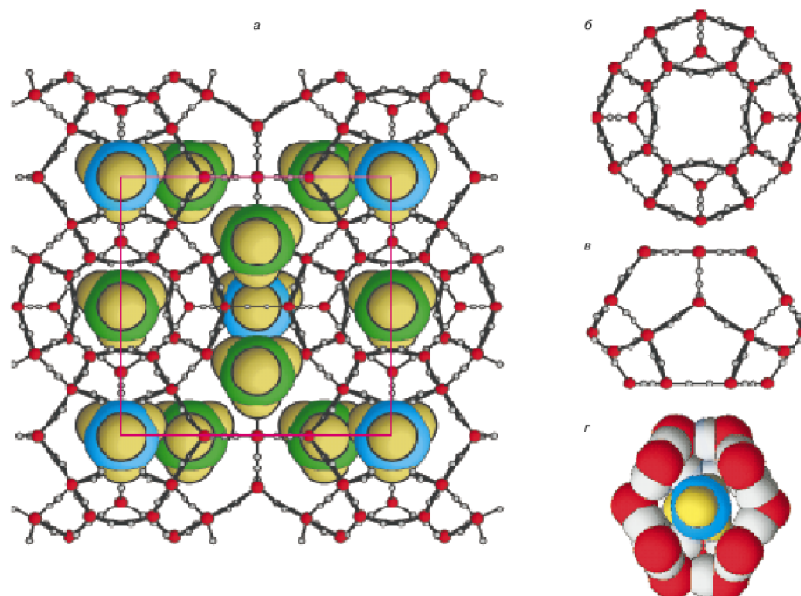


Рис.1.2. Структурный фрагмент молекулы газогидрата метана типа КС-1; *а*-D- (голубого цвета) и T-полостях (зеленого цвета)(на рисунке выделена элементарная ячейка); б – и в – T-полость (вид сверху и вид сбоку); г – D-полость с включенной молекулой метана в ван-дер-ваальсовых очертаниях хозяйской и гостевой подсистем [42]

Таблица 1.4

Типы полостей клатратных молекул [42]

Полость	Число вершин	Число ребер	Число граней*	Свободные диаметры полостей, Å	Объем многогранника, Å ³
D (12-эдр)	20	30	12(5 ¹²)	5,2	168
T (14-эдр)	24	36	12(5 ¹² 6 ²)	5,32** 6,4	230
P (15-эдр)	26	39	15(5 ¹² 6 ³)	6,1** 7,0	260
H (16-эдр)	28	42	16(5 ¹² 6 ⁴)	6,6	290
E (20-эдр)***	36	54	20(5 ¹² 6 ⁸)	9,6** 7,3	

* Обозначения 5¹²6³ и им подобные расшифровываются так: 15-эдр имеет 12 пентагональных и три гексагональных грани.

** 14-, 15- и 20-эдры можно приблизительно принять за сплюснутые и вытянутые сфериды вращения, которые имеют два диаметра.

*** В ГС-III E-полость встречается в сочетании с D- и D'-полостями (формула последней 4¹5⁶6³).

Процессы образования ТУГР по типу газогидратов в угольных пластах определяются наличием влаги и определенным соотношением давления и температуры системы. Значения данных параметров, соответствующие фазовому переходу, определяются равновесными значениями (В. А. Истомин, В. С. Якушев), представленными на рис.1.3.

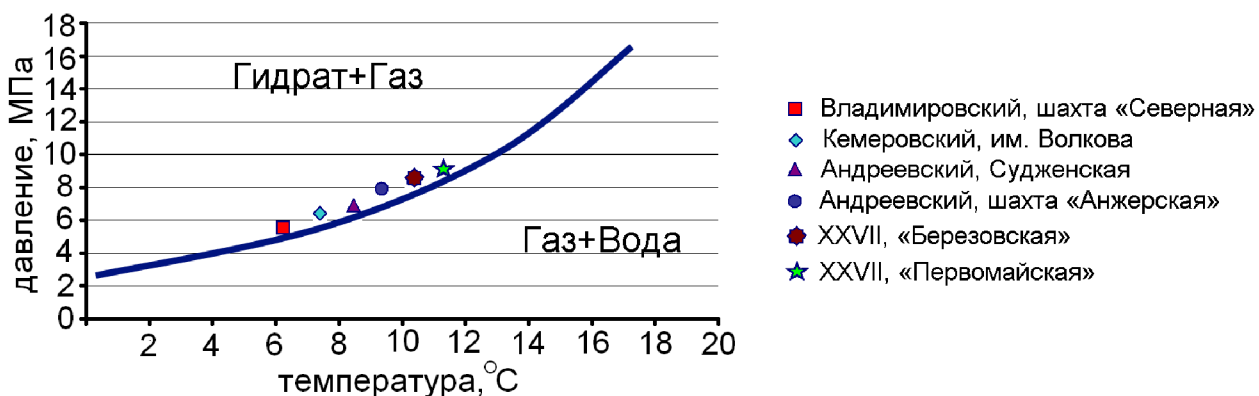


Рис. 1.3. Р–Т-проекции фазовых диаграмм систем метан–вода в области гидратообразования

Термодинамические условия в угольных пластах Кузбасса по данным ВостНИИ и каталога шахтопластов Кузнецкого, Карагандинского и Печорского угольных бассейнов с характеристикой горно-геологических факторов и явлений представлены в табл.1.5.

Таблица 1.5

Величины газового давления и температуры в угольных пластах на шахтах Кузбасса

Угольный пласт, шахта	Глубина, м	Газовое Давление, МПа	Температура угол.пласта, °С
1) Андреевский, шахта «Анжерская»	630	4-7	10 - 12
2) Владимирский, шахта «Северная»	370	4-5	6-7

3) Кемеровский, им. Волкова	290	4-7	7-10
1) XXVII, «Березовская»	294	4-9	10-12
5)XXVII, «Первомайская»	280	4-9	10-12
6)Андреевский, Судженская	538	4-9	7-10

При резком падении напряжений, происходящем вследствие ведения горных работ (А. С. Христианович) или при попадании выработки в зону угольного пласта с низкими прочностными свойствами, в тонком слое угля, лежащем впереди забоя выработки, под действием растягивающих напряжений из пор могут образоваться трещины в плоскостях, ортогональных направлению наименьшего сжатия, т. е. параллельно поверхности забоя выработки. Прорастание мелких трещин вызывает падение газового давления в них до значений ниже давления равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – ТУГР». Вследствие этого начинаются два процесса: десорбция газа с поверхности макропор и трещин, а также диссоциация ТУГР по типу газогидратов, которые, в свою очередь, приводят к выделению дополнительных объемов газа и перераспределению его давления в краевой зоне и формированию выбросоопасной ситуации или интенсивной фильтрации газа в сторону забоя выработки и ее дальнейшее загазирование в зависимости от коэффициента проницаемости на границе зоны неупругих и упругих деформаций. Таким образом, разработка и обоснование метода прогноза газодинамических явлений в подготовительных выработках с учетом ТУГР по типу газогидратов является актуальным.

Исходя из изученных материалов и анализа литературы по данной теме исследования, были сформулированы цель и поставлены задачи, которые приведены в общей характеристике работы.

ВЫВОДЫ

- В данной главе диссертационной работы рассмотрены основные модели газодинамических явлений, созданные рядом известных ученых, таких как академики А.А. Скочинский, С.А. Христианович, проф. В. В. Ходот, проф. В. И. Мурашев, проф. Л. Н. Быков и проф. А. Э. Петросян, проф. О. И. Чернов, проф. И.М. Петухов и проф. А.М. Линьков и недостатки данных теорий. Несмотря на многообразие предложенных моделей, нет однозначной теории, описывающей механизм и природу формирования внезапных выбросов угля и газа.
- Анализ литературных источников по проблемам газодинамических явлений показал, что многие отраслевые и академические научно-исследовательские институты и видные ученые не учитывали при разработке теорий и механизмов внезапных выбросов роль твердого углегазового раствора природного газа по типу газогидратов, скорость их диссоциации и размеры, что может в большей степени влиять на газодинамическую активность при диссоциации ТУГР по типу газогидратов и формирование различных видов ГДЯ.
- Исходя из термобарических условий залегания угольных пластов, было установлено возможное существование твердого углегазового раствора природного газа по типу газогидратов в краевых зонах угольных пластов.

Из вышеперечисленного следует, что **целью работы** является разработка и обоснование метода прогноза ГДЯ в подготовительных выработках с учетом ТУГР по типу газогидратов.

Для достижения поставленной цели в рамках данной диссертационной работы должны быть решены следующие **задачи**:

1. Установить термодинамические условия образования ТУГР по типу газогидратов, их размеры и распределение в угольной матрице.
2. Разработать математические модели процесса диссоциации ТУГР по типу газогидратов для расчета скорости диссоциации и подвигания границы

разложения в зависимости от размеров кристаллогидратов и распределения в угольной матрице.

3. Установить зависимость давления свободного газа при диссоциации ТУГР по типу газогидратов от гидратонасыщенности и коэффициента проницаемости краевой зоны угольного пласта.

4. Определить условия, при которых формируются внезапные выбросы угля и газа или загазирования выработок, с учетом зон, содержащих ТУГР по типу газогидратов в краевой зоне угольного пласта.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В УГОЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

2.1 Исследование процессов образования ТУГР по типу газогидратов в угольной матрице при различных условиях

Проблема борьбы с внезапными выбросами угля и газа при подземной разработке угольных месторождений остается актуальной на сегодняшний день, но неоднозначность интерпретаций результатов текущего прогноза не позволяет однозначно судить о возможности проявлений газодинамических явлений. На сегодняшний день на шахтах России произошло 918 внезапных выбросов угля и газа [2].

Условия возникновения и формы проявления газодинамической активности угольных пластов разнообразны. Чаще всего процессы, приводящие к внезапным выбросам угля и газа, развиваются в диаметрально противоположных направлениях. В настоящее время до конца не решены вопросы, связанные с формами связи метана с угольной матрицей, а так же неясно, откуда берутся большие объемы газа при внезапных выбросах, превышающих объемы, обусловленные природной газоносностью угольных пластов.

Было показано [45], что в «свободном» состоянии газа в поровом пространстве пласта находится значительно меньше, чем фиксируется при внезапных выбросах. Возникает вопрос о возможности существования иной формы связи молекул газа с угольной матрицей, кроме адсорбционной. Первым этапом нашего исследования стало изучение термодинамических условий, т.е. параметров давления и температуры, в разрабатываемых угольных пластах и установление возможности образования в них твердых растворов природного газа по типу газовых гидратов.

Газовые гидраты – соединения включения, в которых молекулы метана встраиваются в каркас, построенный из молекул воды. В этом состоянии метан занимает намного меньший объем, чем при нормальных условиях. Для их образования достаточно материнской влаги, содержащейся в угольных пластах. Кроме того, твёрдые растворы природного газа могли образовываться и в различные исторические периоды и образовывать, так называемые, реликтовые месторождения[46, 47].

Кинетика образования и разложения твердых растворов природного газа по типу газогидратов в угольных пластах до сих пор остается плохо изученной, таким образом основной целью нашего исследования было выявление форм связи молекул метана в угольной матрице и его распределения в виде газогидратов и ТУГРов (твердого углегазового раствора) при определенных термодинамических условиях.

Для изучения условий образования и диссоциации гидратов природного газа в порах угольной матрицы при повышении и понижении температуры были проведены экспериментальные исследования в Институте неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН в лаборатории клатратных соединений под руководством зав. лаб., д.х.н. Манакова А.Ю. и профессора, д. т. н., зав. кафедрой физики КузГТУ Дырдина В. В. на установке по изучению газогидратов.

Установка предназначена для изучения газовых гидратов в трехфазной смеси: уголь – газ – вода. Она дает возможность осуществлять автоматический сбор данных измеряемых параметров: давление, температура. В состав установки входит пакет программного обеспечения (Mit8.0) и ноутбук, схема установки приведена на рис.2.1.

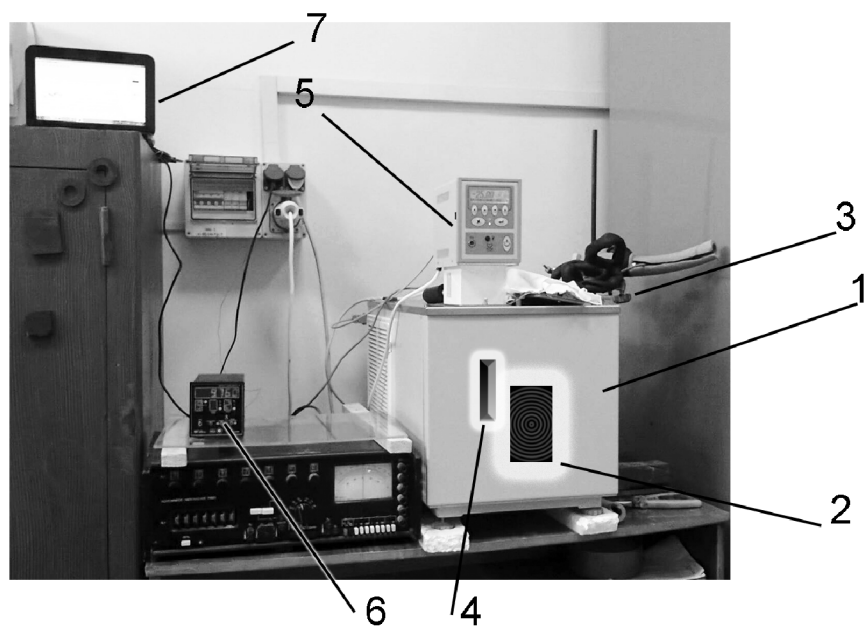


Рис.2.1. Схема экспериментальной установки:

1 - программируемый термостат; 2 – автоклав с углем и метаном; 3 –газовый кран;
4 и 5 – датчики температуры идавления; 6 –измерительное устройство (типа mit8);
7 – самописец (ПК)

На данной установке моделируются термодинамические условия, близкие к природным условиям залегания угольного пласта.

В ходе эксперимента использовали уголь марки «К», отобранный на ш. «Березовская» из выбросоопасной пачке пласта XXVI, глубина залегания около 400м. Отобрана фракция 1÷2мм, которая хранилась в инертном газе. Зольность угля составляла около 20%.

Перед началом эксперимента в течение 5 дней уголь массой 53,21г., предварительно высушенный в вакуумной печи при температуре 105С, выдерживали в эксикаторе над дистиллированной водой для достижения равномерного распределения необходимой влажности угля. Влажность исследуемых проб находилась в диапазоне 1-4%, но наиболее показательной оказалось проба угля влажностью 2,53%, что соответствует природной влажности угольных пластов, опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа

(рис.2.2). Только при минимальной влажности навески 1,5-1,7 %, фиксировали характерные пики гидратообразования.

Подготовка образца исключала контакт поверхности угля с жидкой водой, внешне уголь выглядел сухим, требуемая влажность достигалась посредством молекулярной сорбции на всей поверхности пор.

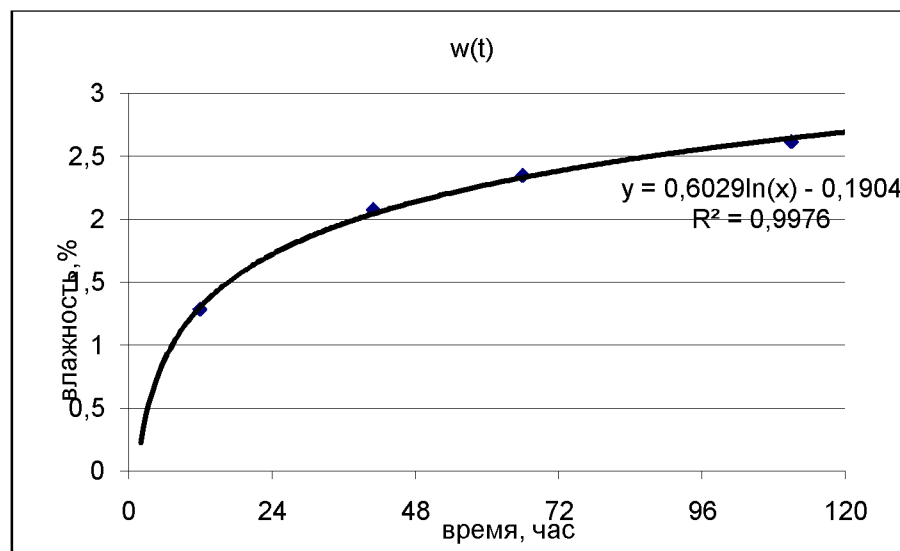


Рис. 2.2. График насыщения угля парами воды с течением времени

Затем уголь помещали в автоклав и закачивали в него метан под давлением 10 МПа и охлаждали в течение двух суток до температуры -25°C . После чего автоклав с углем помещали в программируемый термостат, в котором температура изменялась в диапазоне -25°C до $+25^{\circ}\text{C}$. Перед началом основного этапа эксперимента давление было сброшено до 4 МПа при температуре -25°C . Затем температура повышалась со скоростью 10 К/час, каждые девять секунд производилась запись текущего значения давления в автоклаве и температуры теплоносителя. Исходя из критерия Фурье, а также решения нестационарного уравнения теплопроводности можно считать, что температура в каждой точке нашего автоклава изменяется с постоянной скоростью $v = 2,78 \cdot 10^{-3} (\text{K}/\text{c})$. В окрестности каждой точки термодинамическое состояние можно считать квазиравновесным, газовое давление по всему автоклаву имеет постоянное значение, но температура меняется в зависимости от расстояния до оси симметрии. Максимальная разность температур внутри автоклава $\Delta T = 0,6 \text{ K}$.

С помощью специальных датчиков регистрировали температуру и газовое давление, которые изменялись с постоянной скоростью, а также записывались автоматически в течение 8 часов.

После обработки экспериментальных данных, была получена зависимость давления от температуры угольного образца, представленная на (рис.2.3а). Ступенька на Р-Т диаграмме обусловлена появлением дополнительного объема метана, перешедшего из твердой фазы в газовую.

Вблизи точки 7С и 5,0 МПа виден скачок давления, связанный с разложением газогидратов метана в угольных порах, который соответствует точке фазового перехода. Эксперимент проводился при температуре от -25 С до +25С в прямом и обратном направлении (рис.2.3.б). В общем случае наблюдается возрастание и падение давления около точки фазового перехода.

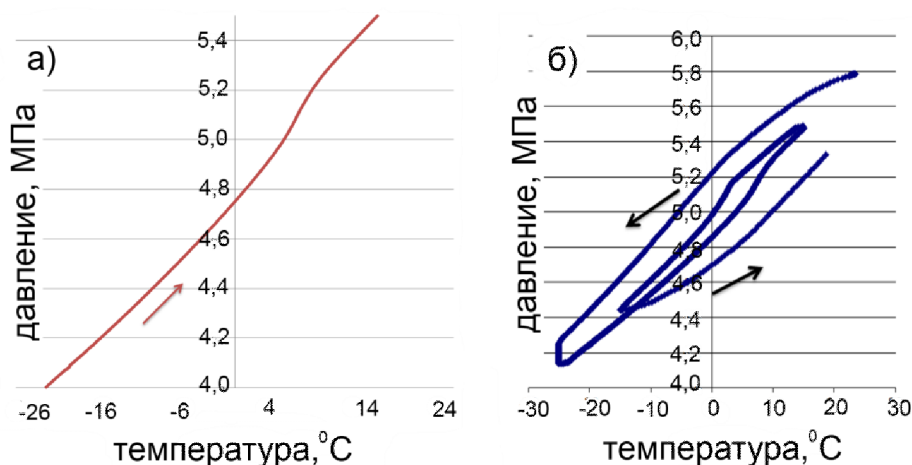


Рис.2.3. Зависимости давления газа в автоклаве с угольным образцом, с течением времени при равномерном повышении температуры а) и при ее циклическом изменении б)

Определим количество газа, выделившегося в эксперименте при разложении газогидратов. Для этого рассчитаем величины относительного дифференциального изменения давления и температуры, между соседними отсчетами (j – номер отсчета), по следующей схеме:

$$\frac{dP}{P} = \frac{P_{j+1} - P_{j-1}}{2P_j} ; \quad \frac{dT}{T} = \frac{T_{j+1} - T_{j-1}}{2T_j} . \quad (2.1)$$

Выразим теперь связь между изменениями давления, температуры и количества вещества в газовой фазе. В наших измерениях общий объем V , доступный для газовой фазы, не изменялся. Изменялось количества вещества n в связи с выходом сорбированного метана и диссоциации газогидратов, т.е. изменялся молярный объем $v = V/n$. Изменение молярного объема будет определяться по формуле: $dv = -v(dn/n)$.

Из уравнения Ван-дер-Ваальса выразим давление и возьмем полный дифференциал от обеих частей.

$$dP = \frac{R}{v-b}dT + \left(\frac{RTv}{(v-b)^2} - \frac{2a}{v^3} \right) \frac{dn}{n}.$$

В результате получим:

После несложных преобразований это выражение можно записать в следующем виде:

$$\frac{dn}{n} = \left(\frac{dP}{P} - \left(1 + a/Pv^2 \right) \frac{dT}{T} \right) / \left(1 + \frac{b}{v-b} - \frac{a}{Pv(v-b)} \right) \quad (2.2)$$

Молярный объем газовой фазы, на основе измерений давления и температуры, рассчитан по уравнению Ван-дер-Ваальса. На рис.2.4. изображены экспериментальные значения относительного (2.1) изменения давления и температуры, а также рассчитанное (2.2) значение относительного увеличения количества вещества в газовой фазе. Для того чтобы снизить влияние флуктуаций измеряемых величин, проведено усреднение каждой величины по 21 точкам, что соответствует примерно трем минутам измерений, средние значения также изображены на (рис.2.4).

Скорость изменения температуры поддерживалось постоянной, на «заднем фоне» (рис. 2.4) видно, что относительное изменение температуры не испытывает никаких скачков. Вблизи точки разложения газогидратов $T = 280K$ и $P = 5,0MPa$ виден большой скачок относительного изменения давления в газовой фазе, произошедшего из-за резкого увеличения количества вещества в газовой фазе. Рассчитанное (2.2) относительное изменение количества вещества также демонстрирует пиковое значение вблизи точки разложения газогидратов. Оно

всегда положительно, значит, при увеличении температуры сорбционное равновесие смещаете в сторону больших давлений газовой фазы. Некоторое различие « dn/n средн» справа и слева от пика объясняется тем, что после разложения газогидратов увеличилось абсолютное давление и сместилось сорбционное равновесие.

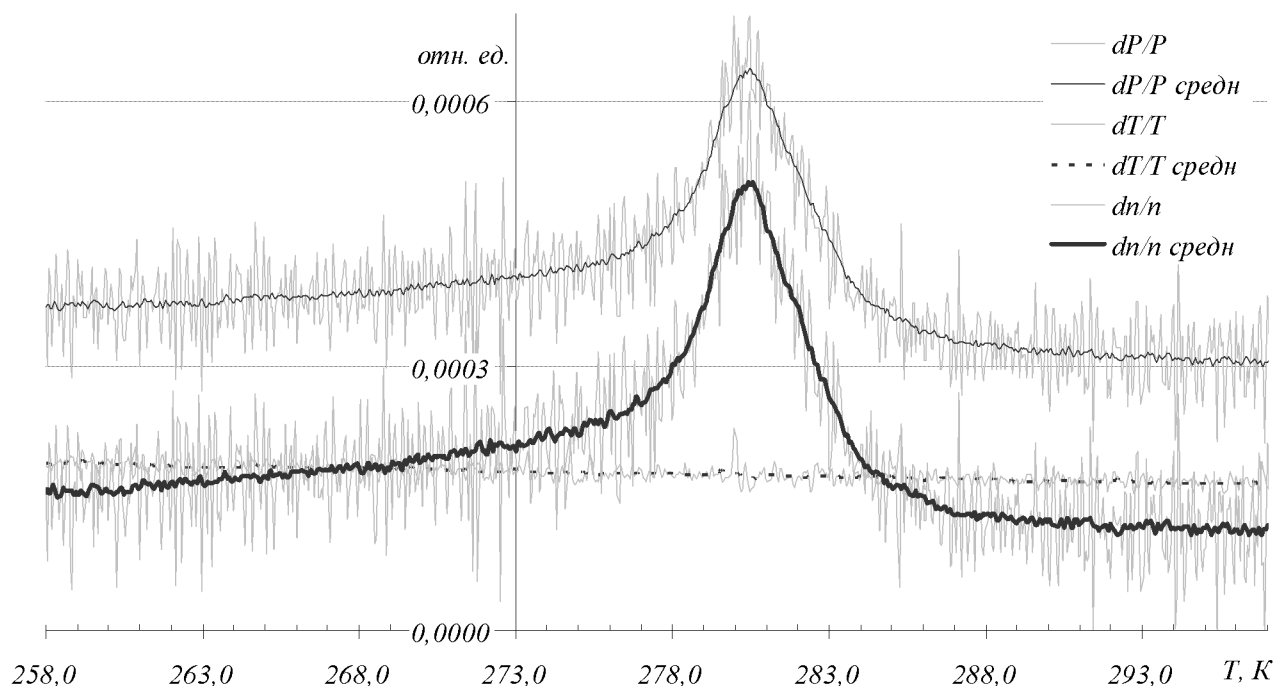


Рис.2.4. Относительное изменение давления, температуры и количества вещества в газовой фазе при повышении температуры

Исходя из результатов измерений, рассчитаем общее количество метана, выделившегося на этапе разложения газогидратов, в молях. Оно пропорционально площади пика, над горизонтальной аппроксимацией (на рисунке не изображено) линии « dn/n средн». Учитывая, что на протяжении пика произошло 202 отсчета давления и температуры, изменение количества вещества в условиях нашего эксперимента составило порядка 3,5%, т.е. $\Delta n = 0.035n$. В нашем автоклаве объем газовой фазы $V = 55.13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, его мы определили после эксперимента, выпуская из автоклава небольшую порцию газа и измеряя падение давления, без учета десорбции. По измеренным значениям температуры и давления в точке разложения газогидратов из уравнения Ван-дер-Ваальса был рассчитан молярный

объем газовой фазы $v = 0.392 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$, соответственно $\Delta n = 0.035 \cdot V / v = 4.9 \text{ ммоль}$. При нормальных условиях выделившееся количество метана занимает объем $0.11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, что составляет $2.1 \text{ см}^3 / \text{г} = 2.1 \text{ м}^3 / \text{т}$ угля.

С учетом массы угля и влажности можно рассчитать количество воды (в молях), заключенной в порах угля. Приняв формулу газогидрата $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, получим, что в гидратообразовании поучаствовало около 37% всей содержащейся воды. Оставшиеся две трети молекул воды либо находились в мелких порах, меньших минимального размера структурной единицы кристаллогидрата, либо находились в форме молекулярной сорбции без образования капелек жидкости. Либо, под воздействием капиллярных сил и молекулярных взаимодействий с угольной матрицей, образовывали клатратные соединения со смещенной точкой фазового перехода. Существует также возможность, что часть гидратов была образована в глубоких мелких порах, разложение этих гидратов шло медленнее скорости изменения температуры в нашем эксперименте.

В эксперименте использовался чистый метан и, с учетом размытости пиков, термодинамические условия соответствовали точкам на кривой фазового перехода. Изменение состава природного газа в угле смещает точку фазового равновесия твердых растворов [48]. Если рассматривать в качестве гидратообразующего природный газ, содержащий, помимо метана, 20% углекислого газа, то давление в точке фазового равновесия для температуры $+8^\circ\text{C}$ снижается с 5.2 МПа до 4.3 МПа. Смесь метана с 4% сероводорода образует устойчивый гидрат уже при $+15^\circ\text{C}$ и 5 МПа. А смесь метана с 25% этана образует гидрат уже при $+12^\circ\text{C}$ и давлении 4 МПа.

С точки зрения формирования выбросоопасных ситуаций очень существенна кинетика процесса газовыделения. Частицы газогидрата, заключенного в порах угольного вещества обладают большой удельной поверхностью. Не только скорость разложения, но и скорость образования газогидратов достаточно велика. Мы провели эксперимент, в котором пересекли точку фазового равновесия сначала в одном, потом в другом направлении со

скоростью 10К/час. На (рис. 2.5) положительные значения относительного изменения давления и температуры соответствуют росту этих величин, а отрицательные – уменьшению. Видны характерные пики, как при разложении (положительный пик давления), так и при образовании газогидратов (отрицательный пик).

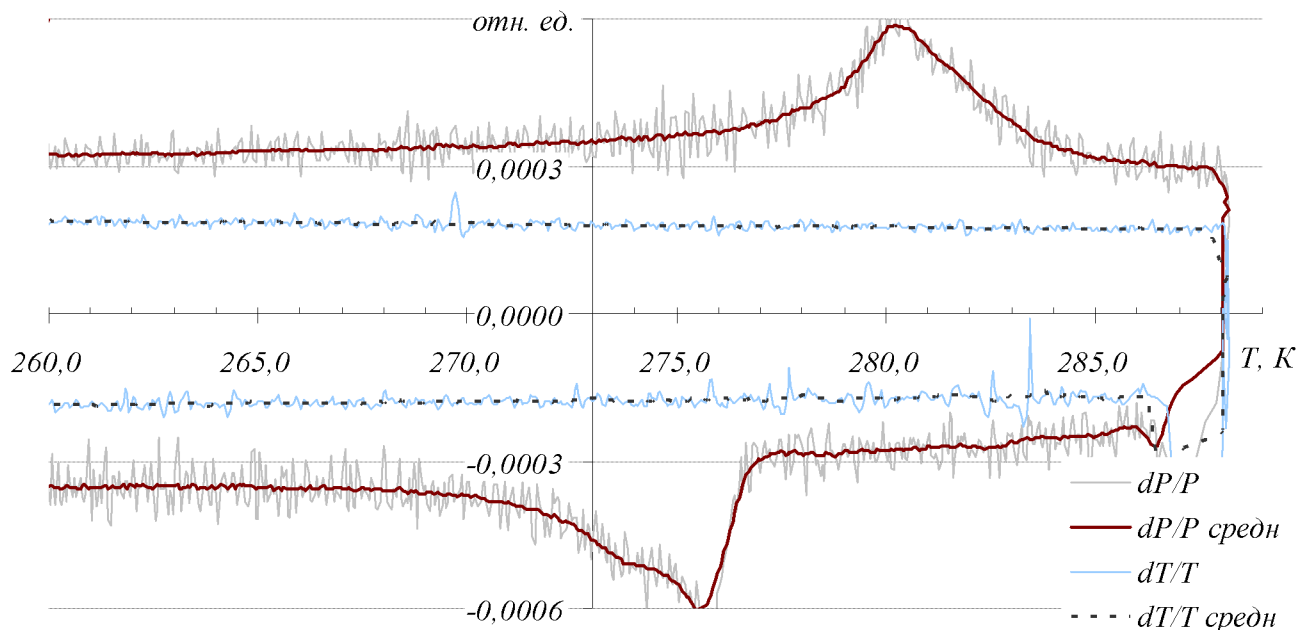


Рис.2.5. Относительное изменение давления и температуры

Другие эксперименты, проведенные нами, давали похожие пиковые выходы газа от разложения газогидратов. Обозначим: $W, \%$ - влажность угля; $P, \text{МПа}$ и $T, \text{К}$ – термодинамические координаты пиков газовыделения; $G, \text{м}^3/\text{т}$ – объем при нормальных условиях вышедшего газа. Сведем результаты нескольких экспериментов в одну таблицу.

Таблица 2. 1

№	$W, \%$	$P, \text{МПа}$	$T, \text{К}$	$G, \text{м}^3/\text{т}$
1	2,67	5,10	280,6	2,1
2	2,35	12,2	288,6	0,9
3	1,55	4,76	279,6	2,8

Стоит отметить, что в условиях нашего эксперимента уголь находился в виде частичек размером 1-2мм, пространство между которыми было заполнено метаном. Объем угольного вещества был порядка 30 мл, т.е. в полтора раза меньше объема газовой фазы. В природных угольных пластах удельный объем пор, доступный для газовой фазы, в 20-30 раз меньше, поэтому, при том же количестве выделяющегося метана рост давления будет гораздо более значителен.

Оценим, насколько пиковый выход метана может быть существенен с точки зрения формирования выбросоопасных ситуаций. Реальная природная пористость угля выбросоопасных пластов составляет 4-6%, пусть одна тонна угля занимает 0.6 м^3 , в ней общий объем пор равен 36л. Температура и давление до разложения газогидратов были 278К и 4.95МПа. Молярный объем газовой фазы, рассчитанный для этих значений давления и температуры, составляет $v = 0.41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$. После разложения газогидратов, в газовую фазу порового пространства дополнительно выделилось 94 моль метана, следовательно, молярный объем стал $v = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$, предположив, что температура изменилась незначительно, из уравнения Ван-дер-Ваальса получим, что после диссоциации газогидратов давление в порах угля станет около 9МПа.

Столь значительный рост давления (от 5МПа до 9МПа) газа в порах угольного вещества при мгновенной диссоциации газогидратов может быть отправной точкой развития внезапного выброса. Механизм развития внезапного выброса вследствие разрыва пор давлением газа описал академик Христианович [49]. Общее газовыделение при внезапном выбросе складывается из метана, выделяющегося при механическом истирании продуктов выброса с образованием бешеной муки, метана выделяющегося из закрытых пор, метана образующегося при разложении других компонент ТУГР.

В представленных экспериментах переход через точку стабильности газовых гидратов достигался медленным повышением температуры. При разложении газогидратов потребляется теплота и увеличивается давление газа, немного увеличивается равновесная температура. Соответственно, скорость

разложения газогидратов в наших экспериментах определялась скоростью подвода тепла, в конечном счете, зависящей от темпов изменения температуры автоклава. В природных условиях, при попадании угольного массива в зону влияния очистных работ или краевых частей массива, теплота выделяется при перераспределении напряжений и совершении работы по образованию трещин, происходит теплообмен с подогретым шахтным воздухом. Все это может быть причиной образования газогидратов.

Другой механизм перехода через термодинамическую кривую фазового равновесия может описываться падением давления, возникающим в связи с раскрытием пор фильтрацией газа в призабойное пространство. После начала разложения газогидратов, если объем газовой фазы мал, потребляемая теплота фазового перехода вызывает понижение температуры, а значит и давления газовой фазы. Количественные оценки показывают, что с началом диссоциации давление падает, система еще сильнее отклоняется от точки фазового равновесия, т.е. начинается самоускоряющаяся реакция диссоциации.

2.2 Исследование распределения газогидратных частиц по размерам пор угольной матрицы

Для получения распределения газогидратных частиц по порам разного диаметра воспользуемся изотермой адсорбции-десорбции, полученной экспериментально для данных проб угляна базе Института катализа им. Г. К. Борескова рис.2.6.

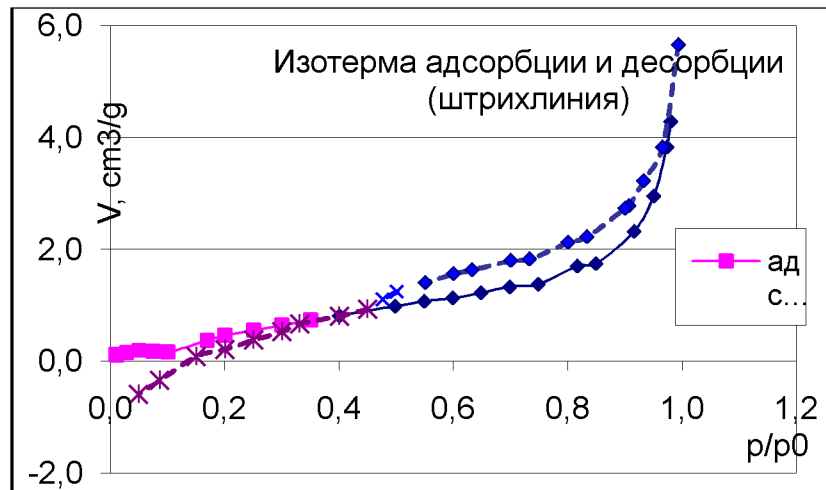


Рис.2.6. Изотерма адсорбции-десорбции

Во всех случаях анализа распределения пор по размерам используют азот в качестве адсорбата. Рассчитаем с помощью уравнения Кельвина размеры пор:

$$r_m = \frac{-2\gamma \cdot V_L}{R \cdot T \cdot \ln(p/p_0)}$$

Численные значения параметров в уравнении: γ - поверхностное натяжение азота в точке кипения ($8.85 \cdot 10^7$ Дж/см³ при 77K), V_L - молярный объем жидкого азота (34.7 см³/моль), T - температура кипения азота (77K), p/p_0 - относительное давление азота, r_m - радиус пор по Кельвину.

Радиус пор по Кельвину r_m - это радиус при котором в порах происходит конденсация при относительном давлении p/p_0 . Поскольку перед началом конденсации имеет место некоторая адсорбция на стенках пор, r_m не является истинным радиусом пор, тем более, что при десорбции адсорбированный слой остается на стенках при испарении.

Истинный радиус пор вычисляется по уравнению: $r_p = r_m + t$, где t - толщина адсорбированного слоя. С учетом уравнения Кельвина, получаем распределение пор по площади поверхности рис.2.7.

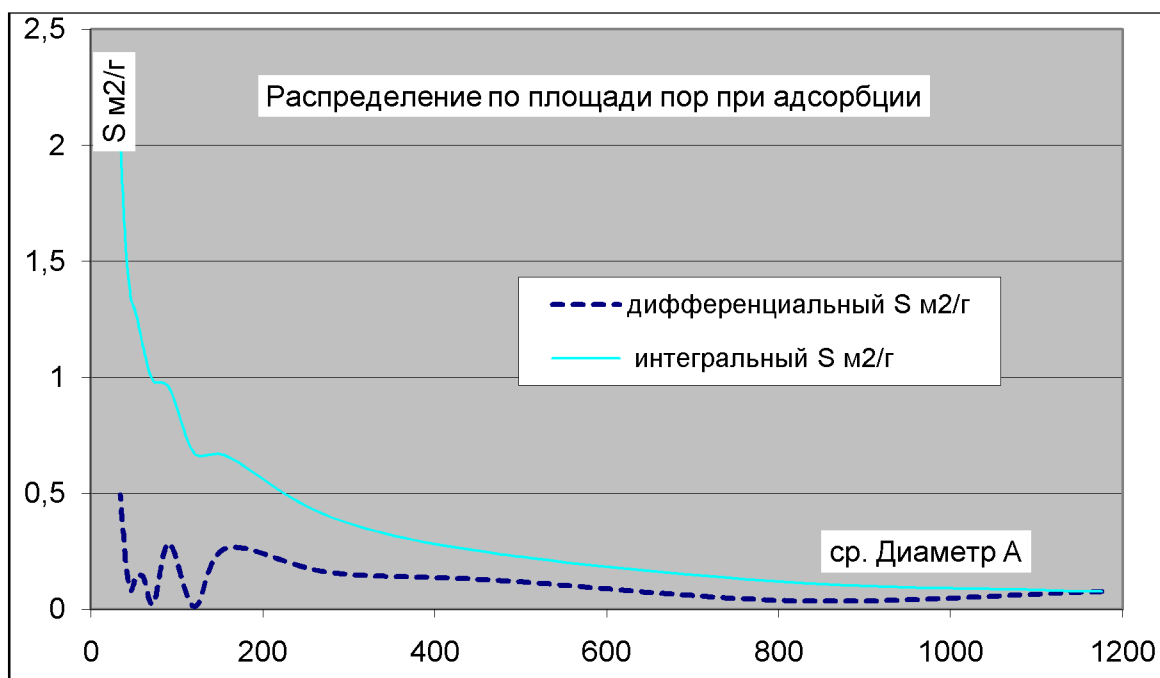


Рис.2.7. Распределение по суммарной площади пор по размерам при адсорбции

Теперь определим, в каких порах образование кристаллогидрата метана возможно. Рассмотрим модель капиллярной конденсации, в которой подразумевается, что в начальный момент адсорбция ограничена образованием тонкого слоя на стенках пор. По мере возрастания давления заполняются всё более широкие поры, пока, наконец, при давлении насыщенного пара вся система не окажется заполненной конденсатом.

Как правило, считается, что поры имеют цилиндрическую форму и что краевой угол смачивания равен нулю, так что мениск является полусферическим. В этом случае средний радиус кривизны r_m равен радиусу поры за вычетом толщины адсорбционной пленки на ее стенках.

Общий объем воды во всех порах нашего образца:

$$V_{\text{общ}} = \frac{W}{\rho_{\text{ж}}} m_{\text{угля}}, \quad (2.3)$$

W -влажность, $\rho_{\text{ж}}$ -плотность воды.

Теперь, рассмотрим несколько интервалов на кривой рис.2.7, мы не знаем, какие из имеющихся пор заполнены водой полностью, а какие частично, примем, что толщина адсорбционного слоя воды в поре равна t , тогда:

$$V_1 = h \cdot \pi(r^2 - (r - t)^2), \text{ при } t < r,$$

где V_1 - объем жидкости в поре, h - длина поры цилиндрического вида;

$V_2 = h \cdot \pi \cdot r^2$, при $t = r$, соответственно общий объем пор заполненный водой для всех участков нашей экспериментальной кривой:

$$V_{\text{общ}}^1 = \sum V_{1i} + \sum V_{2i} = \sum h_i \cdot \pi(r_i^2 - (r_i - t)^2) + \sum h_i \cdot \pi \cdot r_i^2 \quad (2.4)$$

Построим суммарный график зависимости всего объема пор, заполненных жидкостью в зависимости от толщины водной пленки рис.2.8. Данные по средним значениям интервалов площади, высоты и диаметра пор приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

*Экспериментальные значения распределения пор по размерам данного образца
угля*

s, м2/г	v, *10 ⁻⁶	d, А
0,396	0,00561	280,7
0,66	0,00666	158,9
0,672	0,00669	120,8
0,958	0,00735	91,2
0,984	0,00739	73
1,12	0,0076	61,7
1,267	0,0078	53,3
1,349	0,00789	46,6
1,539	0,00809	41,2
2,034	0,00852	34,4

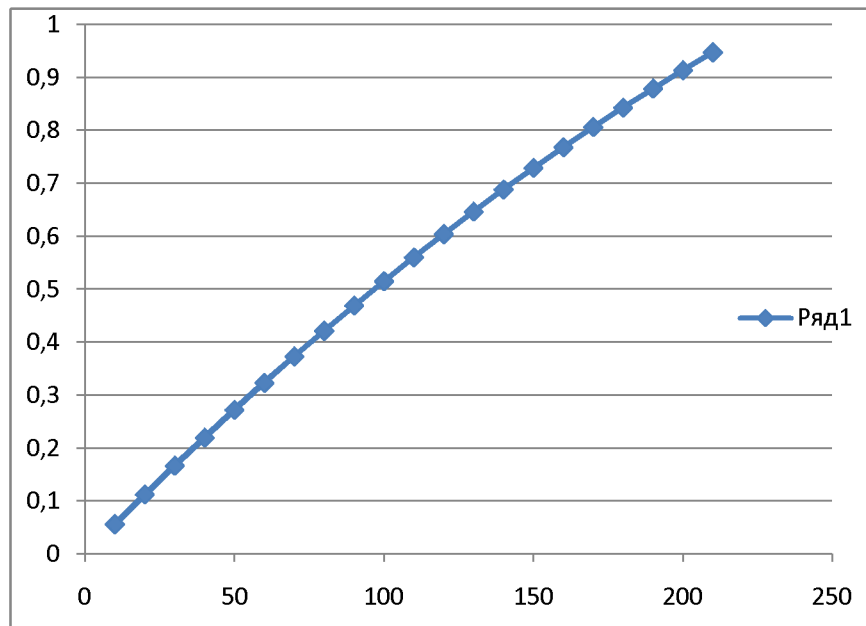


Рис.2.8. График зависимости общего объема пор заполненных жидкостью на всех изучаемых экспериментальных интервалах от толщины адсорбционной пленки

Соответственно, зная характеристики данного образца угля, его влажность, объем и т.д., можно определять, какой процент свободных пор занят жидкостью в зависимости от толщины, образуемой пленки воды:

$$V_{\text{общ}} = \frac{W}{\rho_{\text{ж}}} \cdot m_{\text{угля}} = \frac{0.0253}{1000} \cdot 55,13 \cdot 10^{-3} = 1,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$
, таким образом, при минимальной толщине адсорбционного слоя $t = 80 \text{ \AA}$ (что и соответствует среднему минимальному размеру, толщины воды, необходимого для образования газогидратов), около 35% воды, содержащейся в угольных порах может участвовать в гидратообразовании, что и подтверждает ранее проведенный эксперимент в лаборатории клатратных соединений.

Экспериментально установлена возможность образования ТУГР в порах угольной матрицы, при достижении равновесных значений термодинамических параметров и материнской влажности, характерной угольным пластам.

Таким образом, необходимо исследовать роль диссоциации твердых углегазовых растворов по типу газовых гидратов на формирование ГДЯ в краевой зоне угольных пластов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, при исследовании процессов образования твердых углегазовых растворов природного газа по типу газогидратов, было установлено:

- возможность существования ТУГР по типу газогидратов в угольной матрице, а именно в угольных порах и трещинах, размером более $40\text{\AA}$ и минимальной влажности (1,5 – 1,7)%, диссоциация которых может влиять на газодинамическую активность при определенном сочетании термодинамических условий в призабойной зоне угольного пласта;
- разработана установка по исследованию кинетики образования и диссоциации газогидратов в угольной матрице, и определено, что объем газовой фазы примерно в 20 раз меньше объема угля, соответственно влияние диссоциации газогидратов на давление в угольных порах может быть значительным;
- значительное увеличение роста давления (от 5МПа до 9МПа) газа в порах угольного вещества при мгновенной диссоциации газогидратов может быть отправной точкой развития внезапного выброса.
- Установлено, что в процессе гидратообразования в угольной матрице поучаствовало около 37% всей содержащейся воды.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В УГОЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

3.1. Математическое моделирование скорости диссоциации ТУГР по типу газогидратов в зависимости от их размеров в угольной матрице

С увеличением глубины ведения горных работ растет газоносность угольных пластов, поэтому возрастает опасность проявления различных газодинамических явлений при подземной разработке месторождений. Параметры краевой зоны, распределение и величина напряжений в ее пределах, их изменение во времени и пространстве определяют многие геомеханические и газодинамические процессы, происходящие при сочетании определенных условий. До сих пор неясна роль газовых гидратов природного газа в формировании выбросоопасных ситуаций.

Существуют различные теории механизмов возникновения внезапных выбросов угля и газа и других газодинамических явлений (ГДЯ). Одной из основных является теория акад. С.А. Христиановича. По его мнению, образование трещин определяется резким возрастанием напряжений на участке угольного пласта, а их рост происходит в плоскости, перпендикулярной наименьшему сжатию. Процесс послойного отрыва угля в результате действия волны дробления распространяется вглубь пласта, где при определенных значениях давления и температуры может находиться ТУГР по типу газогидратов. Диссоциация ТУГР по типу газогидратов может влиять на формирование выбросоопасной ситуации или приводить к загазированию выработок, как было доказано выше, если скорость их диссоциации не меньше, чем скорость перемещения волны дробления [49].

В данной главе рассматривается задача определения скорости диссоциации газогидратов в угольной матрице в зависимости от размеров частиц, сопоставимых с размерами пор в структуре угольного пласта. Будем полагать, что под действием технологических или горно-геологических факторов (механических напряжений и газового давления) в системе угольный пласт-влага-газ-газогидрат давление в системе может уменьшиться до значения, меньшего равновесного для определенной температуры. Вследствие этого начнется процесс диссоциации ТУГР по типу газогидратов. При образовании газогидратов выделяется «скрытая» теплота, величина которой составляет порядка 533 кДж/моль [8]. Процесс диссоциации ТУГР по типу газогидратов, происходящий в угольном пласте, можно считать адиабатным. Теплота, необходимая для разложения газогидратов, будет поступать за счет уменьшения энергии Гельмгольца, т.е. за счет уменьшения свободной части внутренней энергии системы. В результате температура участка пласта, содержащего газогидраты, будет уменьшаться. Определим скорость диссоциации, т.е. определим, как быстро разлагается на газ и воду газогидратная частица, размер которой соответствует размерам пор в структуре каменного угля. Пусть T – текущая температура угольного вещества; $T_0 = 278$ К – температура, при которой происходит разложение газогидрата; r_2 – радиус газогидратной частицы.

Из уравнения Фурье следует, что тепловой поток, направленный из угольного пласта к газогидратной частице, равен:

$$dQ_1 = \chi \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot 4\pi r^2 dt, \quad (3.1)$$

где χ – удельная теплопроводность угля.

Теплота, необходимая для диссоциации газогидрата, равна:

$$dQ_2 = \lambda \cdot dm, \quad (3.2)$$

где $\lambda = 533 \cdot 10^3$ Дж/кг – удельная теплота разложения газогидрата, $dm = 4\rho\pi r_2^2 dr_2$ – масса разлагающегося газогидрата; $\rho_1 = 840$ кг/м³ – плотность газогидрата метана.

Приравняв (3.1) и (3.2), получим, что

$$\frac{dr_2}{dt} = \frac{\chi}{\lambda \rho_1} \cdot \frac{r_1^2}{r_2^2} \frac{\partial T}{\partial r_1}, \quad (3.3)$$

где $\frac{dr_2}{dt} = v$ – скорость разложения газогидратной частицы в угольной матрице.

Рассчитаем скорость диссоциации газогидрата, используя уравнение теплопроводности для случая сферической системы координат, т. к. частицы газогидрата в угольной матрице имеют структуру КС-1, близкую к сферической, при этом будем считать, что тепловой поток не зависит от φ . Изменение температуры в окружающем частицу угле описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{\chi}{r_1^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r_1} (r_1^2 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r_1}), \quad (3.4)$$

где c – удельная теплоемкость каменного угля; r_1 – текущий радиус; ρ – плотность угля.

Для выбранной модели зададим следующие начальные и граничные условия: температура угольной матрицы в начальный момент времени равна, $T(r_1, 0) = T_1$, (3.5) и температура газогидратной частицы к началу разложения также равна T_1 , т. е. $T(r_2, 0) \big|_{r_2=r_1} = T_1$.

Для решения поставленной задачи применим метод конечных разностей (МКР), то есть вместо производных в дифференциальном уравнении теплопроводности будем использовать их конечноразностные аппроксимации. Аппроксимируя частные производные уравнения (3.4), с учетом граничных и начальных условий, конечными разностями, получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры как локальной характеристики и подставляем это распределение в уравнение (3.3) [50, 51, 52].

Определим температурное поле в угольном веществе через 5, 10, 30 и 60 секунд.

Применим МКР на основе неявной четырехточечной схемы. Введем равномерную пространственную сетку:

$$r_i = (i-1)h, \quad i = 1, \dots, N;$$

$$r_1 = R_0, \dots, r_N = r_2$$

$$h = \frac{r_2 - r_1}{N - 1};$$

Также вводим временную сетку:

$$t_n = n \cdot \tau, \quad n = 0, 1, \dots, M; \quad \tau > 0,$$

$$t_0 = 0, \dots, t_M = t_{\text{конечное}};$$

Заменим дифференциальные операторы в уравнение (3.4) их конечно разностными аналогами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau},$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{h^2} \left[r_{i+\frac{1}{2}}^2 \cdot T_{i+1}^{n+1} - (r_{i-\frac{1}{2}}^2 + r_{i+\frac{1}{2}}^2) \cdot T_i^{n+1} + r_{i-\frac{1}{2}}^2 \cdot T_{i-1}^{n+1} \right],$$

$$\text{где } r_{i-\frac{1}{2}} = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}, \quad r_{i+\frac{1}{2}} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}.$$

Таким образом, в результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \frac{\lambda}{r_i^2} \cdot \frac{1}{h^2} \left[r_{i+\frac{1}{2}}^2 \cdot T_{i+1}^{n+1} - (r_{i-\frac{1}{2}}^2 + r_{i+\frac{1}{2}}^2) \cdot T_i^{n+1} + r_{i-\frac{1}{2}}^2 \cdot T_{i-1}^{n+1} \right]$$

$i = 2, \dots, N - 1, \quad n = 0, 1, \dots, M$, которую приведем к общему виду:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad \text{где } A_i = \frac{\lambda}{h^2} \cdot \frac{r_{i+1/2}}{r_i},$$

$$B_i = \frac{\lambda}{h^2} \cdot \frac{r_{i-1/2} + r_{i+1/2}}{r_i} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}, \quad C_i = \frac{\lambda}{h^2} \cdot \frac{r_{i-1/2}}{r_i}, \quad F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} \cdot T_i^n.$$

Предположим, что существуют такие наборы чисел как α_i и β_i , где $i = 1, \dots, N - 1$

, при которых $T_i^{n+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_i$, воспользуемся левым граничным условием

для определения начальных прогоночных коэффициентов α_1 и β_1 из соотношения

$T_1 = \alpha_1 \cdot T_2 + \beta_1$. На левой границе стоит условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0, \frac{T_2 - T_1}{h} = 0, T_1 = T_2, \begin{cases} \alpha_1 = 1 \\ \beta_1 = 0. \end{cases}$$

А на правой границе температура: $T|_{r=R_1} = T_h$.

В результате численного моделирования получили зависимость скорости диссоциации газогидратных частиц от их размеров (рис.3.1) с учетом характеристик газогидрата метана каменного угля и $\chi = 0,38$ Вт/(м·К) – удельная теплопроводность угля, $\rho = 1200$ кг/м³ – плотность угля, $c = 2880$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость угля [54,68].

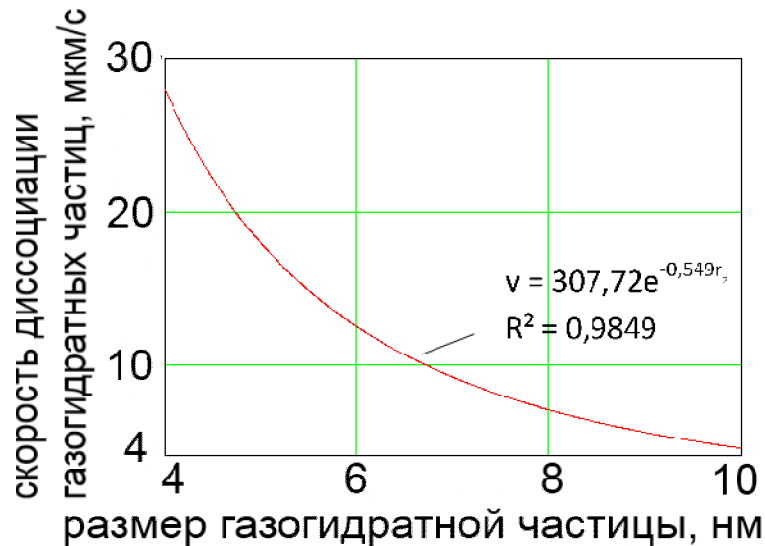


Рис. 3.1. Зависимость скорости диссоциации ТУГР по типу газогидратов от их размеров

Следовательно, скорость диссоциации ТУГР по типу газогидратов нелинейно зависит от размеров диссоциирующих частиц и при 4 нм равна 28 нм/мс, с увеличением размера частиц газогидратных молекул скорость диссоциации уменьшается. Модуль скорости диссоциации частиц газогидрата в поровом пространстве угля значительно превосходит скорость волны дробления. А поскольку природная влажность угольных пластов, опасных и угрожаемых по газодинамическим явлениям не превышает 3,5 %, поэтому концентрация газогидрата в пористой структуре невысока, т.е. частицы находятся на

определенном расстоянии друг от друга, а скорость их диссоциации зависит только от их размеров, т. е. размеров поровых каналов, где они образованы, и при падении механического давления в системе, диссоциируют и способствуют повышению газового давления и формированию различных ГДЯ.

3.2. Влияние размеров ТУГР по типу газогидратов и газового давления на скорость подвигания границы их диссоциации

В угольной матрице природный газ может существовать при определенных термодинамических условиях в виде твёрдого раствора.

При этом параллельно идут два процесса: десорбция газа с поверхности макропор и трещин, а также диссоциация газовых гидратов, как уже было доказано в предыдущей главе. Диссоциация твердого раствора природного газа происходит при падении газового давления до значений ниже давления равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – гидраты природного газа». В области, где гидрат еще не разложен, газ будет находиться в твердом состоянии. Таким образом, можно выделить в пласте две области 1 и 2 с разными коллекторскими свойствами[53].

Высокое давление в непосредственной близости от забоя создается вследствие выделения большого количества свободного газа. В призабойной части массива постоянно происходит фильтрация свободного газа в выработку. Определение скорости подвигания границы диссоциации кристаллогидратов позволит сопоставить ее со скоростью распространения волны дробления вглубь массива и тем самым оценить роль диссоциации кристаллов природного газа в развязывании и поддержании внезапного выброса угля и газа. Скорость волны дробления по А.С. Христиановичу рассчитывается по формуле [49]:

$$g = \sqrt{\frac{\kappa+1}{2\kappa}} \cdot a_* \cdot \frac{\left(1 + \frac{m}{1-m}\right) \sqrt{\frac{P_0}{P_*} + \frac{\kappa-1}{\kappa+1}}}{\sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_z} + \frac{m}{1-m}} \sqrt{\frac{m}{1-m} + \frac{b_1}{1 - \frac{P_0}{P_*}}}}, \quad (3.5)$$

где g - скорость волны дробления, м/с; a_* - скорость звука в газе, м/с; κ - показатель адиабаты газа; m - коэффициент пористости; ρ_y - плотность угля, кг/м³; ρ_z - плотность газа, кг/м³; b_1 - величина, определяющая количество десорбированного газа; P_0 - давление на свободной поверхности угля, атм; P_* - начальное давление газа в пласте, атм. Затем, с учетом размеров полости выброса, рассчитывалось время выброса и объем газа, выделяющегося при диссоциации за время выброса.

Таблица 3. 1

Скорость волны «дробления» по модели А. С. Христиановича для условий пласта Владимирский, ш. «Северная» при диссоциации ТУГР по типу газогидратов

№	W, % влажность	β , % гидратона- сыщенность	v , число молей	Δp , МПа добавочное давление газа вследствие диссоциации газогидратов	g , м/с скорость волны дробления
1	1,5	1,9	51,47	2,25	5,57
2	2,0	2,6	68,63	2,97	8,49
3	3,0	3,9	102,94	4,39	12,53
4	4,0	5,2	137,26	5,77	14,50

В нефтяных скважинах твердые растворы природного газа по типу газогидратов находятся в виде пробок льда. В угольных пластах вследствие низкой влажности газогидраты представлены в виде россыпи крупинок. Будем считать в первом приближении, что эти крупинки шарообразной формы, таким образом, если диаметр шарообразной крупинки кристаллогидрата будет порядка сантиметра и более, то скорость подвигания границы диссоциации

кристаллогидрата будет очень низкая и наоборот. В угольных выбросоопасных пластах размеры крупинок кристаллогидрата очень малы, в этой связи мы хотим найти зависимость скорости подвигания границы диссоциации твердых растворов природного газа от площади поверхности крупинки.

Рассмотрим условия перемещения скорости границы разложения гидрата в пласте [54, 55, 56]:

$$k_1 \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} \Big|_{x=\zeta} - k_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} \Big|_{x=\zeta} = \frac{W \cdot \mu \cdot p_0}{p_p} \cdot \frac{d\zeta}{dt},$$

где W - содержание газа в гидратном состоянии в единице объема пористой среды; P_p - давление разложения гидрата; k_1, k_2 - коэффициенты проницаемости в области 1 и 2; p_1, p_2 - текущие давления; p_0 - атмосферное давление; μ - динамическая вязкость газа; ζ - координата границы разложения гидрата.

$W = n(x) = n_0(1 - e^{-bx}) \cdot V_0^1$, где $n(x)$ - функция количества частиц от расстояния, V_0^1 - объем одной частицы кристаллогидрата, $n_0 \cdot V_0^1 = n_0 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$, зная, что площадь поверхности $S_{нов} = 4\pi r^2$, отсюда находим $r = \sqrt{\frac{S_{нов}}{4\pi}}$, следовательно, W найдем как: $W = \frac{n_0 S}{3V} \sqrt{\frac{S}{4\pi}} (1 - e^{-bx})$, где $n_0 = \frac{N}{V}$ - концентрация.

Известно[57], что давление в залежи изменяется по закону: $\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu} \cdot \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}$,

Рассмотрим две области впереди забоя выработки: область 1 - зона ламинарной фильтрации, область 2 - где находятся существенный объемы свободного газа.

Для областей 1 и 2 законы изменения давления запишутся как:

$$p_1 = \sqrt{p_G^2 + \frac{p_p^2 - p_G^2}{\zeta}} x, \quad (3.6) \quad \text{и} \quad p_2 = \sqrt{p_k^2 - \frac{p_k^2 - p_p^2}{\text{erf}(\frac{\zeta}{2\sqrt{at}})} \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{at}}}}, \quad (3.7)$$

где p_k - начальное давление в пласте, автомодельное решение в пакете Mathcad приведено в работе[52].

Для расчета скорости продифференцируем выражения (3.6) и (3.7) и подставим в выражение (3.8):

$$v_{\zeta} = \frac{(k_1 \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} \Big|_{x=\zeta} - k_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} \Big|_{x=\zeta}) p_p}{\mu p_0 \frac{n_0 S}{3V} \sqrt{\frac{S}{4\pi} (1 - e^{-bx})}} , \quad (3.8)$$

Соответственно скорость подвигания границы диссоциации можно определить как:

$$v_{\zeta} = \frac{[k_1 \cdot (p_1^2 - p_2^2) - k \cdot (p_k^2 - p_1^2)]}{2 \cdot x \cdot m_1 \cdot p_0 \cdot n_0 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{s}{4\pi} \cdot \frac{(1 - e^{-k \cdot x})}{3 \cdot v_0}}} \quad (3.9)$$

Формула (3.9) позволяет полностью определить скорость подвигания границы диссоциации твердых растворов природного газа в угольной матрице в зависимости от площади поверхности крупинок.

Расчет скорости подвигания границы разложения твердых растворов произведем при следующих значениях рис.4.5: $T=271\text{K}$; $P_p = 6 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P_r = 4.5 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P_k = 9 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $k_1 = 0,1 \text{ Дарси}$; $k_2 = 0,01 \text{ Дарси}$; $P_0 = 10^5 \text{ Па}$; $m = 0,10$; $a = \frac{k \cdot p_0}{m \cdot \mu_{\Gamma}}$; $\mu_{\Gamma} = 0,01 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $k = 0,1$; $v = 0.05 \text{ м}^3$; $x = 2,5 \text{ м}$; $n_0 = 10^{23}$.

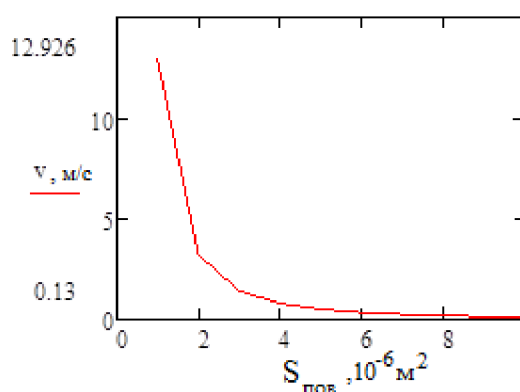


Рис.3.2. Скорость подвигания границы диссоциации твердых растворов в зависимости от площади поверхности крупинок

С увеличением площади поверхности крупинок газогидратных молекул, скорость подвигания границы диссоциации твердых растворов по типу газогидратов уменьшается.

Теперь найдем зависимость скорости подвигания границы диссоциации газогидратов от давления разложения для пласта «Владимировский» ш. «Северная» при заданных термодинамических условиях: $T=269\text{K}$; $P_p = 7,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P_r = 4,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $P_k = 9,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $k_1 = 0,1 \text{ Дарси}$; $k_2 = 0,001 \text{ Дарси}$; $P_0 = 10^5 \text{ Па}$; $m = 0,13$; $a = \frac{k \cdot p_0}{m \cdot \mu_r}$; $\mu_r = 0,01 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $k = 0,1$; $n_0 = 10^{23}$.

Искомая зависимость представлена в виде (рис. 3.3).



Рис.3.3. Скорость подвигания границы диссоциации ТУГР при различных давлениях разложения

Скорость подвигания границы диссоциации кристаллогидратов позволила сопоставить ее со скоростью распространения волны дробления рассчитанной по работам академика А.С. Христиановича вглубь массива табл. 3.1., и говорит об участии ТУГР по типу газогидратов в формировании ГДЯ.

Таким образом, можно оценить роль диссоциации кристаллов природного газа в развязывании и поддержании газодинамических явлений призабойной зоны угольного пласта.

ВЫВОДЫ

- Найден экспоненциальный закон убывания скорости диссоциации газогидратных частиц с увеличением их размеров.
- Установлена скорость подвигания границы диссоциации газогидратов, которая увеличивается с 2,6 до 14,5 м/с с ростом газового давления в диапазоне от 2 до 6 МПа, и по порядку величин соответствует скорости распространения волны дробления.
- Установлено, что концентрация газогидрата в пористой структуре невысока, т.е. частицы находятся на определенном расстоянии друг от друга, а скорость их диссоциации зависит только от их размеров, т. е. размеров поровых каналов.
- Формы и размеры ТУГР по типу газогидратов влияют на скорость подвигания границы их диссоциации: чем больше площадь поверхности крупинок кристаллогидрата, тем меньше скорость подвигания границы диссоциации твердых растворов.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ДИССОЦИИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

4.1 Оценка влияния диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов на газодинамические процессы в краевой зоне угольных пластов

Впереди забоя подготовительных выработок, проводимым по угольным пластам, склонным или опасным по внезапным выбросам угля и газа, коэффициент концентрации напряжений в зоне опорного давления, как следует из экспериментальных результатов, не достигает значений, превышающих 1 [58, 59].

Это объясняется принципиально другим характером нагружения краевой части по

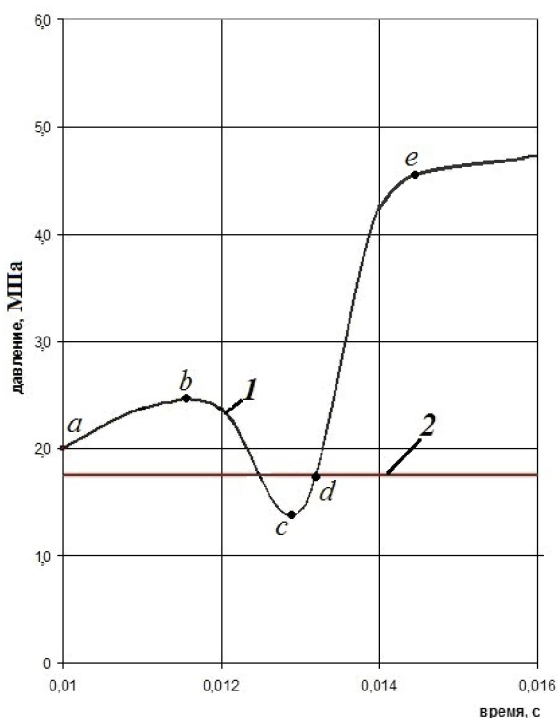


Рис. 4.1. Изменение давления со временем при исходной влажности угольного пласта 1 – 2%; 2 – давление равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – газовые гидраты»

сравнению с очистной выработкой, где коэффициент концентрации напряжений в статике в точке максимума опорного давления может составлять 1,2 – 1,6 и выше. А при динамических обрушениях его величина много больше 1 [60]. Вместе с тем в ряде случаев подготовительная выработка может попадать в зону повышенного горного давления (ЗПГД). Коэффициент концентрации напряжений в локальных точках также может быть много больше 1. Это может быть также связано с

влиянием взрывных работ или под влиянием опорного давления соседних выемочных участков.

В угольных пластах в

зависимости от термодинамических условий природный газ может находиться в различных состояниях: свободном, сорбированном и твердом по типу газовых гидратов. Твердые растворы могут существовать при определенных температурах и давлениях. Фазовый переход газа из твердой фазы в свободную возможен при условии, что фазовые параметры больше или меньше равновесных. Пусть в начальный момент времени газовое давление в угольном пласте 2,0 МПа (например, пласт «Владимировский» ш. «Северная»).

При резком возрастании напряжений в тонком слое угля ΔX впереди забоя подготовительной выработки под действием нормальных и тангенциальных напряжений, направленных в сторону выработки, образуются трещины в плоскости, ортогональной оси выработки, то есть параллельно поверхности забоя. Согласно представлениям проф. Мурашева В.И. это возможно, когда подготовительная выработка резко внедряется из зоны крепких углей в зону нарушенных углей.

Повышенные механические напряжения сопровождаются уменьшением объема порового пространства и, как следствие, повышением газового давления (рис.4.1, участок ab). Вследствие интенсивного трещинообразования в плоскости, ортогональной оси выработки, происходит раскрытие трещин и снижение давления газа в данной зоне (рис.4.1, участок bc).

При падении газового давления до значений ниже давления равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – гидраты природного газа» начинаются два процесса: десорбция газа с поверхности макропор и трещин, а также диссоциация газовых гидратов [60]. Диссоциация газовых гидратов приводит к повышению в 2,0 – 3,0 раза давления в краевой зоне угольного пласта. Если коэффициент выбросоопасности положительный, то в сторону угольного массива начнет распространяться волна дробления, которую можно рассчитать по модели акад. С. А. Христиановича [49]. Значение скорости волны дробления для выбранных условий может составить 10,34 м/с. Волна за время выброса пройдет расстояние вглубь массива 5,17 м. За это время может выделиться 5,7 м³ газа с

каждых 0,1 м. Таким образом, за время протекания внезапного выброса может выделиться 294,49 м³ газа.

Если выбросоопасная ситуация не сформировалась, то начнется интенсивная фильтрация газа в сторону забоя выработки и ее дальнейшее загазирование.

При исследовании фильтрации газа основное значение имеет тот факт, что сжимаемость газа обычно на несколько порядков превышает сжимаемость пористой среды. С учетом этого запишем уравнение неразрывности:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{u} = 0, \quad (4.1)$$

где m – коэффициент пористости среды, ρ – плотность газа, $\vec{u}$ – скорость фильтрации газа.

В первом приближении будем считать, что фильтрация ламинарная. В этом случае скорость фильтрации газа сквозь пористую среду определяется законом Дарси:

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} P, \quad (4.2)$$

где k – проницаемость пористой среды; μ – динамическая вязкость газа.

Исключая скорость фильтрации имеем:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} = k \operatorname{div} \left(\frac{\rho}{\mu} \operatorname{grad} P \right). \quad (4.3)$$

Введем функции Л. С. Лейбензона:

$$P(p) = k \int_0^p \frac{\rho(p) dp}{\mu(p)}; \chi(p) = m \left(\frac{d\rho}{dp} \right)^{-1}. \quad (4.4)$$

Уравнение (4.3) принимает вид:

$$\frac{dP}{dt} = \chi(p) \Delta p, \text{ где } \Delta p = \nabla^2 p \quad (4.5)$$

В первом приближении газ можно считать термодинамически идеальным, а коэффициенты k и μ постоянными при движении газа к забою выработки и что плотность газа зависит только от давления (баротропное приближение), получаем замкнутую систему уравнений.

$$\mu = const; \rho = \frac{(\rho_0 P)}{P_0}. \quad (4.6)$$

При этом функции Лейбенсона примут следующий вид:

$$P(p) = \frac{k\rho_0 p^2}{2\mu p_0}, \chi = \frac{kp}{m\mu}. \quad (4.7)$$

А уравнение (4.5) преобразуется к виду и носит название уравнения Буссинеска[57]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu} \nabla^2 P^2. \quad (4.8)$$

Движение метана в пласте угля в сторону забоя, то есть для одномерного изотермического течения описывается уравнением:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu} \cdot \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}, \quad (4.9)$$

где P - давление; μ - динамическая вязкость газа.

Найдем закон изменения давления газа в области, находящейся за слоем угля ΔX , то есть ближе к зоне «нетронутного» массива, после начала процесса диссоциации. Примем следующие начальные и граничные условия:

$$P(x,0) = P_0 = P_{амм}, \text{ при } x \leq 0 - \text{начальное давление в выработке};$$

$$P_1(x,t)|_{x=\xi} = P_2(x,t)|_{x=\xi} = P_p, \text{ где } \xi - \text{граница разложения газовых гидратов в слое } \Delta X;$$

$$P_3(x,0) = P(x,t) = P_\Gamma, \text{ при } x > a, \text{ где } a - \text{протяженность зоны влияния выработки.}$$

Задача в такой постановке автомодельна, решение ее известно [61, 62, 63], а закон распределения давления запишется в виде:

$$P = \sqrt{P_\Gamma^2 + (P_p^2 - P_\Gamma^2) \frac{x}{a\sqrt{t}}}, \quad (4.10)$$

где P_Γ – постоянное газовое давление; P_p – давление разложения гидрата при пластовой температуре (рис. 4.2).

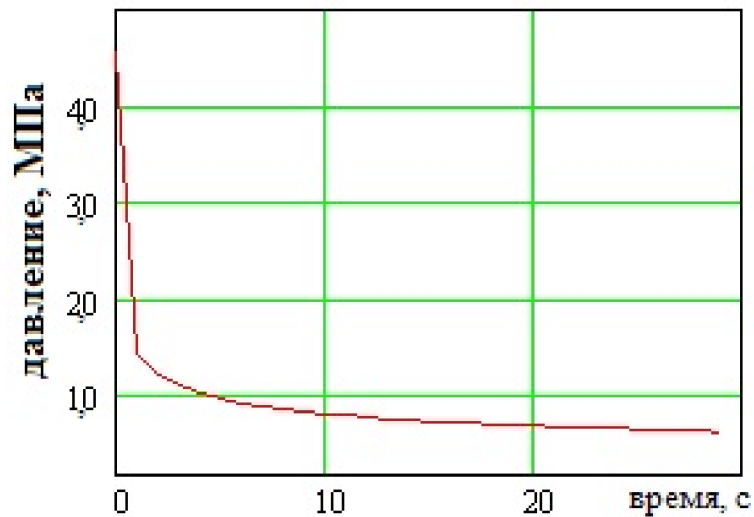


Рис.4.2. Изменение распределения давления газа в зоне, лежащей за слоем ΔX , то есть ближе к границе зоны влияния выработки, после начала диссоциации газовых гидратов

В результате расчетов при $T = 278$ К получаем распределение газового давления после начала процесса диссоциации твердых растворов природных газов по типу газовых гидратов при различных значениях коэффициента проницаемости краевой зоны угольного пласта (рис. 4.3). Расчет произведен при следующих значениях: $P_p = 1,7 \cdot 10^6$ Па; $P_r = 46 \cdot 10^6$ Па; $\kappa = 0,01$ Дарси; $P_0 = 10^6$ Па; $m = 0,10$; $\alpha = \frac{k \cdot p_0}{m \cdot \mu_r}$; $\mu_r = 0,00001$ Па·с.

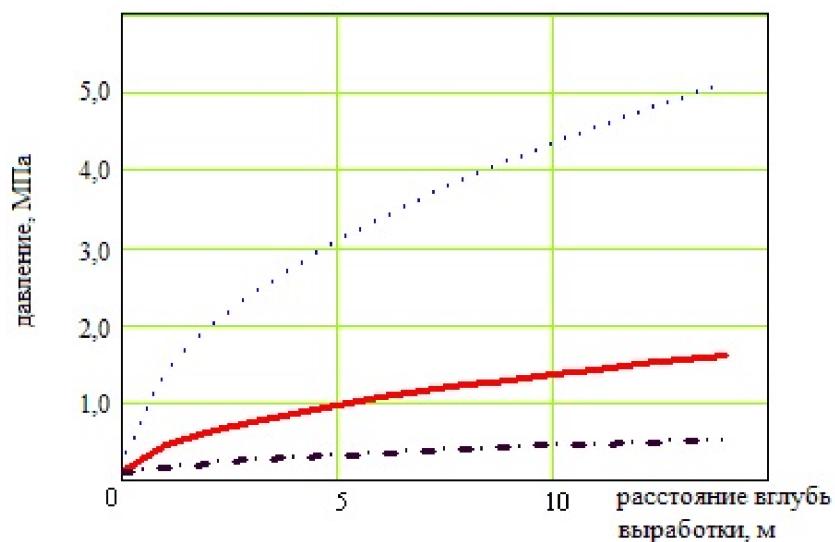


Рис.4.3. Распределение давления газа после начала диссоциации газовых

гидратов при различном коэффициенте проницаемости пористой среды (сплошная линия – $k = 0,01$ Дарси; точки – $k = 0,001$ Дарси, точки - пунктир – $k = 0,1$ Дарси)

При высоком коэффициенте проницаемости будет происходить загазирование выработки. При малой проницаемости пористой среды вблизи забоя создаются высокие газовые давления, что может повлечь за собой формирование выбросоопасной ситуации.

Для данных условий: при коэффициенте проницаемости $k > 0,1$ Дарси будет происходить загазирование выработки; при $k < 0,1$ Дарси проницаемости пористой среды вблизи забоя создаются высокие газовые давления, что может повлечь за собой формирование выбросоопасной ситуации согласно (Прил. 1). В следующем параграфе рассмотрим зависимость газового давления от гидратонасыщенности угольного пласта при различной материнской влажности угля.

Процессы диссоциации твердого углегазового раствора в природных пластах вследствие малых объемов газогидратных частиц очень сильно отличаются от процессов диссоциации гидратов в свободном пространстве и определяются размерами кристаллов газовых гидратов, площадью поверхности частиц, а так же природной влажностью и распределением пор по размерам. В этой связи может начаться один из процессов: формирование выбросоопасной ситуации или интенсивная фильтрация газа в сторону забоя выработки и ее дальнейшее загазирование.

4.2. Математическое моделирование распределения давления газа

**при диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов
в краевой зоне угольного пласта**

Рассмотрим задачу по распределению газового давления вследствие диссоциации ТУГР природного газа по типу газогидратов в зависимости от гидратонасыщенности, так как благодаря своей клатратной структуре единичный объём газового гидрата может содержать до 160—180 объёмов чистого газа. Плотность гидрата ниже плотности воды и льда (для гидрата метана около 900 кг/м³).

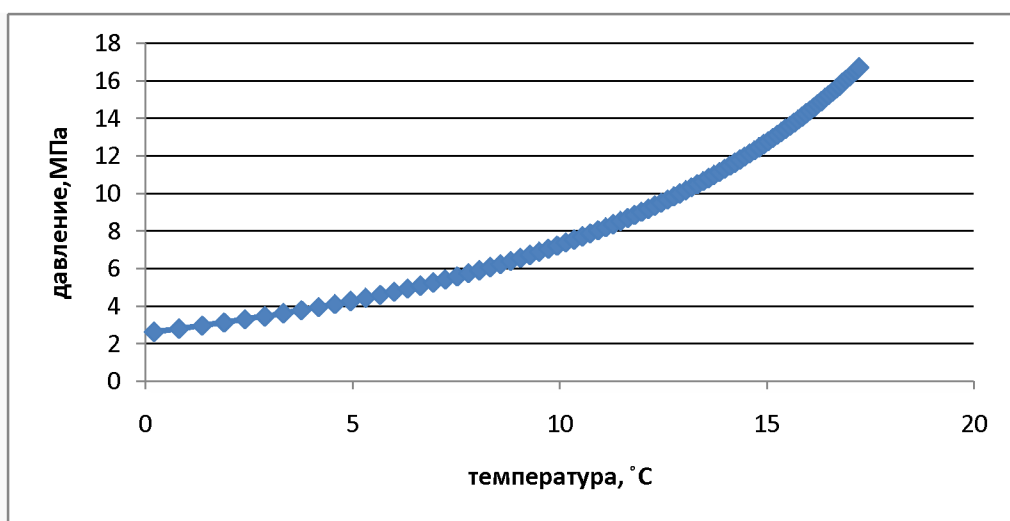


Рис.4.4. Фазовая диаграмма гидрата метана [64]

При повышении температуры и уменьшении давления гидрат разлагается на газ и воду с поглощением большого количества теплоты. Разложение гидрата в замкнутом объёме либо в пористой среде (естественные условия) приводит к повышению давления [65, 66, 67, 68, 69].

Для описания термодинамических свойств гидратов в настоящее время широко используется теория Ван-дер-Ваальса (внук) — Платтеу[44].

В структуре газогидратов молекулы воды образуют ажурный каркас (то есть решётка хозяина), в котором имеются полости. Установлено, что полости каркаса обычно являются 12- («малые» полости), 14-, 16- и 20-гранниками («большие»

полости), немного деформированными относительно идеальной формы. Эти полости могут занимать молекулы газа («молекулы—гости»). Молекулы газа связаны с каркасом воды Ван-дер-Ваальсовскими связями.

Исследование процессов образования и диссоциации газовых гидратов при разработке угольных пластов во многом связано с возможным их влиянием на формирование выбросоопасных ситуаций за счет высокого газовыделения при диссоциации. Диссоциация кристаллогидратов в угольном пласте может происходить при резком понижении давления.

Пусть впереди забоя горной выработки, проходимой по угольному пласту на некотором расстоянии от забоя находится зона, содержащая ТУГР по типу газогидратов в виде россыпи кристаллогидратов. Вследствие резкого прироста механического напряжения, обусловленного технологическими причинами или вхождением забоя подготовительной выработки в ЗПГД, происходит разрушение части пласта впереди забоя и образование трещин, ортогональных оси выработки, что приводит к диссоциации газовых гидратов. Аналогичные процессы могут наблюдаться и при внедрении забоя подготовительной выработки в зону пликативного нарушения.

Вследствие трещинообразования происходит резкое снижение механических напряжений и, соответственно, давление газа до значений ниже равновесного, соответствующего данной температуре. При этом кристаллы газогидрата начинают диссоциировать и газ переходит в свободное состояние, что существенно изменяет газодинамику призабойной зоны массива и горной выработки.

На рис. 4.5 представлено условное схематическое разделение угольного пласта впереди забоя подготовительной выработки на характерные зоны.

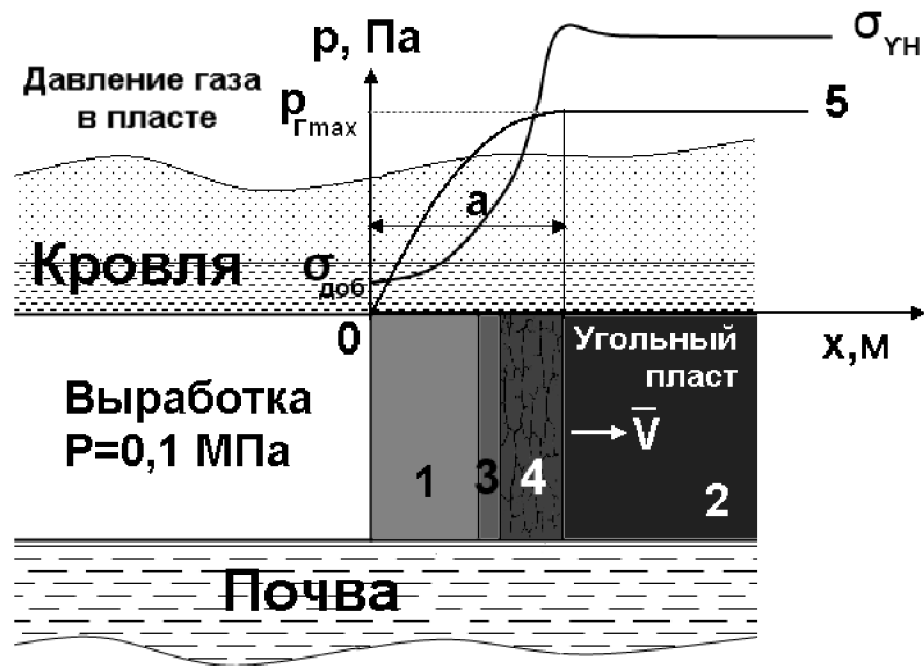


Рис.4.5. Схема к расчету распределения газового давления впереди забоя подготовительной выработки при диссоциации газогидратов

Зона 1 – зона ламинарной фильтрации; зона 2 – зона, в которой давление газа максимально и практически постоянно; 5 – исходное распределение газового давления; 3 – зона, разделяющая неупругие и упругие деформации; 4 – зона трещинообразования, которая возникла под действием скачка механических разрушений; а – протяженность зоны влияния выработки (рис. 4.5).

Вследствие опорного давления, коэффициент проницаемости массива в краевой зоне пласта изменяется. Характер изменения коэффициента проницаемости в этой связи примем следующим образом: вблизи забоя выработки проницаемость максимальная k_0 , а далее она уменьшается и достигает минимума $k_{\min}$ там, где наблюдается максимум зоны опорного давления. За зоной влияния выработки коэффициент проницаемости принимает постоянное значение k_{∞} .

Найдем распределение давления газа в зонах 1, 3, 4 (рис.4.5.) в результате диссоциации кристаллогидратов природного газа при различной гидратонасыщенности выбросоопасных угольных пластов, зная, что $k(x)$ - является функцией расстояния до забоя выработки (рис.4.6) с учетом поставленных выше

начальных и граничных условия для коэффициента проницаемости и давления газа.

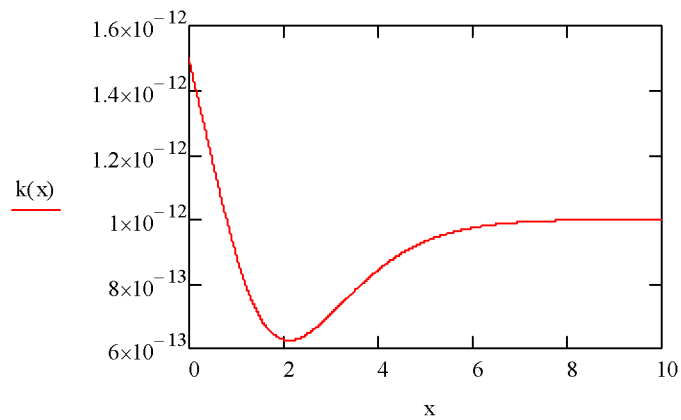


Рис.4.6. Зависимость коэффициента проницаемости в краевой зоне угольного пласта от расстояния до забоя выработки

Также предварительно определим число молей газа, содержащегося в гидратном состоянии в угольном пласте.

В качестве примера рассчитаем распределение давления газа после начала процесса диссоциации для пласта Владимирский, шахта «Северная» при условиях: $T=288$ К; глубина разработки $H = 370$ м; $P_r = 4.6 \cdot 10^6$ Па; $P_0 = 10^5$ Па; $m = 0,05$; $a = \frac{k \cdot p_0}{m \cdot \mu_\Gamma}$; $\mu_\Gamma = 0,01$ Па·с; $h=3$ м- высота выработки; $l=5$ м – ширина выработки; $x_l = 0,07$ м протяженность зоны угля, содержащего газогидраты; $V_{\text{угля}} = 1,05$ м³. Результаты расчета приведены на рис.4.7. для условий, взятых из табл. 4.1.

Таблица 4.1

Приращения давления газа для условий пласта Владимирский, ш.
«Северная» при диссоциации ТУГР по типу газогидратов

№	W, % влажность	β , % гидратона- сыщенность	v , число молей	Δp , МПа добавочное давление газа вследствие диссоциации газогидратов
1	1,5	1,9	51,47	2,25
2	2,0	2,6	68,63	2,97
3	3,0	3,9	102,94	4,39
4	4,0	5,2	137,26	5,77

В такой постановке данная задача является автомодельной, и для ее решения используем явные разностные схемы и математический пакет Maple14. Основная идея численных методов решения дифференциальных уравнений заключается в замене частных производных функции F какими-либо более простыми выражениями. В частности, одним из подобных численных методов является метод конечных разностей или метод сеток. Общий принцип этого метода состоит в том, что расчётная область покрывается регулярной сеткой, а дифференциальное уравнение для какой-либо точки заменяется некоторым уравнением в конечных разностях. Это уравнение получают путем замены в дифференциальном уравнении производных и других дифференциальных операций их приближенными выражениями через разностные отношения или значения функций в узлах сетки, окружающих расчётную точку.

Первоначально строим прямоугольную сетку методом конечных разностей, где по оси x будем откладывать значения давлений в зависимости от координаты точки, а по оси y – значения давления в зависимости от времени.

$$x_j = jh, j = 0, 1, 2, \dots, n;$$

$$t_i = ik, i = 0, 1, 2, \dots, m;$$

Заменим частную производную по времени в уравнении (4.9) конечно-разностной аппроксимацией:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{k} [p(x, t+k) - p(x, t)] = \frac{1}{k} [p_{i,j+1} - p_{i,j}]$$

Вторую производную по координате в уравнении (4.9) заменим выражением:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} = \frac{1}{h^2} [p(x+h, t) - 2p(x, t) + p(x-h, t)]^2 = \frac{1}{h^2} [p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}]^2.$$

Разрешим полученное выражение относительно значений функции на верхнем временном слое:

$$\frac{1}{k} [p_{i,j+1} - p_{i,j}] = \frac{1}{h^2} [p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}]^2,$$

$$p_{i,j+1} = \frac{k}{h^2} [p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}]^2 + p_{i,j}. \quad (4.11)$$

Формула (3.4) позволяет найти решение в данный момент времени.

В результате численного моделирования получили следующее распределение представленное на рис. 4.7.

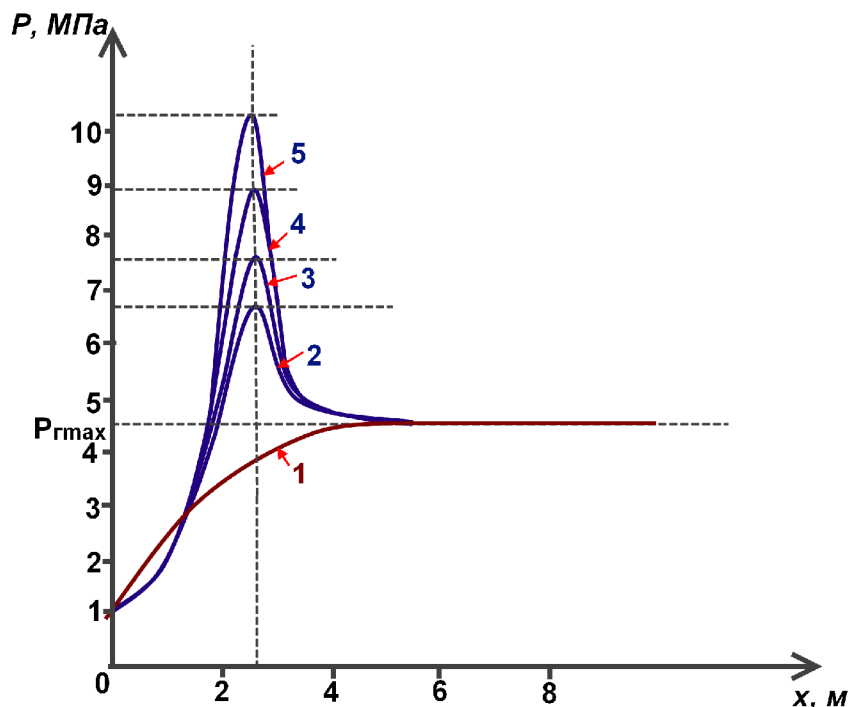


Рис.4.7. Распределение давления газа после начала диссоциации газовых гидратов и изменяющейся проницаемости краевой зоны угольного пласта: 1 – исходное распределение газового давления; 2 – при гидратонасыщенности 1,9%; 3- при

гидратонасыщенности 2,6%; 4- при гидратонасыщенности 3,9%; 5- при гидратонасыщенности 5,2

Таким образом, путем решения дифференциальных уравнений второго порядка получены закономерности изменения давления газа в зонах 1,3,4 вследствие разложения газовых гидратов с подвижной границей разложения.

Подобный расчет позволит в дальнейшем смоделировать более подробную и целостную картину изменения суммарного давления газа в призабойной зоне пласта вследствие разложения кристаллогидратов, фильтрации газа в сторону выработки и ее загазирования. Кроме того, можно будет предрасчитать формирование выбросоопасной ситуации при диссоциации газовых гидратов.

4.3 Математическое моделирование загазирования выработки при диссоциации твердого углегазового раствора по типу газогидратов при постоянной и переменной проницаемости краевой зоны

В предыдущих главах было доказано возможность существования твердого углегазового раствора природного газа по типу газогидратов в угольных пластах. При подземной разработке месторождений угля в призабойное пространство выделяется метан, образующий с рудничным воздухом взрывоопасную газовоздушную смесь. При определенных термодинамических условиях природный газ в угольных пластах даже при малом содержании влаги может существовать в виде твердых растворов по типу газогидратов, в которых молекулы газа заключены в кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, удерживаемые водородной связью[70].

За последние десятилетия накоплен определенный объем информации по распределению скоплений газа в твердом гидратном состоянии в угольных пластах. Исследование процесса диссоциации кристаллогидратов представляет значительный интерес, так как при ведении очистных и подготовительных работ в

ряде случаев происходят внезапные газовыделения, внезапные выбросы угля и газа и другие подобные явления, которые носят характер катастроф, приводят к гибели горнорабочих, а также к разрушению горных выработок и оборудования.

При диссоциации кристаллогидратов происходит выделение больших объемов газа, который, возможно, в большей степени влияет на формирование выбросоопасной ситуации. Следовательно, изучение процессов образования и диссоциации твердых растворов природного газа по типу газогидратов в краевой зоне угольного пласта поможет раскрыть физические условия, влияющие на формирование выбросоопасных ситуаций.

Выбросоопасная ситуация создается при определенном сочетании геомеханических и газодинамических процессов. Не во всех случаях процесс диссоциации твердых растворов природного газа по типу газогидратов сопровождается внезапным выбросом. По мнению акад. Христиановича С.А. этому должно предшествовать разрушение определенного слоя угля впереди забоя выработки под действием сил горного давления. Разрушение может и не происходить, но величина нормального к пласту давления может достаточно резко уменьшиться за счет каких-либо горнотехнических факторов, например, выхода забоя выработки из зоны ПГД (повышенного горного давления) или за счет увеличения зоны влияния выработки вследствие уменьшения прочностных свойств угольного пласта впереди забоя.

Известно, что движение метана в пласте угля для одномерного изотермического течения описывается выражением (4.9)[70, 71, 72]:

Уравнение фильтрации (4.9) получено Л.С. Лейбензоном.

Начальные и граничные условия для давления газа запишем следующим образом:

$$p(x,0) \big|_{x=0} = p_0 - \text{начальное давление в выработке};$$

$$p_3(x,t) \big|_{x=\xi} = p_4(x,t) \big|_{x=\xi} = p_p, \text{ где } p_p - \text{давление разложения кристаллогидратов};$$

$$p_2(\infty,t) \big|_{x=\infty} = p_\Gamma, \text{ } p_\Gamma - \text{газовое давление.}$$

Рассчитаем прирост давления при разложении кристаллогидратов. Примем следующие условия:

$h=3\text{м}$ – высота выработки; $b=5\text{м}$ – ширина выработки; $x=0,07\text{м}$ – протяженность зоны угля, содержащей кристаллогидраты;

$V_{\text{угля}} = h \cdot b \cdot x = 1,05\text{м}^3$ – объем угля, в котором распределены газовые гидраты;

Определим число молей газа, содержащегося в гидратном состоянии в угольном пласте [43,44]:

$$\nu = \frac{V_{\text{угля}} (1 - \varepsilon) \rho_{\text{гидрата}}}{\mu_{\text{воды}} n} \beta, \quad (4.12)$$

$$\nu = \frac{1.05 \cdot (1 - 0.015) \cdot 883 \cdot 0.019}{0.018 \cdot 17} = 56.7 (\text{моль}),$$

где $\beta = \frac{W}{1 - \varepsilon} \frac{\rho_w}{\rho_h}$ – гидратонасыщенность; плотность воды $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ [45];

$\varepsilon = 0,126$ – природная масса газа в единице массы газогидрата; плотность гидрата природного газа $\rho_h = 883 \text{ кг/м}^3$; W – природная влажность угля; $\mu_{\text{воды}}$ – молярная масса воды; n – число молекул воды, приходящихся на одну молекулу газа в элементарной ячейке газогидрата формы КС - I.

Затем по уравнению Ван-дер-Ваальса, с учетом числа молей газа ν , находящихся в гидратном состоянии в зоне угольного пласта, рассчитаем прирост давления ΔP вследствие высвобождения газа из гидратного состояния:

$$\Delta P = \frac{RT}{\frac{V_{\text{пор}}}{\nu} - b} - \frac{a}{\left(\frac{V_{\text{пор}}}{\nu}\right)^2}, \quad \Delta P = \frac{8.31 \cdot 278}{\frac{0.0525}{56.7} - 3.3 \cdot 10^{-5}} - \frac{0.14}{\left(\frac{0.0525}{56.7}\right)^2} = 24,27 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

где R – газовая постоянная; T – абсолютная температура пласта; a и b – коэффициенты Ван-дер-Ваальса для природного газа; $V_{\text{пор}}$ – объем порового пространства; ν – число молей газа, содержащегося в газовых гидратах.

$$V_{\text{пор}} = V_{\text{угля}} \cdot m = 1.05 \cdot 0.05 = 1.875 (\text{м}^3), \text{ где } m = 5\% \text{ – пористость.}$$

Результаты численного расчета краевой задачи по изменению давления газа в краевой зоне за $t=10\text{с}$ после начала процесса диссоциации кристаллогидратов даны (рис.4.8), для условий: $p_p = 35 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – давление разложения гидрата при пластовой температуре; $p_{\Gamma} = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – газовое давление; $p_0 = 10^5 \text{ Па}$ – атмосферное

давление; $\mu_r = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамическая вязкость; $p_r^1 = p_p + \Delta p = 59,27 \cdot 10^5 \text{ Па}$ - газоевое давление, в результате разложения кристаллогидратов.

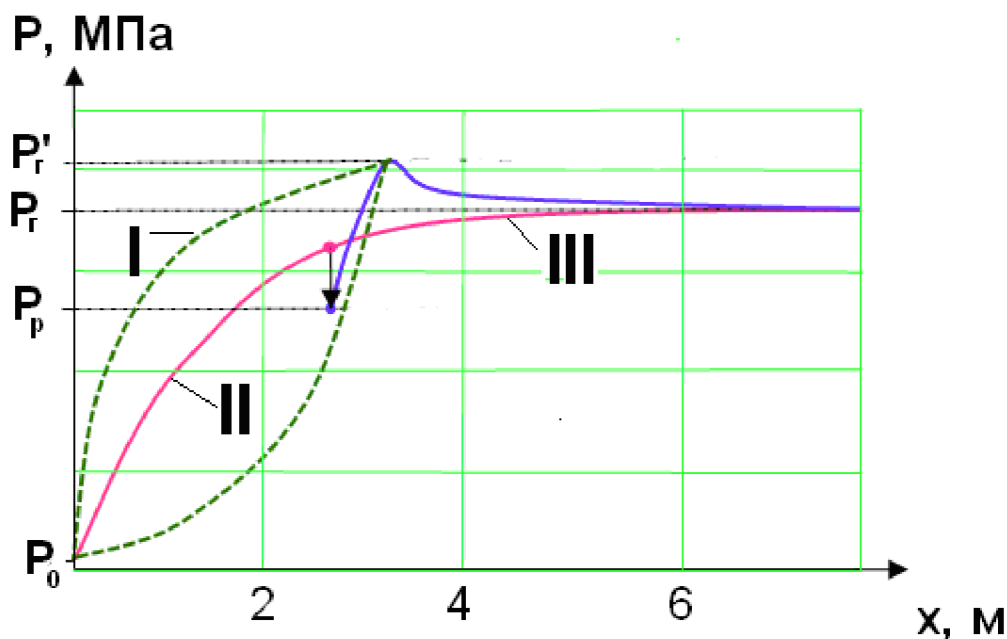


Рис.4.8. Распределение давления газа после начала диссоциации кристаллогидратов, I- при переменном коэффициенте проницаемости пористой среды; II – при постоянном коэффициенте проницаемости; III-исходное распределение газового давления

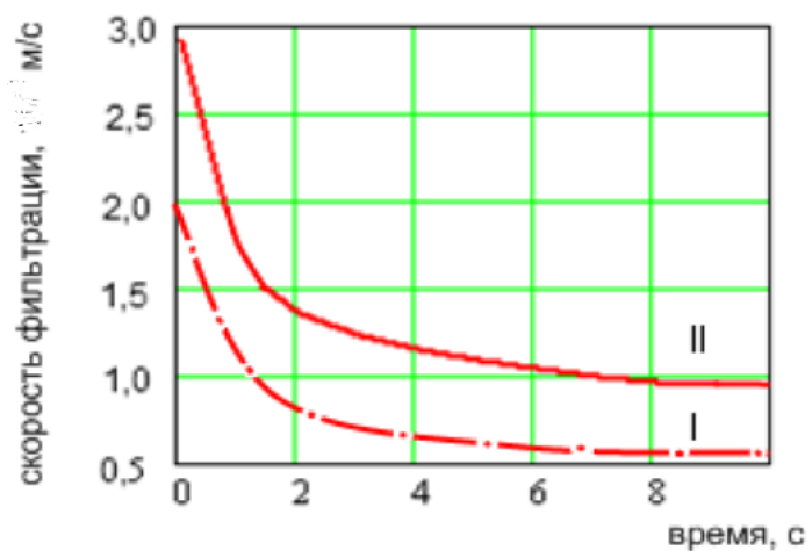


Рис.4.9. Изменение скорости фильтрации газа, полученного вследствие диссоциации кристаллогидратов через границу угольного пласта с выработкой, от времени; 1 – при изменяющемся k ; 2- при $k=\text{const}$

С учетом изменения газовой проницаемости в краевой зоне угольного пласта, рассчитаем интенсивность газовыделения и время разгазирования выработки.

Интенсивность газовыделения с забоя выработки $I_c = \int_0^t v dt \cdot S$ можно рассчитать,

зная скорость фильтрации; $x=2,5$ м – протяженность зоны угля, содержащей кристаллогидраты и $S=15$ м² – площадь сечения выработки.

Скорость фильтрации определим по формуле [46]:

$$v = \frac{k(x)}{\mu_r} \cdot \sqrt{(p_p^2 - p_r^2) \frac{1}{a\sqrt{t}}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{x}} \quad (4.13)$$

Результаты расчета скорости фильтрации по формуле (4.13) приведены на (рис.4.9). Кривая I соответствует расчету при $k=f(x)$, а кривая II при $k=const$. Тогда, интенсивность газовыделения для $k=const$ за 10с будет равна: $I_{Ic} = 11,04 \text{ м}^3 / \text{мин}$, а для $k=var$ $I_{IIc} = 5,22 \text{ м}^3 / \text{мин}$.

Подача свежего воздуха, необходимого для проветривания выработки, составляет: $Q = \frac{100 \cdot I_c}{C_o} = 110400 \cdot \text{м}^3$.

При расчете учтено, что значение $c_{\max}$ не должно превышать допустимой концентрации $c_o = 0,01$. Кроме того, скорость вентиляционной струи не должна превышать, согласно требованиям, скорости потока в выработках $v_o = 0,25$ м/с (Правила безопасности в угольных шахтах: ПБ 05-618-03. Сер. 05. Вып. 11 / отв. разработчики А. И. Субботин [и др.]. М.: ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. 296 с.) [70,72, 73,74, 75,76, 77].

Зная количество воздуха, необходимого для проветривания призабойного пространства, диаметр трубопровода (0,75 м) и интенсивность подачи воздуха вентилятором марки ВОКД-1 ($V_v = 162$ м³/мин), можно рассчитать полное время разгазирования выработки: $t_I = 11$ ч (для $k = f(x)$) и $t_{II} = 5,37$ ч (для $k = const$).

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования показали:

- что давление свободного газа при диссоциации ТУГР по типу газогидратов увеличивается при различной гидратонасыщенности и изменяющемся коэффициенте проницаемости краевой зоны.
- диссоциация кристаллогидратов в краевой зоне угольного пласта при переменном коэффициенте проницаемости представляет значительную угрозу безопасности горных работ, которые прекращают до приведения параметров атмосферы призабойной зоны к требуемым «Правилами безопасности...» значениям концентрации метана.
- проведенные исследования позволили оценить состояние призабойной зоны массива вследствие газодинамических процессов, и разработать определенные меры по созданию безопасных условий при разгазировании выработки.

ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ТВЕРДОГО УГЛЕГАЗОВОГО РАСТВОРА ПО ТИПУ ГАЗОГИДРАТОВ В МАССИВЕ

5.1 Определение наличия твердого углегазового раствора в угольных пластах впереди забоя подготовительных выработок геофизическими методами

После открытия № 75 «Свойство природных газов находиться в твёрдом состоянии в земной коре» [78], сделанного в 1970 г. российскими учеными В. Г. Васильевым и др., начали активно развиваться исследования газовых гидратов природного газа. На сегодняшний день доказано существование реликтовых месторождений газовых гидратов метана, которые покрывают более 20% суши (в районах распространения криолитозоны) и до 90 % дна океанов и морей.

Прогноз выбросоопасности угольных пластов производится при проведении подготовительных выработок различными методами [79,80, 81, 82, 83, 84, 85]. Угольные пласты, отнесенные к угрожаемым и опасным по внезапным выбросам угля и газа, как правило, имеют высокое газовое давление и влажность порядка 1,5 – 2,5%. При определенных значениях температуры, давления и влажности в угольных пластах может образовываться твердый углегазовый раствор природного газа по типу газогидратов. Обратные фазовые переходы газа из твердой фазы в свободную происходят при условии, что термодинамические параметры принимают значения меньше равновесных [86]. При этом область возможного образования твердого раствора отделена от области раздельного существования компонент равновесной кривой фазового перехода. Измеренное газовое давление на глубине 400м по данным ВостНИИ [87, 88, 89] составляет порядка 4,5МПа. Поскольку система «угольная матрица – влага в порах –

свободный газ» представляют собой одну термодинамическую систему, то давление в ней может достигать 8,25-9,5 МПа. В работе [90, 91] также приводятся данные о температуре +15°C для глубин 513м, 514м и 309м, 320м. С другой стороны, температура +12°C измерена в разных пластах, находящихся на глубинах 287м, 362м. Изменение состава природного газа в угле может влиять на смещение точки фазового равновесия твердых растворов в сторону уменьшения равновесных значений. Если рассматривать в качестве гидратообразующего природный газ, содержащий, помимо метана, 20% углекислого газа, то давление в точке фазового равновесия для температуры +8°C снижается с 5,2МПа до 4,3МПа. Смесь метана с 4% сероводорода образует устойчивый гидрат уже при +15°C и 5МПа. А смесь метана с 25% этана образует гидрат уже при +12°C и давлении 4МПа. Можно предположить с учетом капиллярных эффектов, что мезо- и микропористая структура ископаемого угля (а также полярные группы химического вещества угля) также влияют на стабильность возникающих газовых гидратов. В работах [92, 93] приводятся результаты экспериментальных исследований и моделирования условий стабильности гидратов в мезопористой структуре, в том числе активированного угля. В работе [93] указывается на некоторое снижение давления, при котором происходит гидратообразование в мезопористой структуре.

В угольных пластах вследствие низкой влажности размеры скоплений газовых гидратов ограничены размерами капилляров и составляют значения порядка микрометра. При +5°C минимальное давление перехода в область гидрата составляет около 4 МПа. Эти условия могут выполняться для выбросоопасных угольных пластов. Формирование выбросоопасных ситуаций в угольных пластах может быть связано с диссоциацией газовых гидратов метана, точнее, со скоростью диссоциации газовых гидратов. Такие размеры скоплений способствуют тому, что при резком снижении давления, например, при разрушении слоя угля, находящемся впереди забоя выработки на расстоянии порядка 1,5 – 2,0 м определенная масса газового гидрата начинает

диссоциировать одновременно, что и способствует резкому всплеску давления газа в данной зоне.

Существует ряд методов контроля формирования выбросоопасных ситуаций, основным из которых является локальный прогноз, который предусматривает геофизические методы. Для оперативной оценки существования природного газа в виде твердых углегазовых растворов по типу газовых гидратов в массиве горных пород наиболее подходят геофизические методы, из которых можно отметить: сейсмические и электрометрические. Уточнение параметров области, содержащей газогидраты, необходимо производить путем применения в скважинах комплекса геофизических методов.

Шепелевой С. А. и др. разработан способ определения выбросоопасных зон в угольных пластах [80], где предложено определять возможные зоны существования в угольных пластах твердых углегазовых растворов по типу газогидратов путем измерения распределения удельного эффективного электросопротивления (УЭС) в массиве и построения графика зависимости УЭС угольного пласта от расстояния вдоль оси скважины, с помощью которого определяют ширину зоны угольного пласта в пределах которой УЭС резко возрастает, что связывают с наличием в ней ТУГР по типу газовых гидратов природного газа. Но этот метод определения не является однозначным, так как он не учитывает возможное возрастание УЭС массива, например, вследствие повышения трещиноватости угольного пласта. Было показано [94], что удельное электросопротивление системы «уголь – влага – газ» в 1,5 – 2,0 раза выше, чем у системы «уголь – влага».

Автором предложено для однозначного определения наличия на участке угольного пласта, содержащей ТУГР по типу газовых гидратов, дополнительно измерять скорость упругих волн, далее определять показатель выбросоопасности R'' с учетом ширины зоны угольного пласта, содержащей твердый углегазовый раствор природного газа по типу газовых гидратов и гидратонасыщенности угольного пласта [95].

Для условий разработки угольного пласта по величинам газового давления и температуры угольного пласта с помощью равновесной кривой фазового состояния (рис. 5.1) устанавливают возможность существования в угольном массиве твердого раствора природного газа по типу газовых гидратов. Область над кривой – область существования газовых гидратов, область под кривой – область раздельного существования воды и природного газа.

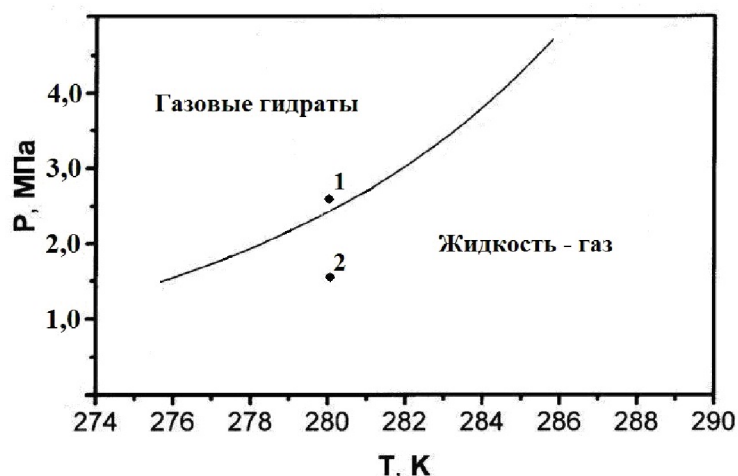


Рис. 5.1. Фазовая диаграмма системы « метан – вода»

Затем в пробуренной скважине измеряют УЭС угольного массива и строят график зависимости УЭС от расстояния вдоль оси скважины. По этому графику определяют ширину зоны угольного пласта, предположительно содержащую твердый углегазовый раствор по типу газовых гидратов: на протяжении зоны отжима угля значение УЭС уменьшается не более чем на 30 %, а по мере выхода за зону влияния выработки, принимает некоторое постоянное значение ρ_1 . В зоне угольного пласта, содержащей раствор природного газа по типу газовых гидратов, УЭС угольного пласта будет равно ρ_2 . Если отношение $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 50 - 100$, то считается, что эта зона содержит твердый углегазовый раствор природного газа по типу газовых гидратов. Неоднозначность решения можно исключить, если дополнительно здесь измерить скорость упругих волн.

В скважину помещают излучатель и приемник продольных упругих волн, установленные на твердом штоке, на расстоянии 0,25-0,5 м друг от друга, и, перемещая их с шагом 0,25 – 0,35 м, измеряют скорость продольных упругих

волн массиве (рис.5.2). Для улучшения акустического контакта излучатель и приемник прижимают к стенкам скважины путем нагнетания воздуха ручным насосом в резиновую оболочку, на которой установлены датчики.

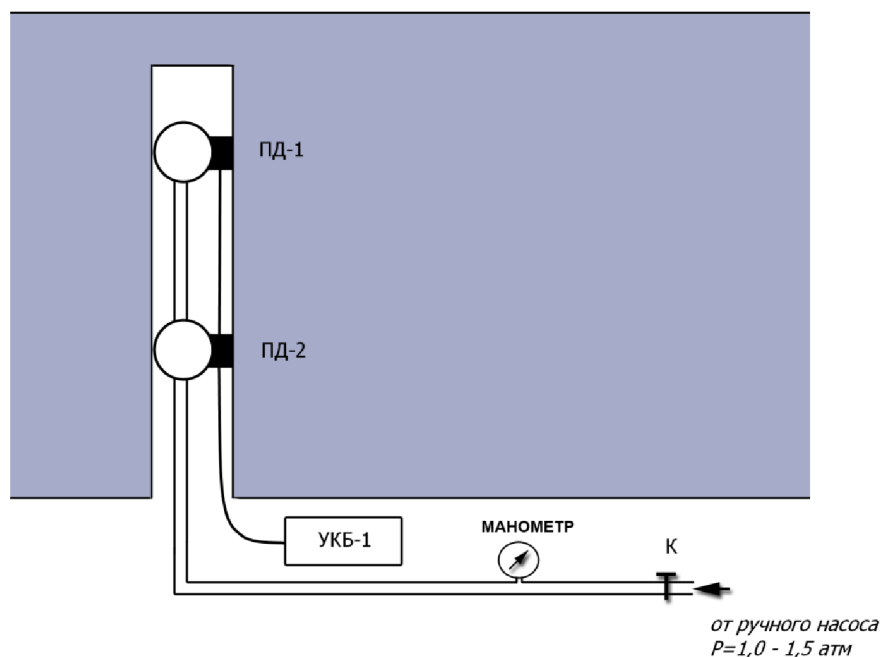


Рис.5.2. Схема измерения скорости упругих волн

Если скорость упругих волн не уменьшается и составляет величину порядка 2,0 – 2,5 км/с, то эту зону относят к содержащей твердый углегазовый раствор природного газа по типу газовых гидратов.

5.2 Лабораторная установка для определения скорости упругих волн

С целью сравнения скорости упругих волн в массиве при наличии газогидратов метана и без него были проведены экспериментальные исследования на кафедре физики КузГТУ на лабораторной установке (рис.5.3).

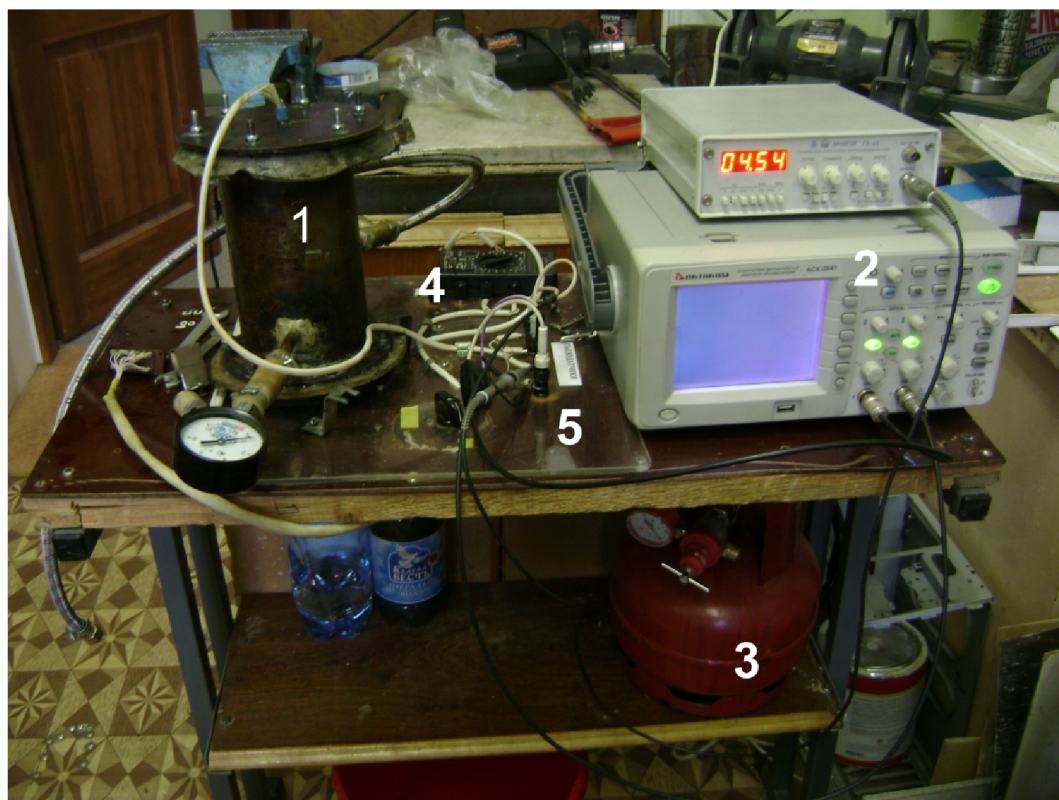


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки по изучению ТУГР
по типу газогидратов

1-реактор с манометром и подведенным шлангом, через который подается газ под давлением; 2- электронный осциллограф марки (АСК-2034); 3- газовый баллон с манометром и краном; 4 – мультиметр; 5- ноутбук; 6 - Омметр.

Установка предназначена для изучения двух систем: «уголь – влага» и «уголь – газ – влага». Установка дает возможность осуществлять автоматический сбор следующих параметров: давление, температура, удельное электросопротивление, скорость упругих волн, частота колебаний. В состав установки входит пакет программного обеспечения (Актаком АСК-2034) и ноутбук.

Установка позволяет получать равновесные кривые гидратообразования. На (рис.5.4) представлен реактор, в который помещали угольную матрицу, предварительно увлажненную до влажности от 1 до 5%.

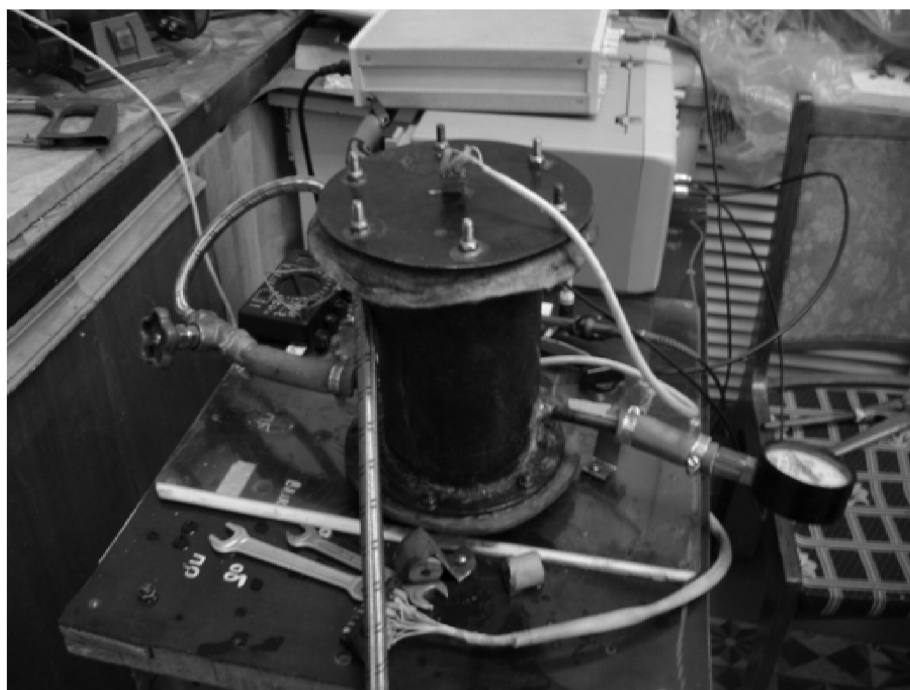


Рис.5.4. Реактор экспериментальной установки

Внутри реактора расположены термодатчики, зонды для измерения сопротивления и пьезодатчики, выводы которых подключаются к осциллографу и мультиметру.

В измерительной камере расположены два пьезодатчика, один подключен к звуковому генератору с частотой выходного сигнала порядка 10 Гц, а второй к электронному осциллографу, на экране которого можно наблюдать одновременно сигнал от генератора и сигнал, снимаемый вторым датчиком. Датчики расположены друг от друга на расстоянии S .

В ходе эксперимента определяли промежуток времени t , за который сигнал проходит расстояние от первого пьезодатчика до второго. Скорость упругой волны рассчитывали по формуле:

$$V = \frac{S}{t},$$

где $S = 0,147\text{ м}$ – расстояние между датчиками в камере; t – время, за которое сигнал проходит расстояние от первого пьезодатчика до второго.

Эксперимент проводился в системе «угольная матрица – поровая влага» с природным газом (пропаном) и без него [96].

В зависимости от термодинамических параметров (температура T , давление p) система «угольная матрица – поровая влага – природный газ» может находиться в различных фазовых состояниях. Область существования твердых растворов природного газа отделяется от области раздельного существования воды и природного газа в газообразном состоянии кривой фазового перехода.

5.3 Сравнительный анализ величин скорости упругих волн угольной матрицы без газа и содержащей твердый углегазовый раствор по типу газогидратов в зависимости от температуры

Эксперименты проводились следующим образом. Сначала угольную мелочь фракцией 0,15 мм, отобранную с пласта XXIV на шахте Березовская, помещали в термошкаф и выдерживали при температуре 105°C до постоянной массы. После охлаждения пробы в эксикаторе её равномерно увлажняли по всему объему до различной влажности (1- 5 %) на протяжении нескольких дней. Затем данная проба загружалась в реактор и выдерживалась сутки под давлением газа пропана 0,5 МПа, после чего реактор охлаждали до температуры -20°C и в течение 12 часов выдерживали при данной температуре. Этого времени было достаточно для образования газовых гидратов пропана. Далее с помощью полученных на экране осциллографа картины (рис. 5.5) определяли время между двумя сигналами пьезодатчиков, параллельно измеряли температуру, давление и удельное электросопротивление, затем рассчитывали скорости упругих волн систем «уголь-газ-влага» и «уголь-влага», результаты которых приведены в табл.5.1. В ходе эксперимента было проведено более 20 опытов по гидратообразованию пропана в контакте со льдом и водой (Приложение 1).

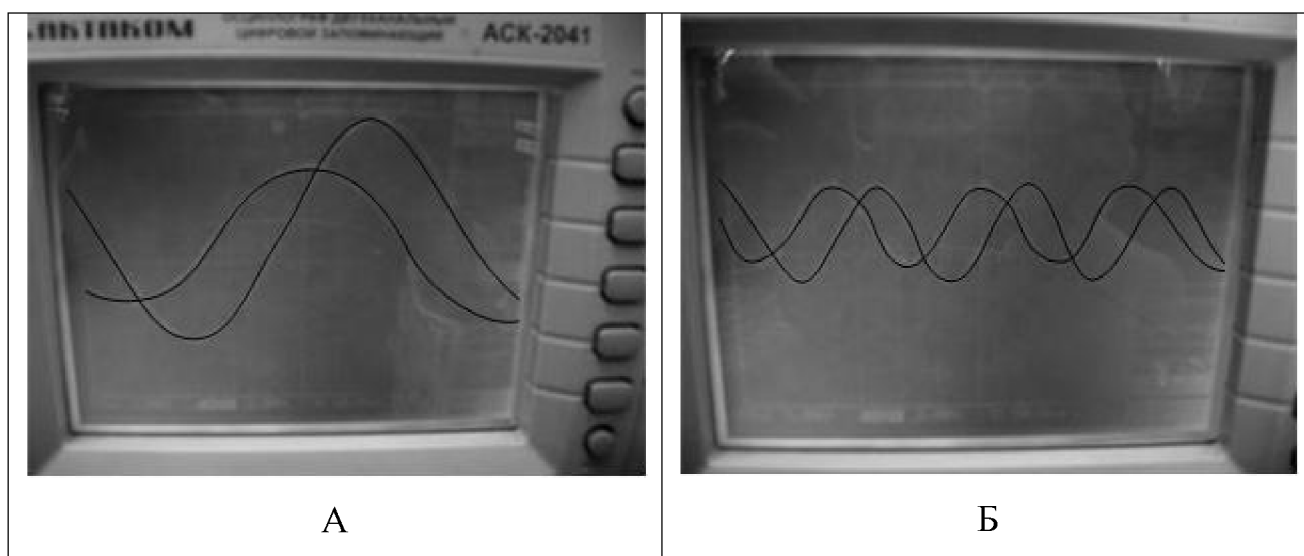


Рис.5.5. Экспериментальные зависимости: а-частота 10Гц, б-частота 20Гц

Термобарические условия эксперимента соответствовали условиям образования твердого углегазового раствора пропана в угольной матрице [97, 98, 99, 100].

Таблица 5.1

Скорости упругих волн в системах «уголь-вода-газ» и «уголь-вода», при постоянном давлении 0,5МПа и изменяющейся температуре

Температура, °С	Система «уголь-вода»		Система «уголь-вода-газ»	
	Скорость упругих волн, км/с	УЭС, МОм·м	Скорость упругих волн, км/с	УЭС, МОм·м
-15	3,00	500	3,50	250
-12	2,93	380	3,42	190
-10	2,90	250	3,40	170

5.4. Разработка метода определения вида газодинамических явлений для участка пласта, содержащего твердый углегазовый раствор по типу газогидратов

Для повышения безопасности горных работ необходимо совершенствовать методы прогноза потенциально опасных зон в краевых зонах угольных пластов. Резервы находятся в учете влияния разложения газогидратных молекулярных образований.

Существующие методы прогноза в большинстве случаев основываются на измерении выхода буровой мелочи, начальной скорости газовыделения, конвергенции пород почвы и кровли, прочности угля на расстоянии около 3, 0 м от забоя, но не учитывают влияние наличия и разложения газогидратных молекулярных образований на давление свободного газа.

Дополнительный объем свободного газа зависит от протяженности зон, содержащих газогидраты. Поэтому разработка метода контроля этих зон является важнейшей задачей прогноза. Вид ГДЯ зависит от фильтрационных характеристик призабойной зоны угольного пласта, поэтому необходимо разработать математические модели изменения газового давления в краевой зоне с учетом гидратонасыщенности и скорости подвигания границы разложения газогидратов, что и позволит совершенствовать метод прогноза вида ГДЯ.

Разложение ТУГР по типу газогидратов приводит к повышению газового давления впереди забоя подготовительной выработки, как было доказано в предыдущих главах. Вид ГДЯ (внезапный выброс или загазирование) будет зависеть от коэффициента проницаемости зоны, разделяющей области неупругих и упругих деформаций.

Для определения вида газодинамического явления на участке пласта, содержащего твердый углегазовый раствор природного газа по типу газогидратов, рассчитывают распределение коэффициента проницаемости угольного пласта по формуле:

$$k(x) = k_0 e^{-b \cdot \sigma(x)} \quad (5.1)$$

где k_0 - коэффициент газопроницаемости угля в состоянии полной разгрузки от напряжений, м² (определяется в лабораторных условиях по В. В. Ходоту [5]); x – расстояние до границы зоны неупругих и упругих деформации по выходу штыба, м; b – некоторая постоянная, зависящая от компрессионных свойств угольного пласта; $\sigma(x)$ - величина напряжений в точке, соответствующей границе раздела зон неупругих и упругих деформаций, МПа, определяется по графику.

Определяют диапазон изменения значений коэффициента проницаемости k данного угольного пласта на границе, разделяющей области неупругих и упругих деформаций [40]. Для этого определяют напряжения по формуле: $\sigma_0 = \frac{3,6}{1+e^{-7,28(f-0,75)}}$ на кромке забоя [67], а на границе зоны влияния выработки их полагают равными γH . Проводят прямую через эти точки, а по выходу штыба определяют расстояние до границы разделения зон неупругих и упругих деформаций (точка перегиба) и находят $\sigma(x)$ в данной точке. Затем вычисляют практическое значение коэффициента проницаемости (Приложение 2).

Далее строят номограмму рис. 5.6., по которой определяют зависимость коэффициента выбросоопасности R'' [101] от коэффициента проницаемости массива k . Из формулы расчета показателя выбросоопасности R'' определяют критическое значение коэффициента проницаемости массива $k_{крит}$ для данного пласта, при котором $R''=0$.

Расчет показателя выбросоопасности R'' производят по методу проф. В. И. Мурашева с учетом прироста давления в зависимости от гидратонасыщенности, вследствие диссоциации ТУГР (алгоритм программы расчета показателя R'' в приложении 3) при различных значениях газового давления и коэффициента проницаемости массива в зоне, разделяющей область неупругих и упругих деформаций.

Вводят параметры и характеристики угольного пласта, и определяют показатель выбросоопасности, как соотношение активных сил F_a , стремящихся

развязать внезапный выброс, и пассивных сил F_n , препятствующих этому, по формулам:

$$F_a = \frac{1}{2} \frac{m_0 \sqrt[3]{(m_0 + \beta h)^2 (P_0^2 - P^2)}}{P(m_0 + \beta h) \left(x + \frac{1}{\beta} \ln \frac{m_0 + \beta h e^{-\beta x}}{m_0 + \beta h} \right)}, \quad F_{II} = \frac{\Pi}{S} (k'_0 + k'_0 \nu' \operatorname{tg} \rho), \quad (5.2)$$

где F_a – активные силы; m_0 – пористость массива вне зоны влияния выработки; β – параметр, зависящий от свойств угля и глубины разработки; h – величина отжима угля на кромке забоя после выемки очередной заходки, м; P_0 – давление газа в угольном пласте; P – давление газа на кромке забоя; x – протяженность зоны влияния подготовительной выработки на напряженное состояние угольного массива, м; Π – периметр выработки, пройденной по угольному массиву, м; S – площадь обнаженного угольного массива в сечении выработки, м²; k'_0 – коэффициент сцепления угля на кромке забоя нарушенного участка пласта; ν' – параметр, зависящий от угла внутреннего трения угля; ρ – угол внутреннего трения нарушенного участка пласта, град. Где за давление газа на кромке забоя берут суммарное газовое давление с учетом диссоциации ТУГР природного газа по типу газогидратов с учетом гидратонасыщенности: $p = p_r + \gamma H$.

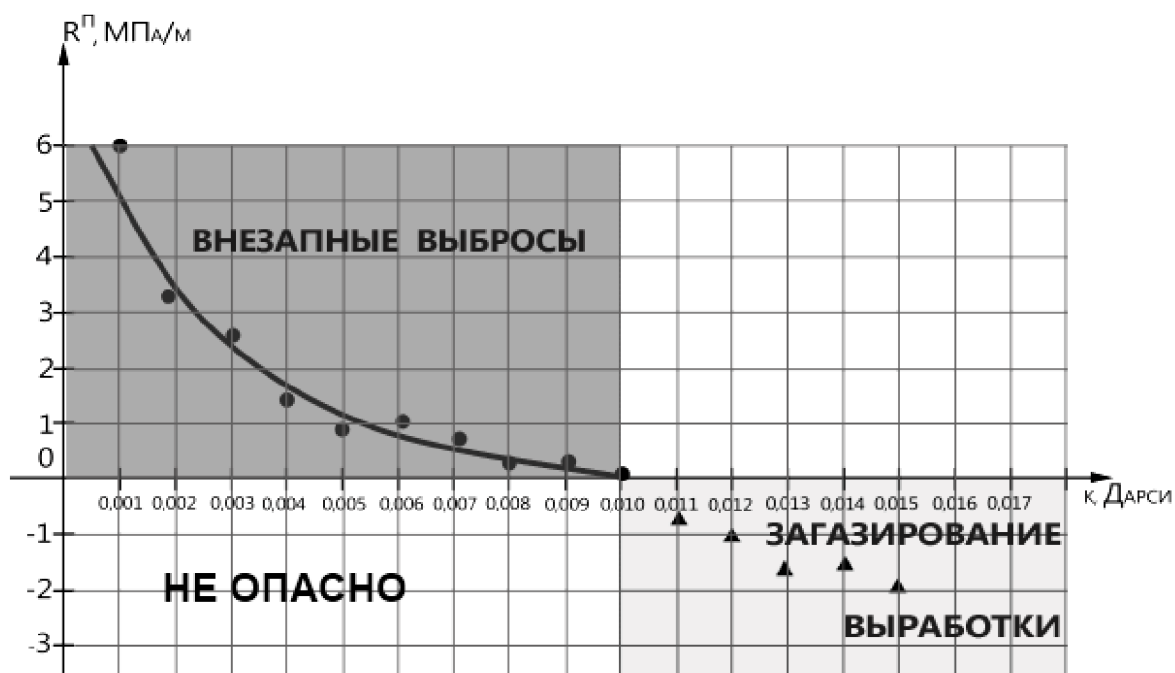
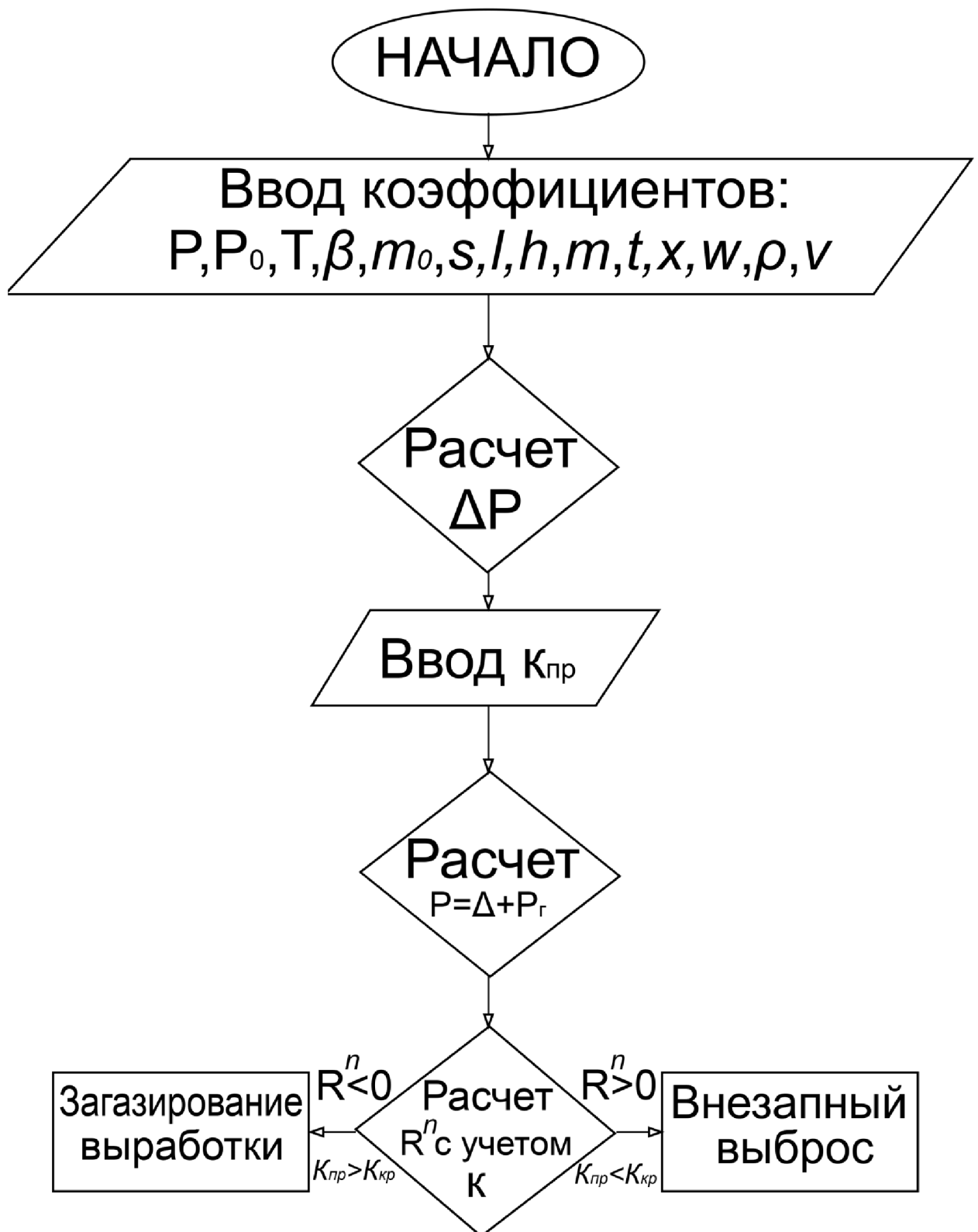


Рис.5.6. Номограмма для определения вида ГДЯ

Далее сравнивают значения полученных коэффициентов проницаемости: если практическое значение проницаемости меньше критического значения ($k_{np} < k_{кр}$), то данный участок **опасен по внезапным выбросам угля и газа**, если же выполняется обратное условие $k_{np} > k_{кр}$, то можно ожидать интенсивную фильтрацию газов сторону забоя выработки и ее дальнейшее **загазирование**.

Данная методика (Приложение 4) позволяет выявить в угольных пластах зоны, опасные по ГДЯ, и повысить надежность прогноза за счет того, что учитывает дополнительный фактор в виде наличия твердых растворов природного газа по типу газовых гидратов, диссоциация которых вносит основной вклад в газовый баланс при ГДЯ, и позволяет однозначно интерпретировать результаты измерения удельного электросопротивления, а также позволяет определить тип газодинамических явлений в случае попадания выработки в опасную зону

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВИДА ГДЯ В КРАЕВОЙ ЗОНЕ ПЛАСТА



ВЫВОДЫ:

1. Для однозначности интерпретации результатов определения зон, содержащих ТУГР по типу газогидратов, автором предложено дополнительно измерять скорость упругих волн на участках угольного массива, где УЭС резко возрастает.
2. Создана лабораторная установка для определения скорости упругих волн в замороженной угольной матрице с газом и без него.
3. Сравнительный анализ величин скорости упругих волн угольной матрицы без газа и содержащей ТУГР по типу газогидратов в зависимости от температуры показал, что скорость упругих волн в массиве может служить дополнительным параметром для обнаружения участков, содержащих твердый углегазовый раствор природного газа.
4. Разработана методика определения вида ГДЯ для участков угольного пласта, содержащих ТУГР по типу газогидратов, основанная на установлении критического значения коэффициента проницаемости краевой зоны угольного пласта на участках, где удельное электросопротивление в $50 \div 100$ раз больше удельного электросопротивления соседних участков и скорость упругих волн составляет не менее $3,0 \div 3,5$ км/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке и обоснованию метода прогноза газодинамических явлений в подготовительных выработках с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов в угольных пластах, при диссоциации которых выделяется дополнительный объем газа, который вносит основной вклад в газовый баланс при ГДЯ, что позволяет повысить точность текущего прогноза газодинамических явлений и безопасность горных работ при подземной разработке угольных месторождений и вносит существенный вклад в отрасль наук о Земле.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему:

1. Экспериментально установлены термодинамические условия и минимальная влажность, при которых происходит образование ТУГР в поровых каналах угольной матрицы.
2. Установлена экспоненциальная зависимость уменьшения скорости диссоциации ТУГР с увеличением их размеров, а также найдено соответствие скорости движения границы диссоциации и скорости «волны дробления» по С. А. Христиановичу.
3. Установлено увеличение давления свободного газа и его распределение при диссоциации ТУГР в зависимости от гидратонасыщенности и коэффициента проницаемости краевой зоны массива.
4. Разработана методика определения вида ГДЯ с учетом зон, содержащих ТУГР и критической проницаемости массива краевой зоны угольного пласта.
5. Написана программа для расчета показателя выбросоопасности угольных пластов и определения вида газодинамических явлений.

6. Разработано «Методическое руководство по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, при проведении подготовительных выработок с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов».

Список литературы

1. Методические указания по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах / А. И. Бобров, Л. А. Вайнштейн, М. А. Ильяшов и др. / МакНИИ /; И. М. Петухов, В. П. Кузнецов / ВНИМИ /; И. В. Сергеев, О. И. Хмара / ИГД им. А. А. Скочинского /; В. И. Мурашев, В. С. Зыков / ВостНИИ/; В. Е. Зайденварг, А. М. Обрезан / Минуглепром СССР /; В. Я. Привыко / Госгортехнадзор РСФСР /; С. П. Ткачук / Укркомгосгортехнадзор УССР / – Донецк: ЦБНТИ Минуглепрома СССР, 1991. – 18 с.
2. Зыков, В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах / В. С. Зыков // Институт угля и углехимии СО РАН. - 2010. – 333 с.
3. Петухов, И. М. Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков // М.: Недра. -1983. – 280 с.
4. Гринько, Н. К. Российская угольная энциклопедия. Т.1/ Н. К. Гринько, А. И. Митейко, В. С. Зыков и др. – М. – СПб: ВСЕГЕИ, 2004. – 649 с.
5. Ходот, В. В. Внезапные выбросы угля и газа. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 362 с.
6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности « Инструкция по разгазированию горных выработок, расследованию, учету и предупреждению загазирования».
7. Петросян, А. Э. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа / А. Э. Петросян, М. Ф. Яновская, Б. М. Иванов, В. Г. Крупеня // М.: Наука. - 1978.
8. Полевщиков, Г.Я. Особенности дебита метана при саморазрушении углеметановых пластов / Г.Я. Полевщиков, Т.А. Киряева, А.А. Рябцев // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. – № 3. – С. 326–329.
9. Алексеев, А. Д. Распад твердых газоугольных растворов / А. Д. Алексеев, А. Т. Айруни, И. В. Зверев и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых: Сб. – Новосибирск: 1994. – С.65 -70.

10. Айруни, А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах [Текст] / А. Т. Айруни. – М.: Наука, 1987. – 310 с.
11. Зайденварг, В. Е. Комплексная разработка метаноносных угольных месторождений / В. Е. Зайденварг, А. Т. Айруни, Ю. Э. Петрова и др. – М.: Изд. ЦНИЭИуголь, 1993. – 145 с.
12. Плотников, Е. А. Предотвращение динамических и газодинамических явлений при подземной разработке угольных пластов / Е. А. Плотников, В. В. Дырдин, И. С. Ёлкин, Т. Н. Гвоздкова // Кемерово: Кузбассвуиздат, 2010. – 159 с.
13. Чернов, О. И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О. И. Чернов, В. Н. Пузырев - М.: Недра, 1979.- 296 с.
14. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. – М.: Недра, 1977.- 96 с.
15. Кнуренко, В. А. Зональность газодинамических явлений в шахтах Кузбасса/ В. А. Кнуренко, В. А. Рудаков. – Кемерово: КузГТУ, 1998.- 227 с.
16. Мурашев, В. И. Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках//Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М.: Недра, 1978. – С. 141-162.
17. Зыков, В. С. Прогноз и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах: учебное пособие / В.С. Зыков, П.В. Егоров, В.В. Сидорчук, С. Е. Решетов. – Кемерово: КузГТУ, 1999. – 171 с.
18. Петухов, И. М. Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков. М.: Недра. - 1983. – 280 с.
19. Петросян, А. Э. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа / А. Э. Петросян, М. Ф. Яновская, Б. М. Иванов, В. Г. Крупеня. М.: Наука. - 1978.
20. Фейт, Г.Н. Руководство по определению степени (категории) выбросоопасности угольных пластов и забоев горных выработок с учетом глубины и технологии ведения горных работ/ Г.Н. Фейт, О.Н.Малинникова, В.С.Зыков, В.А. Рудаков // Ротапринт ВостНИИ. Люберцы-Кемерово. - 1999.

21. Малинникова, О. Н. Условия образования метана из угля при разрушении [Текст] / О. Н. Малинникова // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2001. – № 5. – С. 95 – 99.
22. Фейт, Г. Н. Исследование прочностных свойств и строение угольных пластов Донбасса с точки зрения оценки выбросоопасности // Проблемы рудничной аэрологии. АН СССР, 1963. С.212-222.
23. Методика оценки выбросоопасности угольных пластов с глубиной на разведуемых участках по геологоразведочным данным для шахт Кузбасса / В. Н. Пузырев, В. А. Рудаков, Л. М. Кнуренко и др. – Кемерово, 1989. – 10 с. – (ВостНИИ).
24. Шаталов, В. А. Зональность внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса / В. А. Шаталов. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 216 с.
25. Бобров, И. В. Причины выбросов при проведении выработок в шахтах Донецкого бассейна / И. В. Бобров // Уголь Украины. – 1966. – № 1.
26. Рудаков, В. А. Методика разграничения участков угольных пластов на опасные и неопасные по внезапным выбросам угля и газа/ В. А. Рудаков, С. П. Захарочкин // Вопросы повышения безопасности горных работ на шахтах: Материалы науч.-практ. конф. / ГУ Кузбас. гос. техн. ун-т, филиал в г. Прокопьевске. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2003. – С. 62-66.
27. Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах. Сборник документов. - 2011.
28. А. с. СССР № 1696729. М. кл. Е 21 F 5/00. Способ прогноза выбросоопасности в очистном или подготовительном забое / Г. И. Колчин и др. – Оpubл. 07.12.91, Бюл. № 45.
29. Бобров, И. А. Совершенствование способа прогноза выбросоопасности по амплитудно-частотным характеристикам акустического сигнала для подготовительных выработок, проводимых буровзрывным способом. Автореф. дисс...канд. тех. наук. – М., 1994. – 21 с.

30. Зорин, А. Н. Акустический способ контроля выбросоопасности пород при комбайновой проходке / А. Н. Зорин, Е. Д. Ковтун, И. И. Качан // Уголь Украины. – 1987. - №2. – С. 29 – 30.
31. Методика по прогнозу выбросоопасных угольных пластов по изменению температуры их в призабойной части. – Киев: Ин-т технической теплофизики АН Украинской ССР, 1988.
32. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. – М.: Изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1989. – 192 с.
33. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих пласты, склонные к горным ударам. – Л.: Изд. ВНИМИ, 1988. – 86 с.
34. Пузырев, В. Н. Дифференцированный текущий прогноз опасности газодинамических явлений, выбор и контроль за эффективностью способов их предотвращения. – Уголь. - №5. – 1980. – С. 21-25.
35. Алексеев, А. Д. Свойства органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов / А. Д. Алексеев, А. Т. Айруни, И. Д. Эттингер и др. // диплом № 9, открытие № А – 016 от 30 июня 1994 г.
36. Эттингер, И. Л. Условия существования гидратов газов в угольных пластах / Безопасность труда в промышленности. – 1974. - № 2. – С. 30 - 32.
37. Мюллер Р. Л. К вопросу о возможной роли химических процессов при внезапных выбросах угля и газа в угольных шахтах / Вопросы теории внезапных выбросов угля и газа // М.: Изд – во ИГД АН СССР. – 1959. – С. 156 – 172.
38. Каталог внезапных выбросов угля и газа по шахтам восточных и северных месторождений страны за 1975 – 1982 гг. Кемерово: ВостНИИ, 1983.
39. Каталог шахтопластов Кузнецкого, Карагандинского и Печорского угольных бассейнов с характеристикой горно-геологических факторов и явлений. – М. - 1982.

40. Дядин Ю. А. Супрамолекулярная химия: Клатратные соединения // Соросовский образовательный журнал. - 1998. - №2.
41. Дядин, Ю. А. Соединения включения / Ю.А. Дядин, К. А. Удачин, И. В. Бондарюк // Новосибирск: НГУ. - 1988. - С. 1-101.
42. Дядин, Ю.А. Газовые гидраты / Ю.А. Дядин, А.Л. Гущин. // Соросовский образовательный журнал. – 1998. - № 3. – С. 55 – 64.
43. Истомин, В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В.С. Якушев // М.: Недра. - 1992.
44. Инербаев, Т. М. Динамические, термодинамические и механические свойства газовых гидратов структуры I и II. // Российский химический журнал. - т. 48. - № 3. – 2003. - С. 19-27.
45. Ким, Т. Л. Исследования форм связи метана с угольной матрицей для совершенствования методик прогноза выбросоопасности / Т. Л. Ким, А. Ю. Манакон, В. Г. Смирнов, В. В. Дырдин, С. А. Шепелева // Изв. Вуз. Горный журнал. - 2014. - № 1. - С. 128 - 136.
46. Кэррол, Д. Гидраты природного газа. Перевод с англ. – Москва : ЗАО «Премииум Инжиниринг», 2007. – 316 с.
47. Бык, С.Ш. Газовые гидраты / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина // М.: Химия, 1980. – 296 с.
48. Дырдин, В. В. Влияние газогидратов на формирование выбросоопасных ситуаций в угольных пластах / В. В. Дырдин, С. А. Шепелева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал – № 6. – 2010. – С. 95 – 98.
49. Христианович, С. А. О волне дробления // Известия АН СССР, Отделение технических наук. - 1953. - №12. – С. 1689 – 1699.
50. Цыпкин, Г. Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. – М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2009. – 232 с.
51. Рогов, Е. И. Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной шахты / Е. И. Рогов, Г. И. Грицко, В. Н. Вылегжанин – Алма-Ата: Наука, 1979. - 240 с.

52. Веригин, Н. Н. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде / Н. Н.Веригин, И. Л.Хабибуллин, Г. А. Халиков // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. - 1980. - № 1. - С. 174–177.
53. Ким, Т.Л. Влияние твердых растворов природного газа на газодинамические процессы впереди забоя подготовительной выработки/ Т.Л.Ким, В.В.Дырдин, А.А. Мальшин, С.А. Шепелева //Вестник КузГТУ.- 2012.-№3.- С. 12-15.
54. Ким, Т. Л. Математическое моделирование процесса диссоциации кристаллогидрата в краевой зоне угольного пласта / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, В. А. Белков // Вестник КузГТУ - №2. – 2011. – С. 19 – 21.
55. Шепелева, С. А. Методика определения потенциально выбросоопасных зон, содержащих метан в виде твердых растворов // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 12. С. 54–56.
56. Максимов, А. М. Оценка возможности выбросов газа при разложении газовых гидратов в пласте / А. М. Максимов, В. С. Якушев, Е. М. Чувилин // Доклады Академии наук. – 1997. – том 352, № 4. – С. 532 – 534.
57. Барренблатт, Г. И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Барренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик // М.: Недра. – 1972 - 288 с.
- 58.Ким, Т. Л. Математическое моделирование загазирования выработок при диссоциации кристаллогидратов в угольных пластах / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин // Изв. вузов. Горный журнал. - 2011. - № 8. - С. 131–134.
59. Вылежгин, В. Н. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов / В. Н. Вылежгин, П. В. Егоров, В. И. Мурашев // АН СССР, Сиб. отд-ие, Ин-т угля. – Новосибирск: Наука. – 1990. - 291 с.
60. Дырдин, В. В. Оценка ударо- и выбросоопасности увлажненных зон угольных пластов / В. В. Дырдин, А. И. Шиканов, О. П. Егоров и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – 134 с.
61. Ким, Т. Л. Математическое моделирование процесса диссоциации кристаллогидрата в краевой зоне угольного пласта / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, В. А. Белков // Вестник КузГТУ. - 2011. – № 2. - С. 19 – 21.

62. Ким, Т. Л. Влияние твердых растворов природного газа на газодинамические процессы впереди забоя подготовительной выработки / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, А. А. Мальшин, С. А. Шепелева // Вестник КузГТУ. - 2012. - № 3. - С. 12 - 15.
63. Ким, Т. Л. Газовыделение в выработку с учетом изменяющейся проницаемости угольного пласта / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, С. А. Шепелева // Изв. Вуз. Горный журнал. - 2013. - № 2. - С. 128 - 130.
64. Ким, Т. Л. Образование твердых растворов природного газа в угольной матрице / Т. Л. Ким // Вестник КузГТУ. - 2013. - № 6. - С. 9 - 12.
65. Christophe Dicharry, Modeling Heating Curve for Gas Hydrate Dissociation in Porous Media / Christophe Dicharry, Pascal Gayet, Gerard Marion, Alain Graciaa and Anatoliy N. Nesterov // J. Phys. Chem. B 2005, 109, 17205-17211.
66. Lijun Yan, Experimental and Modeling Study on Hydrate Formation in Wet Activated Carbon / Lijun Yan, Guangjin Chen, Weixin Pang, and Jiang Liu // J. Phys. Chem. B 2005, 109, 6025-6030.
67. Макогон, Ю. Ф. Предупреждение образования гидратов при добыче и транспорте газа / Ю. Ф. Макогон, Г. А. Саркисянц – М.: Недра – 1966.
68. Якушев, В. С. Газовые гидраты в отложениях материков и островов / В. С. Якушев, Е. В. Перлова, Н. А. Махонина, Е. М. Чувилин, Е. В. Козлова // Российский химический журнал (Ж. Рос.хим. общества им. Д. И. Менделеева). – № 3. – т. XLVII – 2003 г. – С. 80 – 90.
69. Sloan, E. Dendy. Clathrate Hydrates of Natural Gases – 3rd ed. / E. Dendy Sloan, Carolyn A. Koh. p. cm. – Chemical industries series. CRC Press, 2008. – 731 p.
70. Мясников, А. А. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах / А. А. Мясников, В. П. Садохин, Т. С. Жирнова // М.: Недра, 1977. – 248 с.
71. Горбунов, В. А. Методы математической физики в задачах горного производства – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 408 с.

72. Ким, Т. Л. Математическое моделирование загазирования выработок при диссоциации кристаллогидратов в угольных пластах / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин // Изв. Вуз. Горный журнал. - 2011. - № 2. - С. 131 - 134.
73. Matthew, A. C. Measuring and modelling the rate of decomposition of gas hydrates formed from mixtures of methane and ethane [Text] / A. C. Matthew, P. R. Bishnoi // Chemical Engineering science. – 2001. – P. 4715 – 4724.
74. Masuda, Y. Modelling and Experimental Studies on Dissociation of Methane Gas Hydrates in Berea Sandstone Cores / Y. Masuda, Y. Fujinaga, S. Naganawa, K. Fujita and Y. Hayashi // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2001. – P. 144 – 147.
75. Правила безопасности в угольных шахтах: ПБ 05-618-03. Сер. 05. Вып. 11 / ответственные разработчики: А. И. Субботин [и др.]. М.: ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. - 296 с.
76. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00) – М., НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.
77. Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах. Сборник документов / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». М., 2004. – 204 с.
78. Открытия № 75 «Свойство природных газов находиться в твёрдом состоянии в земной коре».
79. Методика дифференцированного текущего прогноза опасности газодинамических явлений, выбора и контроля эффективности способов их предотвращения для условий восточных районов. Кемерово: ВостНИИ, 1979. – 16 с.
80. Пат. 2447289 Российская федерация. Способ определения выбросоопасных зон в угольных пластах [Текст] / Дырдин В. В., Шепелева С. А., Вершинин Д. С.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет"; заявл. 06.08.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 10 с. : 2 ил.

81. Пат. 2473809 Российская федерация. Способ прогноза выбросоопасности подготовительных выработок. [Текст] / Трубицын А. А., Ботвенко Д. В., Мурашев В. И.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ВостЭКО».

82. Малышев, Ю. Н. Методы прогноза и способы предотвращения выбросов газа, угля и пород / Ю. Н. Малышев, А. Т. Айруни, Ю. Л. Худин, М. И. Большинский // М.: Недра. – 1995. – 352 с.

83. Эттингер, И. П. Итоги работ по выявлению в угольных пластах зон, опасных по внезапным выбросам // Научные исследования в области борьбы с внезапными выбросами угля и газа. – М.: Углетехиздат, 1959. С. 289 – 307.

84. Тарасов, Б. Г. Определение потенциально выбросоопасных участков впереди подготовительных выработок по электрическим параметрам среды и естественного геоэлектрического поля / Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. И. Мурашев, В. В. Иванов, Г. В. Кроль / Подземная разработка мощных угольных пластов. – Сб. научн. тр./Кузбасск. политехн. ин-т. Вып. 2. – Кемерово. - 1974.

85. Алесеев, А. Д. Применение методов комбинационного рассеяния и ядерного магнитного резонанса для исследования генезиса структуры углеродных наноматериалов природного происхождения / А. Д. Алесеев, Е. В. Ульянова, В. В. Трачевский, Л. И. Ивашук, С. В. Зимина // Физика и техника высоких давлений. – 2010. Т. 20. -- № 3. – С.126-138.

86. Макогон, Ю. Ф. Внезапные выбросы и участие в них метана в гидратном состоянии / Ю. Ф. Макогон, Морозов И. Ф. // Безопасность труда в промышленности. - № 12. – 1973 г. – С. 36 – 37.

87. Нефедьев, Ю. Ф. Результаты замеров давления газа в угольных пластах Кузбасса / Ю. Ф. Нефедьев, А. К. Иванов // - Вопросы безопасности в угольных шахтах. Труды ВостНИИ, том V, М.: Недра, 1964. – С. 23 – 33.

88. Мурашев В. И. Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа.- М.: Недра, 1978.-С. 140-161.
89. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). – М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2011. – С. 120-303
90. Мурашев, В. И. О механизме внезапного выброса угля и газа в подготовительных выработках / В. И. Мурашев, Я. Г. Шлиомовичу, В. Л. Бульбенко, В. А. Матвейчук // Борьба с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах: Тр. ВостНИИ, Т. 20. – Кемерово, 1973. С. 126 – 140.
91. Бирюков, Ю. М. Проблемы техногенных газодинамических явлений / Ю. М. Бирюков, А. А. Пименов, Р. Р. Ходжаев // Калининград, КГТУ, 2005. - 200 с.
92. Дрындин, В. А. Экспериментальные исследования геофизических параметров и микроструктуры угля выбросоопасных зон угольных пластов / В. А. Дрындин, Михина Т. В., Митрофанов Д. В. // Горн.информ.аналит.бюллетень. - М.: МГГУ. – N 7. – 2000. – С.210-211.
93. Ким, Т. Л.Изучение физических свойств системы «угольная матрица – поровая влага» / Т. Л. Ким, С.А. Шепелева, Ю. В. Ваганова, А. Б. Степюк, А. Д. Соловьев // Сб. докл. студентов, аспирантов и профессорско - преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 24-27 апреля 2012 г. / Редкол.: В. Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово: КузГТУ. – Т. 1. – 2012. – С. 49–52.
94. Шепелева С. А., Дырдин В. В. Анализ газовыделений при внезапных выбросах угля и газа / Метан: сборник научных трудов по материалам симпозиума «неделя горняка-2009». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала)

MiningInformationalandanalyticalbulletin (scientificandTechnicaljournal) – 2009. - № 0В 11. – 432 с. – М.: издательство «Горная книга».

95. Мурашев, В. И. Методическое руководство по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, при проведении подготовительных выработок с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов» /В. И. Мурашев, Т. Л. Ким, В. В. Дырдин//КузГТУ. – Кемерово, 2014 . - 19с.

96. Ким, Т. Л. Определение границ зон твердых растворов природного газа в угольной матрице геофизическими методами / Т. Л. Ким, С. А. Шепелева, А. А. Кабирова, Т. В. Жукова // Сб. докл. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 16-19 апреля 2013 г. / Редкол.: В. Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово: КузГТУ. – Т. 1. – 2013. – С. 52–54.

97. Гройсман, А. Г. Теплофизические свойства газовых гидратов / А.Г. Гройсман. - Новосибирск: Наука. 1985.

98. Зыков, В.С. Временная методика автоматизированного текущего прогноза выбросоопасности при проведении нисходящих подготовительных выработок на крутых пластах / В.С. Зыков, В.С. Черкасов, В.А. Рудаков и др. // Кемерово: ВостНИИ. - 1997. – 10 с.

99. Захаров, В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. М.: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. -172 с.

100. Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Яновская М.Ф.. Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. - М.: Наука, 1979. 195 с.

101. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612640. Расчет показателя выбросоопасности при подземной разработке угольных пластов. Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2014 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Форм: № 01 ИЗ-2011

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 123995. Телефон (8-499) 240- 60- 15. Факс (8-495) 531- 63- 18

На № от

Наш № 2013134695/03(051914)

*При переписке просим ссылаться на номер заявки и
сообщить дату получения настоящей корреспонденции
от 02.06.2014*КузГТУ, отдел управления
интеллектуальными ресурсами
ул. Весенняя, 28
г. Кемерово
650000

РЕШЕНИЕ

о выдаче патента на изобретение

(21) Заявка № 2013134695/03(051914)

(22) Дата подачи заявки 23.07.2013

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что

☒ заявленное изобретение☐ заявленная группа изобретенийотносится к объектам патентных прав и соответствует условиям патентоспособности,
предусмотренным Гражданским кодексом Российской Федерации, в связи с чем
принято решение о выдаче патента на изобретение.

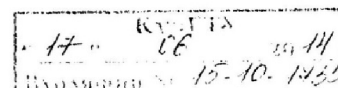
Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 5 л. в 1 экз.

Руководитель



Б.П.Симонов



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Федерального государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Согласовано:
Генеральный директор
ОАО НЦ «ВостНИИ»



В. П. Баскаков

« 14 » 02 2014

Утверждаю:
Проректор по научно-
инновационной работе КузГТУ



В. Ю. Блюменштейн

« 18 » 02 2014

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамиче-
ским явлениям, при проведении подготовительных выра-
боток с учетом твердых растворов природного газа по ти-
пу газогидратов

Кемерово 2014

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014612640

**Расчет показателя выбросоопасности при подземной
разработке угольных пластов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Авторы: *Шепелева Софья Алексеевна (RU), Дырдин Валерий
Васильевич (RU), Ким Татьяна Леонидовна (RU)*

Заявка № 2014610127

Дата поступления 10 января 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Шахта «Первомайская»

ОАО «Угольная компания «Северный Кузбасс»
Шахта «Первомайская»
юридический адрес:
652427, Россия, Кемеровская область,
г. Березовский, ул. Матросова, 1
адрес для корреспонденции:
652432, Россия, Кемеровская область,
Кемеровский район, пос. Разведчик,
ул. Шахтовая, 1
тел: +7 (384-45) 4-14-50; 4-16-00
факс: +7 (384-45) 4-14-50
e-mail: mine_pervom@mail.ru
http://www.kuzcoal.ru

№ _____
на № _____ от _____



Утверждаю:
Главный инженер
шахты «Первомайская»
В.В. Горелов
2013 г.

АКТ

использования разработанной в диссертационной работе КИМ ТАТЬЯНЫ ЛЕОНИДОВНЫ методики по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, при проведении подготовительных выработок с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов на ОАО «Шахта Первомайская»

Настоящим актом подтверждается, что мероприятия по прогнозу газодинамических явлений на шахте «Первомайская», XXIV пласта, проводились с применением методических рекомендаций, изложенных в диссертационной работе Т. Л. Ким.

Основные положения разработанной методики изложены в методическом документе «Методическое руководство по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, при проведении подготовительных выработок с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов» / КузГТУ. – Кемерово, 2013. – 16с.

Методическое руководство разработано КузГТУ совместно с ОАО «НЦ ВостНИИ» и институтом угля СО РАН.

В 2013 году проведены исследования на шахте Первомайская по пласту XXIV, при прогнозе зон, опасных по газодинамическим явлениям с применением «Методического руководства по прогнозу зон, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, при проведении подготовительных выработок с учетом твердых растворов природного газа по типу газогидратов». Это позволило разработать ряд дополнительных мероприятий по предотвращению загазирования подготовительных выработок.

Таким образом, внедрение научных разработок Т. Л. Ким в практику проходки подготовительных выработок по угольным пластам угрожаям и опасным по внезапным выбросам угля и газа, позволило обеспечить повышение безопасности горных работ путем учета дополнительного объема газа, возникающего при диссоциации твердого раствора природного газа по типу газогидратов в краевой зоне угольного пласта.

Начальник участка № 5

И. С. Мифодьев