

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»**

На правах рукописи

**ФАН ТУАН АНЬ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО  
ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДЗЕМНОГО ГИДРОРАЗРЫВА**

Специальность: 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины» (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                     | 4  |
| ГЛАВА 1. Состояние проблемы высокопроизводительной подземной разработки газоносных угольных пластов .....                         | 10 |
| 1.1 Анализ опыта дегазации разрабатываемых угольных пластов.....                                                                  | 10 |
| 1.2 Анализ мирового опыта высокопроизводительной разработки газоносных угольных пластов .....                                     | 15 |
| 1.3 Состояние проблемы категорирования угольных шахт.....                                                                         | 25 |
| 1.4 Особенности трещинообразования при гидродинамическом воздействии..                                                            | 31 |
| 1.5 Цель и основные задачи исследований.....                                                                                      | 38 |
| ГЛАВА 2. Аналитические исследования процессов гидродинамического воздействия и метановыделения в горные выработки и скважины..... | 41 |
| 2.1 Моделирование процесса гидроразрыва из подземных скважин .....                                                                | 41 |
| 2.2 Дегазация угольного пласта в пространстве между вентиляционным и откаточным штреками .....                                    | 57 |
| 2.3 Численное моделирование процесса пластовой дегазации угольного пласта группой скважин с учетом сорбции .....                  | 61 |
| 2.4 Анализ факторов, определяющих метановыделение разрабатываемого пласта и допустимую нагрузку на очистной забой.....            | 70 |
| 2.5 Выводы по главе 2.....                                                                                                        | 73 |
| ГЛАВА 3. Исследование перспективных проблем разработки угольных пластов на шахтах Куангниньского угольного бассейна СРВ .....     | 75 |
| 3.1 Оценка метаноопасности шахт .....                                                                                             | 75 |
| 3.2 Исследование метаноносности и относительной метанообильности угольных пластов на шахте Мао Хе .....                           | 77 |
| 3.3. Оценка влияния вентиляции на метанообильность добычного участка..                                                            | 83 |
| 3.4. Опасность газодинамических явлений .....                                                                                     | 86 |
| 3.5. Анализ влияния газового состояния и коллекторских характеристик на газовыделение из разрабатываемого пласта.....             | 90 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4 Выводы по главе 3.....                                                                                                          | 104 |
| ГЛАВА 4. Обоснование направлений совершенствования дегазации выемочных участков.....                                                | 106 |
| 4.1 Разработка предложений по использованию вязко-пластичных наполнителей для повышения эффективности дегазации угольных пластах .. | 106 |
| 4.2 Предложения по совершенствованию технологии гидровоздействия с использованием эффекта набухания углей .....                     | 111 |
| 4.3 Предложения по совершенствованию дегазации на шахтах СРВ .....                                                                  | 113 |
| 4.5 Вывод по главе 4 .....                                                                                                          | 117 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                    | 118 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                               | 120 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

Проблема управления газовыделением и предотвращения газодинамических явлений, несмотря на многолетние исследования в этой области горной науки, является очень актуальной для многих горнодобывающих стран. Интенсификация угледобычи привела к необходимости использования дегазации не только на высокогазообильных шахтах, но и при высоких нагрузках на очистные забои.

Следует отметить, что проблемы газовыделения и газодинамических явлений являются взаимосвязанными, при увеличении темпов ведения горных работ не только увеличивается газообильность горных выработок, но и возрастает опасность газодинамических явлений. Одним из основных направлений борьбы с этими негативными факторами является гидрообработка угольных пластов, которая не только снижает газовыделение, но и изменяет физико-механические свойства угольного пласта.

С середины прошлого века активно разрабатываются способы дегазации угольных пластов и их спутников скважинами, а также способы использования извлечённого из угольных пластов метана. В этих направлениях активно работали В.В. Ходот, И.М. Печук, А.А. Мясников, Г.Д. Лидин. И.Л. Эттингер разрабатывал методы выявления в угольных пластах зон, опасных по внезапным выбросам. Делались первые шаги в проведении гидравлического воздействия на пласты как через скважины, пробуренные с поверхности, так и из подземных горных выработок. Первое направление активно развивалось специалистами Московского горного института под руководством и с участием Ножкина Н.В., Ярунина С.А., Васючкова Ю.Ф., Шарипова Н.Х., Громова В.А., Сластунова С.В. и многих других. Натурные исследования и внедрение технологии осуществлялось на шахтах Донецкого и Карагандинского бассейнов с участием специалистов МакНИИ и КНИУИ. В определённых горно-геологических условиях способ показал высокую технико-экономическую эффективность.

Вопросы совершенствования дегазации разрабатываемых угольных пластов рассмотрены в работах А.Т. Айруни, И.В. Сергеева, В.С. Забурдяева, Е.И. Преображенской, В.А. Садчикова, С.К. Баймухаметова, Г.Н. Фейта, О.Н. Малинниковой и многих других. В 70-е – 80-е годы большой объем исследований был посвящен совершенствованию технологии подземного гидроразрыва, который достаточно широко применялся на шахтах большинства угольных бассейнов страны. Однако в процессе и после реструктуризации угольной отрасли применение способов, связанных с искусственным повышением проницаемости угольных пластов практически прекратилось и стало применяться вновь только после 2010г.

Эти проблемы характерны и для угольной отрасли Вьетнама, добыча которой в настоящее время превышает 50 млн.т в год и должна в следующем году составить около 53 млн.т. Во Вьетнаме данное направление исследований развивали Динь Хунг, Чан Суан Ха, Ле Ван Тхао, Фам Дик Тханг, однако в связи с более благоприятными горно-геологическими условиями он менее проработан и для решения задач представленной проблемы необходимо изучение опыта угольной отрасли Российской Федерации.

### **Степень разработанности направления**

Ранее выполненными исследованиями установлено, что увлажнение угольного пласта, приводящее к изменению его коллекторских и физико-механических свойств можно применять как для предотвращения газодинамических явлений, так и для предотвращения загазирования горных выработок при проведении их на пластах с высокой газоносностью. Имеется положительный опыт низконапорного увлажнения и для снижения запыленности выработок и обеспечения пылевзрывозащиты. В зависимости от режимов и параметров нагнетания изменяются свойства и состояние массива. Достаточно широко в последнее время на шахтах для интенсификации газовыделения в дегазационные скважины применяется подземный гидроразрыв. Настоящая работа посвящена исследованию процесса

гидровоздействия на угольный пласт для совершенствования технологии гидродинамической обработки неразгруженных угольных пластов.

### **Цель работы**

Совершенствование технологии гидроразрыва разрабатываемого угольного пласта для снижения газоносности угля и изменения напряженного состояния для предотвращения газодинамических явлений и загазирования горных выработок.

Идея работы заключается в учете физико-механических особенностей процесса гидродинамического воздействия и применении вязких рабочих жидкостей для обеспечения раскрытия вторичных систем трещин при проведении подземного гидроразрыва.

### **Задачи исследования**

- анализ опыта гидродинамического воздействия и обоснование направлений совершенствования технологии гидрообработки;
- уточнение зависимостей газоносности угольных пластов шахты Мао Хе для оценки опасности динамических явлений и уточнения области применения дегазации с интенсификацией газовыделения;
- обоснование требований к рабочим жидкостям, используемых для подземного гидроразрыва;
- моделирование процесса гидроразрыва для обоснования параметров и режимов гидрообработки;
- установление зависимостей деформаций угольного пласта при гидровоздействии для обоснования параметров технологии подземного гидроразрыва с использованием эффекта набухания угольного пласта;
- разработка методических положений и параметров, определяющих область применения способа гидрообработки, направленного на снижение газоносности и опасности газодинамических явлений и загазирования.

**Научная новизна** состоит в научном обосновании предложений по предотвращению газодинамических явлений и загазирования горных выработок

на основе применения низконапорного увлажнения угольного пласта, разработке методики определения параметров технологии гидродинамического воздействия с использованием вязких рабочих жидкостей для раскрытия вторичной трещиноватости угольного пласта.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Обоснованы параметры и режимы гидродинамического воздействия на разрабатываемый угольный пласт для повышения эффективности его дегазации и снижения концентрации напряжений в массиве. Разработана методика определения параметров технологии гидродинамического воздействия с использованием вязких рабочих жидкостей для обеспечения раскрытия вторичных систем трещин при проведении подземного гидроразрыва.

### **Методология и методы исследования**

В основу исследований положен комплекс следующих методов: изучение состояния вопроса по теме работы, анализ научных публикаций, теоретические исследования способов изменения газодиффузионных и газокинетических свойств угольных пластов, моделирование процесса гидродинамического воздействия, экспериментальные исследования и научное обобщение их результатов.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

- повышение эффективности гидродинамического воздействия обеспечивается использованием технологии поэтапной гидрообработки, при которой используется эффект набухания угольного пласта или обеспечиваются условия для раскрытия вторичной системы трещин за счет применения вязких рабочих жидкостей, что приводит к снижению потерь на фильтрацию в стенки раскрываемых трещин;

- основными критериями, определяющими необходимость применения дегазации с использованием интенсификации газовыделения, являются: газоносность угольного пласта; уровень планируемой нагрузки на очистной

забой, а также эффективность естественной дегазации участка подготовительными выработками;

- параметры гидрообработки определяются на основе моделирования процесса гидровоздействия с учетом необходимости раскрытия вторичной системы трещин в угольном пласте при условии закачки минимального количества рабочей жидкости.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:**

- большим объемом экспериментальных исследований при оценке газовыделения в скважины;
- применением в экспериментах хорошо зарекомендовавших методов и методик оценки газообильности горных выработок, позволяющих получать достоверные результаты;
- корректным применением уравнений математической физики, геомеханики и аэрогазодинамики для определения основных параметров гидродинамического воздействия на угольный пласт.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, в том числе: на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка», НИТУ «МИСиС», 2018; заседаниях кафедры «Безопасность и экология горного производства» НИТУ «МИСиС», 2019, 2021.

#### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ, в том числе 4 научных статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 1 тезисы доклада в сборнике научной конференции.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация содержит перечень сокращений, введение, 4 глав, заключения, список публикаций и список литературы. Работа изложена на 136 страницах

машинописного текста, содержит 40 рисунков, 11 таблиц. Список литературы включает 140 наименований.

## **ГЛАВА 1. Состояние проблемы высокопроизводительной подземной разработки газоносных угольных пластов**

### **1.1 Анализ опыта дегазации разрабатываемых угольных пластов**

Эффективность добычи в угольной промышленности сдерживается рядом факторов горно-геологического характера. К таким сложностям следует отнести следующие: высокая газоносность угольных пластов, что ведет к возникновению взрывоопасных ситуаций, неустойчивые породы кровли, что может послужить причиной обвалов, газодинамические явления к которым склонны газоносные угольные пласты, а также самовозгорание угля.

Ввиду того, что большинство разрабатываемых угольных пластов имеют весьма высокую газоносность (более  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ ), повышается взрывоопасность добычи, возникает необходимость проведения работ по дегазации разрабатываемых пластов. Дегазация в этом случае может носить характер текущей или заблаговременной [1,2,3].

К шахтам, отрабатывающим пласты с содержанием метана более  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , относятся 34 шахты расположенные на территории Кузбасса, при этом в случае высоких нагрузок их газообильность может превышать  $100 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Также в Северных регионах России расположены шахты с высоким уровнем газонасыщенности пластов метаном [4]. На территории Восточного Донбасса расположены в основном негазовые шахты [5].

Рыночная политика в отношении стоимости угля позволяет считать уровень добычи в  $3,5 \div 5$  тыс. т/сутки (в зависимости от марки угля) рентабельным. Высокая производительность шахты обеспечивается использованием современных технологий и оборудования. Однако при этом немаловажным является предварительная подготовка шахты, в частности проведение дегазации, которая обусловлена высокой газонасыщенностью угольных пластов [6,7,8].

Снизить газоносность угольных пластов можно посредством предварительной или заблаговременной дегазации. В [9,10] представлены рекомендации и опыт по эффективной дегазации. Блочность массива, макро- и

микрослоистость, кливаж, трещиноватость, те особенности пластов, которые должны быть учтены при дегазации.

Исследование эффективности дегазации за счет бурения перекрещивающихся скважин показана в работах [11,12], такой подход повышает эффективность дегазации. Использование перекрещивающихся скважины способствуют пересечению их с природными системами трещин. При данном способе происходит разгрузка угольного массива расположенного рядом полостями скважин, там где скважины пересекаясь, образуют узлы. В узлах идет формирование двух совершенно новых систем вертикальных пересекающихся трещин. Горное давление оказывает дополнительное воздействие, тем самым способствует дополнительному развитию трещин, что в свою очередь повышает эффективность дегазации.

Схема с перекрещивающимися скважинами применяется, если эффективность дегазации угольного пласта должна быть не менее 0,2. Диаметр скважин в основном составляет 76 мм. Угол разворота скважин составляет от 50-85°, глубина бурения 300м и более. Время дегазации при данной схеме в соответствии с требованиями нормативных документов составляет не менее 6 месяцев.

Относительная эффективность способа определяется по суммарному извлечению метана с учетом природной газоносности угольных пластов. Сложность интерпретации газовыделений при добыче, вызвана отсутствием точных данных о дебитах метана из отдельно взятой скважины [13].

Существует вариант параллельного бурения при этом диаметр скважин 90-160 мм, расположены они параллельно линии очистного забоя [14,15,16,17]. Расстояние между скважинами доходит до 15 метров. Если пласт подвергается предварительному гидравлическому разрыву, то расстояние между скважинами может быть увеличено до 60 метров. Гидравлическая обработка производится при давлении жидкости 10-15 МПа, темп подачи воды до 1,5 л/с, объем закачки 5-60 м<sup>3</sup>. Гидрообработка обеспечивает раскрытие и разветвление трещин,

которые были заложены природой. После откачки воды, трещины имеют связь со скважиной и поэтому эффективно дегазируют пласт.

В последнее время для обеспечения безопасности по газовому фактору при извлечении метана, пытаются обеспечить его переработку, так как его сжигание или попадание в атмосферу может нанести дополнительный экологический вред. Поэтому при дегазации, метановоздушные смеси пытаются извлечь и/или использовать, как правило, для получения энергии [18,19,20].

Таким образом, высокую газоносность пластов можно использовать с дополнительной выгодой. Метановоздушные смеси можно отводить с использованием дополнительных трубопроводов, которые позволяют миновать шахту. США и Австралии являются яркими представителями данного подхода [21], в то же время Китай, в последние годы, проявляет интерес к переработке данного вида сырья. В том числе и Россия реализовала в рамках Киотского протокола проект на шахте Кузбасса (шахта имени С.М. Кирова). Здесь построена первая тепловая электростанция с производительность электроэнергии  $2 \times 1,4$  МВт, производительность тепловой энергии 2,2 МВт.

Перспективной схемой дегазации является бурение скважин во вмещающие породы и пласты-спутники при котором по оконтуривающим выемочное поле выработкам располагаются скважины, пробуренные на разгруженный массив. Опыт таких стран как Австралия, США, Китай и Индия показывает, что длинные скважины направленного бурения могут быть использованы и для снижения газоносности угольных пластов [22].

Постепенное переоснащение буровой техники на шахтах, для бурения длинных и криволинейных скважин приведет к повсеместному распространению описанной выше технологии дегазации. На АО «СУЭК-Кузбасс», Valley Longwall Drilling (VLD 1000A, Австралия) уже введены подобные технологические решения [23]. Эти технологии используются в условиях, когда сам разрабатываемый пласт является важным источником метана, а сложные горно-геологические условия утяжеляют добычу. Эффективную и безопасную

добычу угля можно обеспечить только комплексным применением способов дегазации. Технологии извлечения метана делят на две группы:

- дегазация угольного пласта обеспечивается самими геологическими условиями местности;
- используя гидравлическое, тепловое или иное воздействие на угольный пласт осуществляется интенсификация газовыделения при дегазации.

Перед разработкой месторождения, дегазация является обязательной предварительной операцией [24]. Все правила по обеспечению безопасной работы при добыче угля специально завышены. Дополнительный запас надежности, или в данном случае безопасности, должен позволить снизить потенциально возникающие риски, сформулированные при этом требования к допустимой концентрации  $\text{CH}_4$  в угледобывающих странах различны. В таблице 1.1 [25] представлены допустимые концентрации метана. Наибольший допуск составляет 2,0%, в Австралии, Великобритании, США.

Но такая величина применима в отсутствии электропитания. Для сравнения в России не допускают превышение концентрации метана более 1%. Все это требует высокого и надежного уровня автоматического контроля атмосферы, наличие автоматических блокировок при превышении заданной концентрации метана. В отдельных случаях допускается концентрация метана до 1,3%, при разрешении местного органа Ростехнадзора. Это справедливо только при применении дополнительных мер по обеспечению безопасной работы. Снижение значения допустимой концентрации метана при добыче угля, непосредственно влияет на себестоимость добываемого сырья.

Таблица 1.1 – Нормы безопасности на максимально допустимые концентрации  $\text{CH}_4$

| Предельные значения<br>опасных концентраций<br>Метана, %                                                                                        | Австралия | Китай | Германия | Индия | Южная<br>Африка | Соединенное<br>Королевство | США | Россия |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|----------|-------|-----------------|----------------------------|-----|--------|
| Максимальные значения,<br>ниже которых разрешается<br>проведение работ в шахте в<br>целом                                                       | 1,25      | 1,0   | 1,0      | 1,25  | 1,4             | 1,25                       | 1,0 | 0,75   |
| Максимальные значения<br>концентрации метана с<br>исходящей струе воздуха,<br>ниже которых разрешается<br>проведение работ в<br>очистных забоях | 2,0       | 1,5   | 1,5      | 0,75  | 1,4             | 2,0                        | 2,0 | 1,0    |

Это в свою очередь мотивирует на создание новых, более эффективных способов дегазации, которые смогут повысить значение предельно допустимой концентрации, тем самым позволил снизить себестоимость.

В России при добыче угля за сутки 5,0 тыс. тонн лавы относят к высокопроизводительным и экономически эффективным [26, 27]. Накопленный опыт угледобычи в России обеспечивает в отдельных случаях добычу более 10 тыс. тонн в сутки. На некоторых шахтах Кузбасса передовые очистные комплексы достигли добычи 20 тыс. тонн и более. Сдерживающим фактором является отсутствие нормативной документации на добычу в таких объемах и повышение газообильности добычи. Таким образом, дальнейшее повышение добычи угля требует разработку новых и совершенствование существующих методов дегазации [28,29,30]. Данная наукоемкая проблема, может быть решена с применением последних научных разработок, создания новых подходов, выдвижения гипотез и опробования их на практике с последующим анализом полученных данных.

## **1.2 Анализ мирового опыта высокопроизводительной разработки газоносных угольных пластов**

Сегодня при разработке угольных месторождений используют две системы [31]:

- камерно-столбовая;
- длинными очистными забоями.

Первая система применяется в Южно-Африканской Республике (80%)[32], Соединенные Штаты Америки(50%) [33] и Австралия (10-15%)[34]. В Соединенных Штатах Америки для этой систем создано специальное оборудование, оно включает выемочные комбайны, средства транспорта и анкерное крепление. Система автоматизирована и не требует постоянного присутствия человека, основное преимущество этих систем в их финансовой доступности, согласно источникам [35,36]. Для камерно-столбовой системы используется самоходная установка, параллельно идет нагнетание воздуха и отсос пыли, длина камер составляет 100-150 м, ширина до от 5-10 м. По мере подвигания забоя идет формирование объемной геометрической структуры, которая состоит из системы камер и столбов. Недостатком используемой системы является изменение гидрогеологического режима подземных вод. Данный недостаток системный и в принципе справедлив и для других систем добычи. В среднем эта система обеспечивает добычу угля -2000 тонн/сут. Для поддержания пород в выработанном пространстве используют анкерное крепление. Дегазация при данном типе добычи обеспечивается массопереносом метана в направлении свободных поверхностей. Не нарушать предельно допустимую концентрацию метана можно, регулируя вентиляционный поток (изменяя его скорость) при условии прямоточной схемы проветривания. Важной экономической составляющей при использовании камерных систем является снижение затрат на проведение подготовительных выработок.

При использовании камерных систем для транспортировки добытого сырья используется подземный транспорт, в том числе на колесном ходу. Однако

данная система не лишена и недостатков, так например возможны высокие потери угля(25-35%), недостаточная устойчивость пород кровли, а также глубина самой разработки. В процессе выработки идет изменение аэродинамической структура пространства это в свою очередь ведет к усложнению проветривания и увеличению нагрузки на вентиляцию. Если идет добыча самовозгорающихся углей, применение камерно-столбовой системы не безопасно. Если применять закладку выработанного пространства, то данный недостаток можно устранить, но это повысит конечную себестоимость угля. Данная технология применяется там, где традиционные способы не применимы - шахтные поля. К таким местам относят охранные целики, те места, где требуется сохранение земной поверхности в процессе извлечения ископаемых. Камерная система добычи не обеспечивает высокую производительность, также важным фактором является рентабельность данного способа. Повысить рентабельность можно путем увеличения количества забоев, но это также ведет к увеличению затрат на оборудование. Таким образом, данный способ имеет свои преимущества и недостатки, рентабельность применения данного способа определяется локальными условиями добычи. Принятие решения о технологии выемки угля, зависит от соотношения степени рисков и затрат. При принятии решения, необходимо оценивать риск определяемый из ряда факторов (географические, политические, экономические).

Использование второго способа (длинные очистные забои) обеспечивает повышение нагрузки на очистные забои. Длинные очистные забои делятся на:

- комбайновые [37];
- струговые [38].

Ранее и ту и другую технологию применяли в одинаковой степени, однако сегодня лидирует комбайновая технология выемки. Она позволяет применять мощное комбайновое оборудование, которое в свою очередь захватывает значительные объемы сырья. Конечно, основным критерием выбора между комбайновой выемкой, или струговой выемкой является экономический фактор,

но также важными являются геологические факторы в частности воздействие напряжений в тектонических плитах, вызванных движением земной коры [39]. Результаты землетрясений отражаются не только на глубоких геологических разломах [40], они приводят к возникновению сдвиговых и растягивающих напряжений, что может приводить к разрушению пород. В этих случаях является важным то, что если очистной забой параллелен основным растягивающим напряжениям, которые приводят к увеличению проницаемости пласта и, как следствие, повышению газовыделения в лаву. В обратной ситуации, при наличии сжимающих напряжений, проницаемость угля снижается, и притоки метана уменьшаются. Потенциальная энергия метана ввиду наличия напряжений не растрочена, что ведет к выбросу угля и газа. В этой связи понимание тектоники местности позволяет использовать данное естественное явление для дегазации участков забоя. Столбовая технология добычи угля получила наибольшее распространение на территории России. Ярким примером использования данной технологии является Печорский угольный бассейн. Главной положительной стороной технологии является полная выработка природных ресурсов. Из минусов данной технологии это обрушение пород в месте где была произведена выработка угля, просадка поверхности Земли расположенной на выработке, что требует обособленности шахтного поля, во избежание несчастных случаев. Как отмечено выше, возможны обвалы в том месте, где прошла выработка, это же приводит к еще одному недостатку, необходимости сопряжения выработки с уже выработанным пространством. Решение такой технологической задачи может обеспечиваться использованием анкерного крепления кровли выработанного пространства [41, 42]. Сложность проветривания такой системы является основным недостатком на пути безопасной добычи.

Явными преимуществами обладает система с длинными лавами, так как позволяет увеличить производительность посредством сокращения концевых операций комбайна. При отработке с газоносных пластов одной из основных

проблем, является выделение метана поэтому на всей протяженности лавы должно быть обеспечено эффективное проветривание. «Талдинская-Западная 1» одна из самых длинных лав в России, длина составляет 300 м действует и содержит 175 секций крепи DBT. Увеличение лавы до 350 м не является экономически целесообразным в газоносных пластах, по мнению ведущих аналитиков, так как это повлечет снижение нагрузки на очистной забой. Высокую безопасность при выемке угля обеспечивает многоштрековая система, она обеспечивает высокую производительность. Данная система хорошо зарекомендовала себя в США, где она широко применяется. Однако главным отличием от камерной системы является увеличение длины лавы до 300 м и более [43].

Многоштрековая система позволяет решить проблемы обеспечения воздухом и эффективно использовать высокопроизводительную добывающую техники. При такой технологии отказываются от традиционного использования ленточных целиков и применяют новый подход, основанный на использовании податливых целиков-колонн. Ширина прямоугольных целиков равна 25-30 м при трехштрековой и четырехштрековой подготовке. Целики конструируются специальным образом, чтобы под действием давления горной породы они самопроизвольно разрушались. Так как постепенно может происходить накопление потенциальной энергии геомеханических деформаций, которые ведут к горному удару, то необходимо данную энергию распределить или погасить полностью, с чем и справляются специально сконструированные целики-колонны. При разработке газоносных слоёв важно обеспечить качественное проветривание забоев, что во многом определяется устойчивостью подготовительных выработок, это является основными достоинствами данной технологии. Значительным недостатком данной технологии является большой объем первоначальных работ, что решается переходом от четырехштрековой к трехштрековой системе разработки, в частности такое справедливо для США[44].

24 % забоев на шахтах Кузнецкого бассейна работают по бесцеликовой технологии. При подготовке выемочного участка, чаще стали использовать двух- и даже трехштрековую подготовку с оставлением целиков. На шахте им. С.М. Кирова (АО «СУЭК-Кузбасс») используется именно такая технология - с оставлением целиков [45]. Данная технология обладает рядом преимуществ, во-первых, снижается просадка земной поверхности, во-вторых, обеспечивается в зоне очистных работ стараются обеспечить сопряжение забоев, что ведет к уменьшению опорного горного давления. Если рассматривать с точки зрения газового фактора, сплошная система имеет меньше преимуществ, чем целиковая. Перераспределение горного давления на барьерные целики ведет к снижению сдвиговых напряжений, ответственных за повышение газовой проницаемости угля и вмещающих пород. Одной из самых распространенных является система разработки длинными столбами, при этом в последние годы наблюдается значительный рост длины лавы (до 400 м) Столбы следуют друг за другом по мере отработки каждого из них, последовательно. Идет постепенное сокращение выемочного столба по мере его выработки. При прямоточном проветривании необходимо поддерживать часть вентиляционной выработки в выработанном состоянии. Подготовительные работы проводят заранее, это позволяет получить дополнительную информацию геологического характера в пределах выемочного столба и создаёт возможность для дегазации и осушения пласта. Ввиду высокой опасность взрыва, важным на этом этапе является дегазация данного пласта. Газопроницаемость можно повысить, применяя различные виды воздействия на угольные пласты. Если подготовительная операция по дегазации не будет проведена, то это приведет к опасной загазованности очистного забоя и, как следствие, ограничит нагрузку на очистной забой

Анкеры выступают в роли шпилек и прижимают стальные подхваты к кровле, также держат сетку и проволочные канаты.

Суммируя описанные технологии, следует руководствоваться взвешенностью решению при использовании той или иной технологии. Выбор

должен обосновываться на природных и техногенных факторах. Большое количество возможностей открывается при использовании системного подхода в решении данных проблем на стадии проектирования отработки запасов угля.

В высокопроизводительных забоях (нагрузка более 5 тыс. т/сут) в основном используются современные зарубежные очистные комплексы, такие как «JOY», «DBT», «FAZOS», «GLINIK», «Longwall». При этом стоит отметить, что отечественное оборудование не соответствует по качеству и исполнению мировому уровню и, следовательно, не обеспечивает высокой производительности. Зарубежные аналоги по коэффициенту машинного времени на 40% эффективнее российских. Такие фирмы как «Джой Майнинг Машинери - JOY» и «Дойче Бергбау Техник - DBT» обладают высокой эффективностью добычи. На первоначальном этапе требуются большие затраты для оснащения лав этими типами оборудования. Оборудование обладает высокой дороговизной, одно только оборудование с комплектацией «Джой» достигает 25 млн. долларов это в 3 дорожке отечественной комплектации. Оборудование хоть и дорогое, но очень быстро окупается. При использовании оборудования «Джой» многие добытчики предпочитают иметь один очистной забой с производительностью 6 тыс. т/сут, чем три с нагрузкой 2 тыс. т/сут, т.к. при этом одновременно снижается фронт подготовительных работ. Схемы поддержания нормального газового режима подбираются из необходимости организации высокопроизводительной техники разработки угольных пластов. Использование мощной горной техники на этапе очистных и подготовительных работ возможно при снижении газоносности угольных пластов, в частности возможно применение столбовой системы разработки. Сегодня существует техника и технологические схемы, обеспечивающие нагрузку на забой более 10 тыс. т/сут, однако возможность повсеместного применения такой высокопроизводительной технологии, или увеличение объемов добычи сдерживается требованиями безопасности по газовому фактору [46,47,48].

Высокопроизводительные комбайны позволяют одностороннюю или двустороннюю выемки сырья. Обратное направление нужно для зачистки забоя, а в первом комбайн отбивает уголь в одном направлении. Во время зачистки уголь частично дегазируется, что важно при разработке высокогазоносных пластов. В конце лавы ставились две зарубки, а выемка угля осуществляется в обоих направлениях. При односторонней выемки высокая длительность естественной дегазации. В данном случае обеспечивает большую производительность. На сегодняшний день нет однозначного мнения по поводу притоков метана в исходящую струю, что может являться предметом новых исследований.

При отработки верхней части угольного пласта проводят отбивку половины забоя. Комбайн захватывает половину отбитого угля с помощью шнека, при этом когда комбайн движется в обратную сторону он снимает нижнюю часть добываемого угля с помощью другого шнека. Таким образом, эффективность работы комбайна повышается, он вынимает уголь при движении в двух направлениях, а саму добычу в этом случае начинают с середины чтобы была возможность попеременно двигаться в начало и конец лавы. В этой связи можно проводить добычу угля на полную длину захвата или на его половину. Открытым остается вопрос по количеству и интенсивности выделяемого метана, описанным выше схемам, данный вопрос представляет также научный интерес и до сих пор широко не освещен. Количество добываемого угля можно контролировать посредством изменения интенсивности движения самого комбайна так же регулируя длину (глубину) захвата при отбойке угля. Струг не позволяет изменять глубину выемки, у него глубина выемки фиксированная, но направления работы так же как у комбайна два. Струг работает по мягкому углю и захватывает небольшую глубину угольного пласта. Принятие решения по использованию струга или комбайна на конкретном забое определяется экономической эффективностью, которая в свою очередь зависит от высоты угольного пласта, граничным значением для перехода от струга к комбайну

является высота пласта более полутора метров. В случаях, когда захват комбайна превышает мощность пласта, происходит разубоживание полезного ископаемого, что требует, в последствии, либо дополнительной очистки, либо наличие продукта со сниженной концентрацией угля, все это может быть причиной дополнительных финансовых издержек. Согласно литературным данным [49,50] комбайн имеет возможность регулировать высоту отбойки угля и высоту забоя, очистного забоя. Глубина угольного пласта размером 0,6-2,3 м вплоть до трёх метров. Струговые установки несмотря на небольшую глубину забойки обеспечивают высокую точность и не требуют проведения подготовительной работы, в частности не требуется проводить присечку породы прилегающей к угольному пласту, который разрабатывается. Если пласты по пути добычи изменяются по своей мощности, они не представляют сложности для струговых установок, так как высота струга легко регулируется в процессе отбойки. Комбайны же, как отмечалось ранее, используются для добычи твердого угля, но никто не запрещает использовать комбайны для мягких пород угля. А струговые установки могут применяться только на мягком угле, если в процессе разработки уголь меняет свою твердость, то струговые установки перестают быть эффективными.

Следует отметить, что энергозатраты отбойки угля комбайнами и стругами имеет один порядок, составляя от 0,7 до 10 МДж/м<sup>3</sup>. Показатель интенсивности выделения метана является основой при выборе стругов или комбайнов.

Струг и комбайн имеют характерные отличия, влияющие на то, какое количество метана попадает в атмосферу забоя. Комбайн имеет небольшую скорость отбивки угля, но при этом захватывает больший угольный слой. Такая характерная черта приводит к тому что, используя комбайн, а не струг идет отбивка большего количества угля. По этой причине при работе комбайны концентрация метана в забое выше, чем если бы работал струг. Еще одним недостатком комбайнов является их высокое измельчение угля, увеличение дисперсности угля ведет к повышению концентрации выделяемого метана.

Комбайн отбивает более мелкие куски угля, что ведет к загазованности угольной шахты в сравнение с использованием стругов. Помимо выделения большего количества взрывоопасного газа при работе комбайнов, образуется большое количество мелкодисперсной пыли, которая повышает запыленность шахты и ухудшает условия работы. Понимание этих факторов указывает на то, что применение той или иной технологии по выемке угля требует проведения предварительных замеров и геологических разведок.

Сложность выемки угля, зависящая от геологии, определяет технологию, которая применяется для его добычи, что в свою очередь на прямую влияет на его стоимость. Акционерное общество «СУЭК-Кузбасс» для снижения стоимости угля начинает применять длиннолазовые системы выемки угля. Специалисты данной компании имеют богатый опыт в добычи угля и разрабатывают свои технологические схемы выемки угля, что отражено в работах [77,78].

На шахте им. Ялевского нагрузка на очистной забой достигает 25 тыс. т/сут, что является крайне высоким показателем по угледобыче. В 2010 году, одним из коллективов, добывающих уголь на данной шахте из пласта мощностью пласта 4,0 – 4,6 м, при использовании комплекса оборудования DBT, комбайна SL-500, было добыто 707,2 тыс. тонн угля. В 2017 году бригада Евгения Косьмина установила несколько рекордов добычи российского и мирового уровня. В мае и июле коллектив выдавал на-гора, соответственно, 1 млн 407 тыс. тонн и 1 млн 567 тыс. тонн (мировой рекорд).

В 2019 году горняки шахты имени Рубана «СУЭК-Кузбасс» (Ленинск-Кузнецкий) побили рекорд годовой угледобычи в России шахтёры выдали на-гора 6 млн 344 тыс. 400 т угля.

На шахте «Талдинская - Западная-1» (акционерное общество «СУЭК-Кузбасс») нагрузка на очистной забой, в отдельные промежутки времени достигало значений больше 30 000 тонн угля в сутки. В среднем угледобыча составила 32 000 тонн угля. Забой проводили в лаве 67-09 также комплексом

DBT и комбайном SL-500 на пласте мощностью 4,5 м. Данные результаты свидетельствуют, в целом, о возможности достижения запредельных нагрузок на забой – 40 тыс. т/сут. Однако, для угольной промышленности России, стремление к таким объемам потребует использования самых современных технологий дегазации, в том числе заблаговременной дегазации газоносных угольных пластов.

Сложность горно-геологической обстановки, является сдерживающим фактором в России, фактором, который препятствует развитию высокопроизводительных способов. В первую очередь это относится к угольным пластам с газоносностью более 13 м<sup>3</sup>/т. Помимо геологического фактора, существует вероятность горного удара и внезапного выброса угля и газа, которая как отмечалось в работах проф. Фейта Г.Н. увеличивается с ростом темпов ведения горных работ. Для решения данной проблемы необходимо проводить заблаговременную дегазацию угольных пластов, опытно-промышленная апробация которой осуществляется в настоящее время на шахтах АО «СУЭК» и Распадской угольной компании.

Если управлять режимом работы выемочного участка, то возможно обеспечить соблюдение безопасной работы без возникновения взрывоопасной ситуации, однако это возможно при условии прогнозирования метанообильности очистного забоя за счет достижений фундаментальной науки.

Основным препятствием на пути высокопроизводительной разработке газоносных угольных является трудоемкость процессов дегазации, высокие затраты на материалы. Все это мотивирует исследователей на разработку более дешевых наукоемких технологий дегазации газоносных угольных пластов.

Длинные очистные забои позволяют повысить эффективность и производительность выемки угля. Основными условиями высокоэффективной добычи угля является обеспечение эффективной вентиляции и защита в геомеханическом плане добывающего оборудования.

Твердость угля определяет применение той или иной технологии добычи угля, струги применяются в случае если уголь мягкий, если же уголь твердый то лучше применять комбайны, так как они имеют больший запас твердости добывающей оснастки. Размер кусков отбитого угля, или его дисперсность определяются технологией отбивки, применение комбайнов или стругов. Решение применения той или иной технологии выемки угля должно основываться на параметрах твердости и газоносности угля, так как струги обеспечивают получение больших кусков угля, а вот при использовании комбайнов отбиваемые куски угля мелкие и, следовательно, дают большее метановыделение.

### **1.3 Состояние проблемы категорирования угольных шахт**

Прогресс не стоит на месте, а вместе с тем растут человеческие аппетиты, требуется больше природного сырья, а увеличение масштабов добычи неуклонно ведет к изменению самих условий добычи - масштабный эффект. Нормативные документы [55-61] в связи с изменениями условий добычи давно устарели. Это те документы который были актуальны еще с 1995 года, там были указаны нормы воздуха в добывающей шахте. Ввиду отсутствия мощной вычислительной техники в прошлом веке, задачи по моделированию воздухопотока в шахтах едва ли могли, были решены, поэтому задача подобного рода никак не решалась. Вручную рассчитать многомерную задачу включающую распределение воздуха в шахте, направление и скорость газовых потоков, учитывающую скорость выделения метана из породы, задача не берущаяся, поэтому в прошлом веке многое упрощалось, во главе угла ставился планируемый объем добываемого угля. В ту пору иных способов по обеспечению газобезопасности не существовало, но и в современных реалиях не все просто, категорирование шахт определяется по относительной газообильности, определяющей количество газа которое выделяется на одну тонну добычи.

Ранее, когда других понятий не было или не было возможности получить другие измерения применяли понятие относительной газообильности. В современных реалиях, в условиях постоянных изменений объема угледобычи. Возникают различные флуктуации по добычи угля, а порой возникают выбросы, которые могут резко отклоняться от некоего среднего значения на которое ориентируются при добыче. Все это может внезапно и резко повысить газоопасность добычи. Относительная и абсолютная газообильность, основные критерии газоопасности. Абсолютное значение газообильности более информативно, но при этом так же не дает полноты картины. Например, если использовать это понятие, то газообильность определится по количеству подаваемого воздуха в угольную шахту. Проще всего использовать понятие, применяемое так же в химии концентрация газа. В данном случае речь идет о концентрации метана, то есть о его количественном содержании на единицу воздуха или площади области газовыделения. Так же при горных разработках может учитываться вероятность загазованности шахты, здесь идет непосредственный учет горно-геологической ситуации, посредством разведки идет категорирование шахты по степени взрывоопасности. Вероятность загазования бывает двух значений либо она выше допустимого уровня, либо доходит до взрывоопасного уровня, то есть шахта может быть в этой связи либо взрывоопасной неработоспособной. Рабочие шахтеры могут получать травмы, который носят характер производственных, это так же учитывается при категорировании шахт, как и возможность воспламенения  $\text{CH}_4$ .

При определении вероятностных процессов, в частности, при расчете вероятности загазованности угольно шахты, необходимо привлекать статистические данные и данный математической статистики (критерий достоверности, критерий Стьюдента, математическое отклонение и др.). Если сравнивать математическую статистику с компьютерным моделированием, то второй результат будет наиболее предпочтительным, так как он даст не просто значения, но и позволит показать примерную картину поведения при

газовыделении шахты и применении принудительной вентиляции и прочее. Конечно и компьютерное моделирование не лишено изъянов и в сравнение с реальной практической картиной при моделировании применяется большое количество упрощений. Эти данные могут быть получены инженерными службами с использованием измерительной техники. При категорировании шахт учитывается не только взрывоопасность метано-воздушной смеси, но также угольной пыли, самовозгораемость угля, а также опасность динамических явлений. В отношении каждой категории осуществляется своя система мер предотвращения опасности. Следует отметить, что в различных отраслях и странах категорирование осуществляется по различным принципам. Особую актуальность данный вопрос приобрел в последние годы, когда в результате применения высокопроизводительной техники на шахтах второй категории стало выделяться большое количество метана. Вопрос также осложняется тем, что в зависимости от категории по газу изменяется налогообложение добычи. Действующая инструкция зачастую является предметом споров, так как многие разделы инструкции могут показаться бесполезными и логичным было бы отказаться от нее в целом, однако в инструкции существуют отдельные разделы, которые заслуживают отдельного внимания. Не зависимо от типа вида деятельности, частный подрядчик или государственный, все они должны исполнять то, что прописано в нормативных документах, правила для всех едины. Все нормативные документы утверждаются Госгортехнадзором России. Нормативные документы не приписывают по сути своей должностные инструкции для всех работников шахты. Нормативные документы содержат нормы и правила по проведению безопасной выемки угля. Указания по тому, что и кто должен делать являются должностные инструкции, которые утверждаются генеральным директором организации или тем, кто исполняет его обязанности. Такие инструкции так же применимы и к работникам руководящих должностей. Из всего, выше сказанного, важным является лишь квалификации работников и необходимое

проверенное оборудование. Заборы проб воздуха проводятся из учета планирования места будущей разработки или последующей выработки при уже начавшейся разработке. Существует инструкция, согласно которой можно установить категорию шахты по результатам измерений. Можно и отказаться от реального забора проб, которые требуется проводить согласно инструкции, но есть разделы, которые ни в коем случае игнорировать нельзя. Просто при заборе проб нужно ориентироваться на современные технологические и методологические подходы, в частности нужно использовать технологию газовой и воздушнодепресссионной съемки. Данные по газовому составу и результаты воздушнодепресссионной съемки являются самыми важными статистическими данными, которые позволяют промоделировать полную картину шахты, правильно рассчитать шахту и в целом правильно распланировать фронт работы. Путем оперативного вмешательства для газового и воздушного контроля определяют аэрогазодинамические параметры вентиляционной системы угольного забоя. В сочетании с компьютерным моделированием, наличие практических данных позволяет получить картину распределения воздуха по всей вентиляционной шахте. Знание распределение воздуха в угольной шахте позволяет легко локализовать места с высоким содержанием метана и в целом позволяет определить газообильность шахты. Считается, что нет необходимости постоянно проводить мониторинг газообильности угольных шахт. Причина того, что это избыточно заключается в возможности прогнозирования на будущее газораспределения посредством компьютерного моделирования и наличия данных по характеристикам вентиляционной системы. Проводится простой и жесткий расчет, исходные данные этого расчета основываются на результатах предыдущего года. То есть учетом запланированной добычи и входных данных в прошлом году строят картину будущего поведения шахты по газообильности. Важным аспектом, который стоит отметить при таких расчетах никак не учитываются различные вероятностные и внезапные факторы, факторы, влияющие на газовый баланс в

забоя. Применение такого подхода было оправданным для прошлого века, так как уровни добычи не были высокими, да и в целом процесс добычи угля отличался высокой стабильностью.

Градации угольных шахт по газоопасности подразделяются на категории согласно принятым нормативным документам. В общем виде можно выделить два типа шахт – газовые и негазовые, существуют и другие градации включающие различные проявления опасных и угрожающих жизни человека факторов (внезапные выбросы метана, внезапные обрушения и другое).

Выделяют три категории шахт, в зависимости от газоопасности – I, II, III, помимо них есть еще негазовые шахты они категорий не имеют, а также сверхкатегорные и опасные по внезапным выбросам угля и газа. Каждая категория определяют свои условия по вентиляции, которые должны быть обеспечены в шахте при ее разработке. Для всех шахт, независимо от их категории, кроме негазовых шахт, устанавливаются обязательные нормы проветривания, или поступления свежего воздуха. Система вентиляции должна быть автоматизирована и сопряжена с системой измерения. Например, в газовой шахте резко повысилась концентрация метана, специальный измерительный прибор должен зафиксировать этот скачек и подать команду на пульт управления, который соответствующим образом увеличит приток воздуха в забой. Другим важным аспектом является правильность определения газонасыщенности шахты, ранее обсуждалось, что для этого используют относительную, абсолютную газонасыщенность и концентрацию метана, последняя характеристика наиболее точно отражает текущую ситуацию.

Чем выше категория шахты от первой к третьей, тем большие требования предъявляются по уровню вентиляции, в принципе закономерность логична и понятна всем специалистам, работающим в угольной промышленности. Чем больше скорость потока воздуха в шахте, тем быстрее идет проветривание, что снижает риск скопления взрывоопасного метана и угольной пыли. Шахты III категории требуют обеспечения самых высоких условий по вентиляции.

Электрическое оборудование так же имеет свою градацию, в частности по уровню взрывозащиты. Выделяют в основном три группы;

- рудничное взрывозащищенное электрооборудование (уровень взрывозащиты;
- рудничное повышенной надежности против взрыва (уровень взрывозащиты;
- рудничное нормальное (невзрывозащищенное) с изоляцией уровня 1.

Оборудование рассчитано для работы при относительной влажности окружающей среды  $(98\pm 2)\%$  (с конденсацией влаги) при температуре  $(35\pm 2)^\circ\text{C}$  и соответствует требованиям стандарта ГОСТ Р 24754-2013.

Существуют два способа для определения условий применения оборудования. При категорировании шахт идет учет газообильности шахты по метану, вероятности резких выбросов газа и прочих условий работы, все это же применяется при определении типа электрического оборудования, которое необходимо использовать в забое. Оборудование нужно правильно разместить, правильность его размещения определяется технологией добычи, данный факт так же применяется при подборе типа оборудования. Как отмечалось ранее шахты могут разделяться на газовую и негазовую и этот подход разделения используется при подборе электрооборудования. Но одно из этих условий разделения для подбора оборудования недостаточно, необходимо производить учет.

Когда шахта газовая, то и соответственно должен быть к ней правильный подход. В первую очередь необходимо рассматривать количество газа и количества воздуха для обеспечения требований промышленной безопасности.

Сегодня назрел вопрос создания новой системы категорирования шахт, и уйти от старой градации. Обязательно нужно пересмотреть ряд нормативных документов по обеспечению безопасности работы на угольных шахтах. Это оптимизирует производительность труда и создаст безопасные условия работы.

#### 1.4 Особенности трещинообразования при гидродинамическом воздействии

Как показывает практика отработки угольных пластов эффективная и безопасная отработка газоносных угольных пластов обеспечивается только при широком использовании способов предварительной или заблаговременной дегазации, для проведения которой необходимо повышение проницаемости угольных пластов. Основным методом повышения проницаемости является гидродинамическое воздействие (гидрорасчленение пласта – ГРП) проведение которого обеспечивает раскрытие трещин. Перед проведением ГРП проводят комплексный анализ Reservoir Characterization для построения геомеханической модели. ГИС с помощью Sonic Scanner в угольных пластах (МУП) позволяет выявить направления первичных и вторичных кливажей, построить карту стрессов (Primary Cleat Direction, Cleat Anisotropy, Stress Orientation), также оценить геометрию трещины - Frac Height Measurement, для предотвращения прорыва в верхние или нижние вмещающие породы (Рисунок 1.1, 1.2).

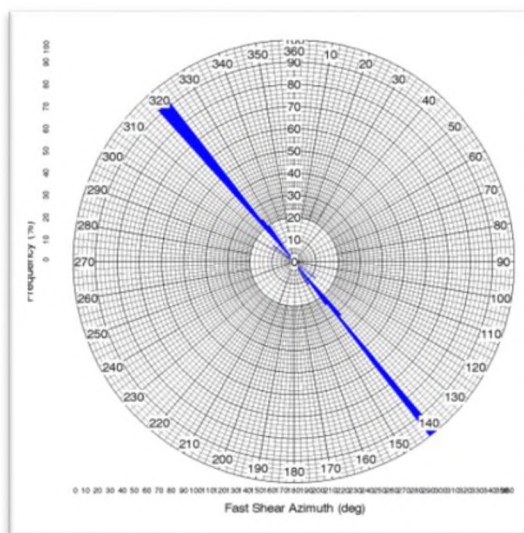


Рисунок 1.1 – Направление главного кливажа, измеренное Sonic Scanner

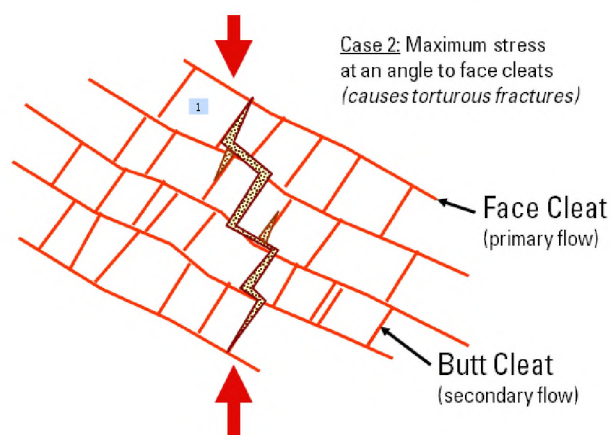


Рисунок 1.2 – Возможный сценарий развития трещины с учетом карты трещиноватости

Другим средством отслеживания развития трещины является микросейсмический мониторинг (рис. 1.3) (15 МУП скважин в Австралии, мониторинг более 40 ГРП).

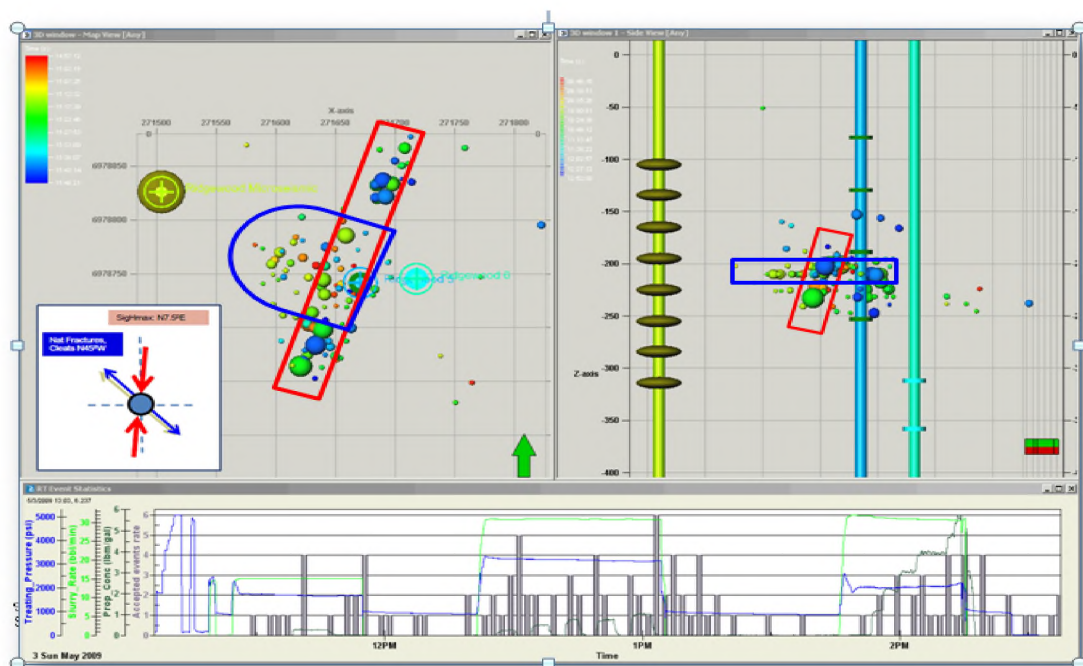


Рисунок 1.3 – Пример микросейсмического мониторинга

В Австралии в МУП выделялись:

- Чувствительные к воде глины, в изобилии встречающиеся в породах-покрышках месторождения Сурат (SURAT)

- Минимум 3% KCl требуется для поддержания стабильности ствола скважины во время бурения

- Пластовая вода имеет низкую минерализацию (3-pp)

Для повешения эффективности ГРП применено:

- Новая жидкостная система с контролем наличия глины и оценкой её смачиваемости;

- Комбинация ГНКТ и системы отсечения портов для индивидуальной обработки 30-40 тонких угольных пластов.

В Китае были получены неблагоприятные результаты добычи на высокорасходных ГРП, большинство трещин вышли из целевого угля во вмещающие породы, а некоторые прорвались в водоносные пласты.

Решением стало применение пен для уменьшения повреждений и улучшения очистки трещин, обеспечения контроля высоты трещины и повышения производительности производства. По полученным результатам добились ускоренного выхода скважин на добычу – с 64 дней до 3 дней.

Направление и развитие трещины зависит от естественных напряжений горных пород. Развитие трещины будет происходить в направлении, перпендикулярном минимальному горному напряжению.

Если вертикальное напряжение наименьшее, то создаваемая трещина развивается в горизонтальной плоскости. Опыт показывает, что горизонтальные трещины имеют место на небольших глубинах, где давление вышележащих толщ минимально. В регионах с аномальными горными напряжениями вследствие складкообразования и образования взбросов и сбросов возможно создание наклонных трещин и других отклонений. Однако в большинстве случаев образуются вертикальные или близкие к ним трещины [139].

В действительности, по результатам наблюдений на небольших глубинах трещины гидроразрыва образуются как в горизонтальной, так и в вертикальных плоскостях. Однако в последующем при освоении скважин более благоприятные условия для сохранения имеют трещины вертикального или близкого к нему

характера. В осадочных бассейнах с нормальным давлением на глубинах больше 1000 метров минимальное напряжения, скорее всего, ориентировано в горизонтальной плоскости (Плам, 1994г.).

Когда забойное давление гидроразрыва меньше горного давления, трещина может продвигаться только в вертикальной плоскости. Вертикальная трещина может содержать также горизонтальную компоненту, когда давление превышает горное давление или вертикальную компоненту напряжения. Такие условия могут возникнуть

- на небольших глубинах, где эрозия привела к уменьшению горного давления и снизила вертикальное напряжение

- в пластах, осложненных тектонической взбросовой деятельностью или в пластах с АВПД. В обоих случаях в таких пластах повышается горизонтальное напряжение.

- в отложениях с низким пределом прочности на сдвиг, в которых происходит релаксация напряжений, в результате чего повышается горизонтальное напряжение.

В таких условиях геометрия трещины может содержать как вертикальную, так и горизонтальную составляющую. Трещины с такой геометрией называются Т-образными. Об образовании Т-образных трещин сообщалось в отчетах о гидроразрывах, проведенных в неглубоком угольном пласте (Махони и др., 1981), в неглубоких известняковых отложениях (Вуд и др., 1983) и в слоистых песчаниках (Фрагачан и др., 1993). Соответствующие графики изменения давления и вертикальные разрезы профиля ширины трещин приведены на Рисунке 1.4. Из рисунка видно, что на этапе с давлением почти не изменяется.

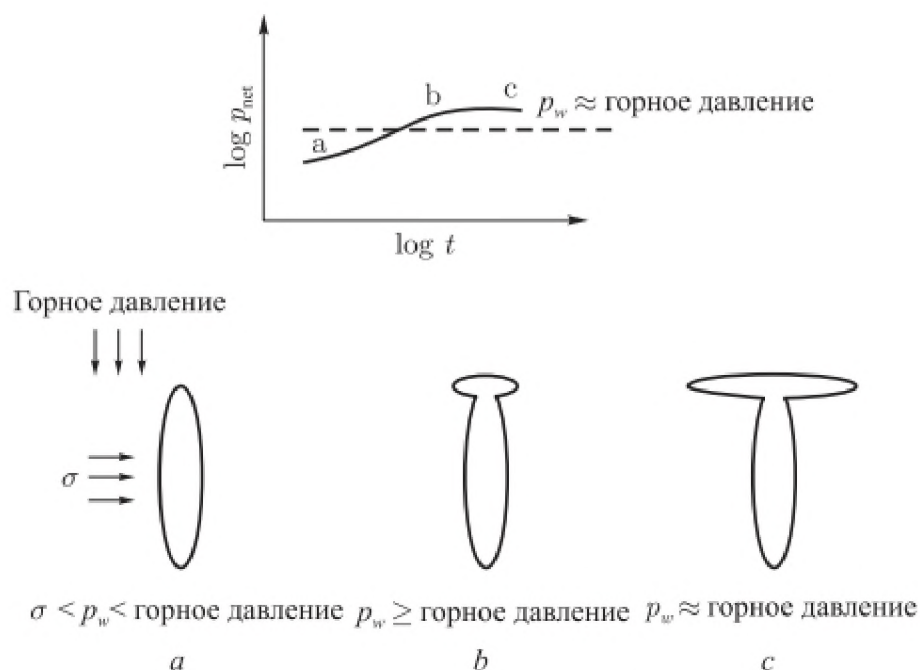


Рисунок 1.4 - Изменение давления в Т-образных трещинах

Прорыв в горизонтальную плоскость с повышенным напряжением аналогичен неконтролируемому вертикальному росту трещины выше зоны заземления, как на Рисунке 1.4. Несмотря на то, что не контролируемый вертикальный рост трещины начинается при давлении меньшем, чем давление в перемычке, рост Т-образной трещины происходит при давлении несколько больше вертикального напряжения.

Ширина горизонтальной составляющей трещины узкая, и она заземлена в двух местах в точке пересечения с вертикальной составляющей из-за упругого взаимодействия обеих составляющих (Вандам и др., 1988). Горизонтальная составляющая трещины увеличивает площадь поверхности для утечки жидкости в пласт и снижает эффективность гидроразрыва. Кроме того, из-за своей ограниченной ширины горизонтальная составляющая легко принимает жидкость гидроразрыва, но не пропускает пропант. Оба эти фактора приводят к чрезмерной дегидратации жидкости ГРП с пропантом в вертикальной составляющей, что может привести к преждевременному выпадению пропанта («СТОП»).

По величине давления можно определить, развивается ли трещина полностью в вертикальной плоскости или имеет также горизонтальную составляющую. Горизонтальная составляющая образуется в том случае, когда давление в трещине почти постоянно и приблизительно равно горному давлению в пласте, как показано на рис. 1.4. Величину горного давления обычно можно рассчитать (см. раздел 3.5.1 М. Экономидес, К. Нолте “Повышение продуктивности нефтегазовых коллекторов”) и его всегда нужно сравнивать с величиной забойного давления гидроразрыва при проведении анализа давления в трещине.

С помощью такой диагностики давления можно сделать вывод о создании Т-образной трещины при мини-ГРП, выполненном в тектонически активном пласте на глубине 2975 м. На билогарифмическом графике эффективного давления (Рисунок 1.5) есть участок с положительным уклоном, который длится около 75 минут, что свидетельствует о том, что трещина продвигается вглубь пласта и при этом не выходит за границы продуктивного интервала. Затем давление стабилизируется приблизительно на уровне 700 бар. Эта значение постоянного давления является величиной вертикальной составляющей напряжения при градиенте горного давления, равном 0,244 бар/м. В оставшуюся часть гидроразрыва продвижение вертикальной компоненты трещины становится менее эффективным из-за роста горизонтальной компоненты трещины [139].

В условиях небольших глубин (до 500 м) необходимо вычислять полный тензор напряжений, для чего требуется привлекать результаты исследований скважинными имиджерами и сканерами.

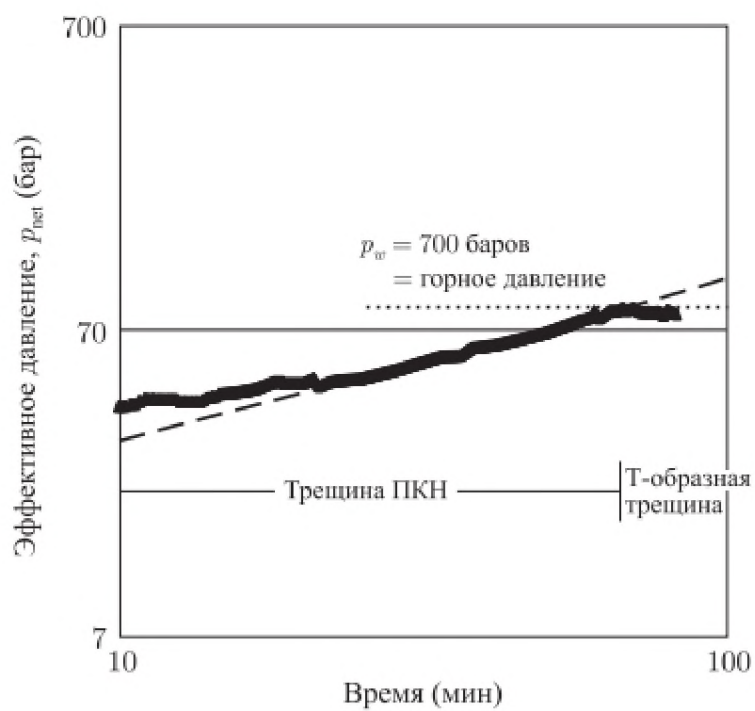


Рисунок 1.5 - Изменение давления в процессе мини-ГРП при создании Т-образной трещины

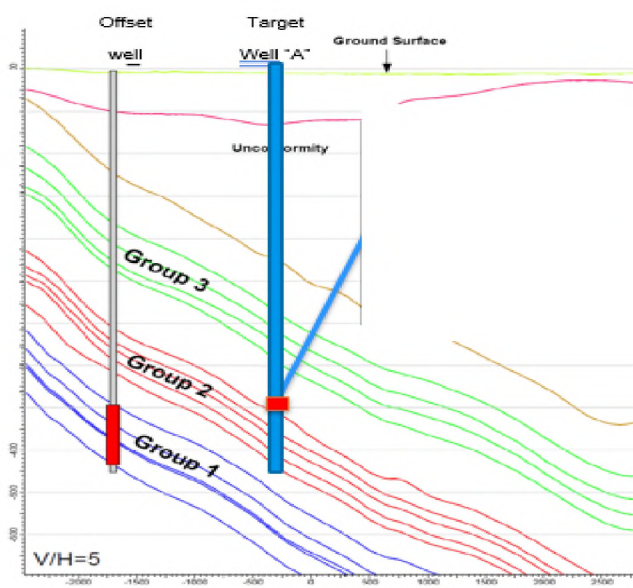


Рисунок 1.6 – Разрез угольного участка

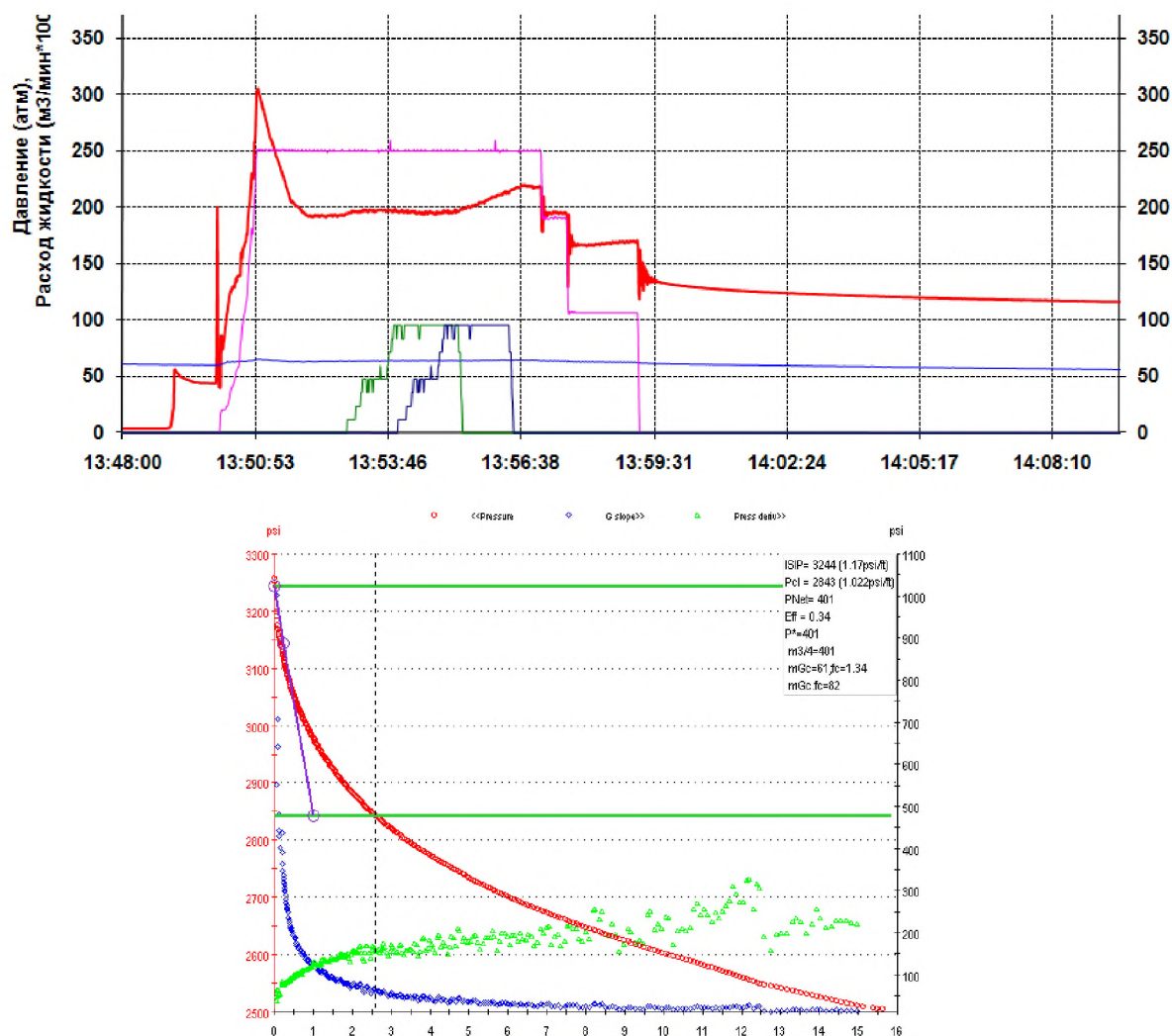


Рисунок 1.7 – График калибровочного теста с анализом

В Казахстане при проведении ГРП на угольном пласте на 1м подходе произошел “СТОП” после прокачки 2тн 16/30 в пласт. По анализам 2х тестов было выявлено, что  $ISIP\ gradient > Overburden\ gradient$ , как следствие более сложная геометрия трещины (Рисунки 1.6, 1.7).

### 1.5 Цель и основные задачи исследований

На современном этапе развития угольной промышленности большую актуальность имеет внедрение в производственный процесс передовой техники мирового уровня, обеспечивающей высокопроизводительную добычу угля с нагрузками на очистной забой более 10 тыс. т/сут. Основным сдерживающим фактором технологического характера является высокая газоносность угольных

пластов, что вызывает необходимость реализации мероприятий по дегазации, в том числе заблаговременной или текущей. Анализ литературных данных, сравнение способов добычи и методов дегазации позволило определить следующую цель работы: совершенствование технологии гидровоздействия на разрабатываемый угольный пласт для обеспечения его дегазации и изменения напряженного состояния для предотвращения газодинамических явлений и загазирования горных выработок.

Другой серьезной проблемой при разработке газоносных угольных месторождений является необходимость надежного прогноза показателей дегазации угольных пластов и оптимизация соответствующих технологических режимов. Фундаментальные достижения в области уравнений математической физики по проблеме массопереноса метана в угольных пластах в комбинации с современными компьютерными средствами моделирования позволяют оперативно осуществлять прогнозы газовыделений и на этой основе оптимизировать производственные процессы.

В связи с изложенным в диссертационной работе поставлены следующие задачи исследований:

- уточнить зависимости газоносности угольных пластов шахты Мао Хе для оценки опасности динамических явлений и уточнения области применения дегазации с интенсификацией газовыделения;
- обосновать требования к рабочим жидкостям, используемым для подземного гидроразрыва;
- обосновать параметры и режимы гидрообработки на основе моделирование процесса гидроразрыва;
- установить зависимости деформаций угольного пласта при гидровоздействии для обоснования параметров технологии подземного гидроразрыва с использованием эффекта набухания угольного пласта;

- разработать методические положения и параметры, определяющие область применения способа гидрообработки, направленного на снижение газоносности и опасности газодинамических явлений и загазирования;
- предложить технические решения, позволяющие обеспечить безопасность и высокие нагрузки на очистной забой при разработке газоносных угольных пластов.

## **ГЛАВА 2. Аналитические исследования процессов гидродинамического воздействия и метановыделения в горные выработки и скважины**

### **2.1 Моделирование процесса гидроразрыва из подземных скважин**

Моделирование процесса гидровоздействия на угольные пласты выполнено в программном комплексе FRACPRO, который в настоящее время является наиболее широко используемым в мире ПО для проектирования гидроразрыва [118, 119]. Программное обеспечение FRACPRO может эффективно моделировать разные дизайны по ГПП, включая интервалы с несколькими перфорациями и многостадийный гидроразрыв пласта.

FRACPRO содержит четыре полностью интегрированных модуля для проектирования ГПП, анализа ГПП, экономической оптимизации и разработки пласта. Программа позволяет моделировать безграничное число комбинаций конструкции скважины, закачки пропанта, изменения проводимости и размера трещины для любых геологических условий. Варианты работ, которые могут быть сделаны в данной ПО:

#### **1) Трещины, заполненные пропантом**

Данное программное обеспечение позволяет оценить размещение пропанта, улучшение проводимости и геометрию трещин, а также учитывает последствия повреждения пропанта из-за дробления, вдавливания, циклического напряжения.

#### **2) Горизонтальные скважины**

Программное обеспечение FRACPRO может моделировать одиночные и множественные горизонтальные скважины, позволяя создавать несколько графиков закачки и пластов в одном файле.

#### **3) Пенный гидроразрыв пласта**

Программное обеспечение рассчитывает качество пены на поверхности и в скважине, а также необходимые объемы газа и жидкости.

#### 4) Кислотная закачка

Программное обеспечение FRACPRO может моделировать закачку кислоты, используя скорости кислотной реакции, термическое моделирование и библиотеку жидкостей, содержащую стандартные виды кислот.

Оно обладает большой встроенной библиотекой жидкостей и пропантов. Программа также может получать данные и производить их калибровку в режиме реального времени, обеспечивая пользователей возможностью адаптировать модели к определенным требованиям.

Автоматизированные процедуры minifrac, анализа скорости шага, входного трения, чистого давления и сопоставления давлений закачки встроены в основную программу. Встроен анализ проницаемости пласта и пластового давления с использованием методов Хорнера, псевдолинейного, псевдорadiaльного и Майерхофера, позволяющие исследование длительных испытаний DFIT на закачку/падение давления.

Программное обеспечение FRACPRO связывает свои результаты с программами IMEX®, Eclipse® и QuickLook software путем создания файла с уточнением локальной сетки трещины, содержащей выбираемые пользователем свойства.

Есть возможность провести моделирование множественных трещин, МГРП и множественных зон. Эти файлы могут быть непосредственно импортированы в гидродинамические симуляторы резервуаров для полного анализа.

При выполнении моделирования учтен опыт проведения гидродинамического воздействия на разведочных скважинах, пробуренных на Нарыкско-Осташкинском месторождении, где в качестве жидкости ГРП использовался сшитый гель с загрузками гелланта 1.8-2.4 кг/м<sup>3</sup>. Максимальная

концентрация пропанта при использовании сшитого геля составила  $600 \text{ кг/м}^3$ . Неправильный подбор деструктора для разложения сшитого геля при низких температурах в рассматриваемых угольных пластах ( $20^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ) мог привести к кольтматации продуктивной зоны.

В качестве расклинивающего агента со сшитым гелем были использованы керамические пропанты 20/40 и 16/30. Пропант большего размера 16/30 использовали в конце закачки для увеличения проводимости трещины вблизи ствола скважины.

В качестве “чистой” жидкости для ГРП использовали водный раствор + KCl 4% для увеличения и развития сети трещин и для увеличения площади контакта угля с фильтрующей системы, которая представляет из себя сложную сеть трещин (рис. 2.1). При этом, отдельные специалисты отмечают, что стимулированный объем создается не сложнопостроенными разветвлёнными трещинами, а квазипланерным распространением трещиноватости (множественными планерными трещинами количеством много больше, чем количество стадий и перфораций) [120, 121].

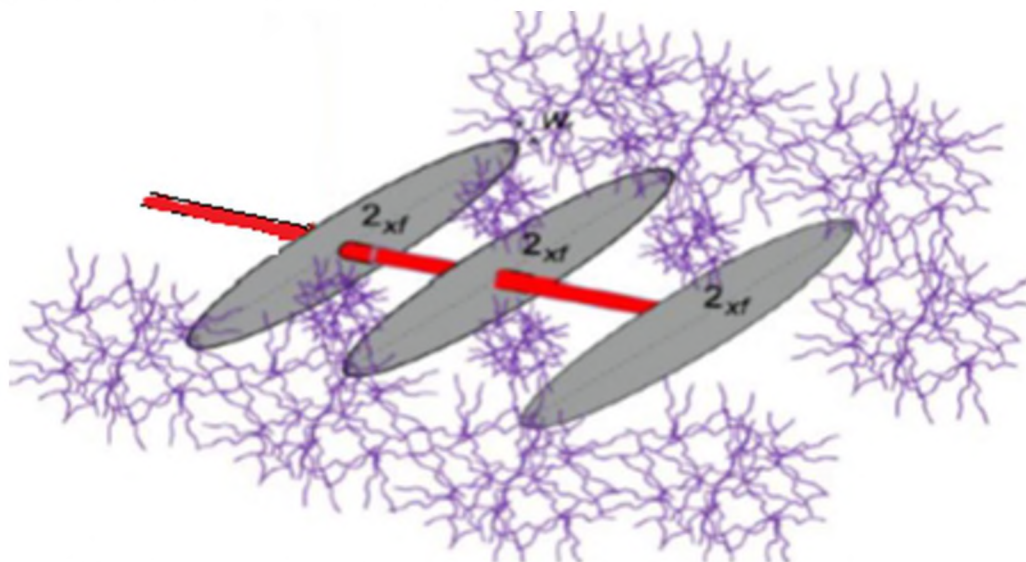


Рисунок 2.1 - Схематическое представление сети трещин при использовании водных растворов

Для создания сложной системы трещин необходимо выполнение определенных технологических параметров обработки, которые должны

определяться с учетом геомеханических свойств пласта. Определяемые параметры обработки:

- вязкость рабочей жидкости;
- типоразмер пропанта, используемого для закрепления сложной сети мелких трещин;
- объем рабочей жидкости (относительно традиционного ГРП в 3-5 раз и более) для максимизации площади соприкосновения трещины ГРП с пластом;
- темп закачки, который обеспечивает формирование системы трещин.

При применении безгвартовой “чистой” жидкости существуют риски как со стороны геологических условий – малая ширина создаваемой трещины ГРП (ширина трещины пропорциональна вязкости флюида [122]), так и оседания пропанта в скважине и трещине.

Моделирование выполнено для условий ш. им. С.М. Кирова. Основные горно-геологические и горнотехнические характеристики приведены в табл. 2.1.

Основные ограничения: максимальный расход жидкости 0.6 м<sup>3</sup>/мин, максимальное поверхностное давление 30,0 МПа, максимальный объем жидкости 50 м<sup>3</sup>.

Характеристика пласта и вмещающих пород следующая: уголь, средняя мощность пласта - 2,22 м, непосредственная кровля - аргиллит мощностью 2,0-7,0 м средней крепости и средней устойчивости ( $f=3-4$ ), выше крепкий песчаник  $f = 6-7$  мощностью 13-19 м. Породы почвы: аргиллиты средней крепости ( $f = 3-4$ ), верхний предел которой на мощность 0,2-0,6 м с прожилками угля ( $f=2-2,5$ ). Глубина залегания пласта 394-464 м.

На первом этапе наличие геологических нарушений не учитываем и принимаем, что пласт залегает полого и спокойно.

Таблица 2.1 – Исходные данные

| №<br>п/п | Параметры                                                               | Ед.<br>изм.    | Место проведения<br>гидроразрыва |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
|          |                                                                         |                | вент. печь 24-58                 |
| 1        | 2                                                                       | 3              | 4                                |
| 1.       | Длина скважины                                                          | м              | 37÷42                            |
| 2.       | Диаметр буровой коронки                                                 | мм             | 50÷132                           |
| 3.       | Длина обсадки трубами<br>(герметизации)                                 | м              | 35                               |
| 4.       | Диаметр обсадных труб                                                   | мм             | 96                               |
| 5        | Давление на насосе при<br>гидроразрыве пласта                           | МПа            | 10÷30                            |
| 6        | Темп нагнетания жидкости                                                | л/с            | до 10                            |
| 7        | Радиус гидрообработки пласта<br>(проектный)                             | м              | 25                               |
| 8        | Количество жидкости на<br>гидроразрыв                                   | м <sup>3</sup> | 10...50                          |
| 9        | Минимальное время обработки с<br>учетом переменного темпа<br>нагнетания | мин            | до 30                            |
| 10       | Модуль упругости угля                                                   | ГПа            | 36,65                            |

Были смоделированы 4 дизайна со сшитым гелем YF122 и на водном растворе KCl 4% с разными напряжениями в породах (табл. 2.2).

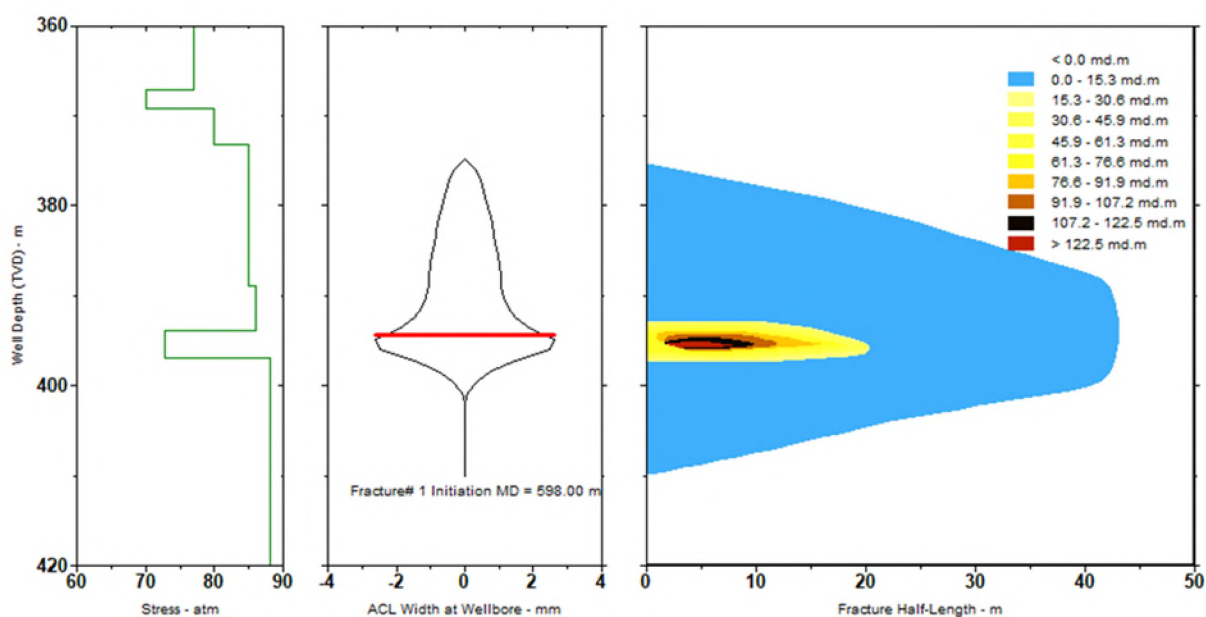
Таблица 2.2 – Данные для расчета

| Название слоя                 | Мощность<br>слоя, м | Напряжения в<br>МПа, вариант 1 | Напряжения в МПа,<br>вариант 2 |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Крепкий песчаник              | 15.7                | 8,5                            | 8,8                            |
| Аргиллит, средней<br>крепости | 5                   | 8,6                            | 8,6                            |
| Уголь                         | 2.2                 | 7,3                            | 7,3                            |
| Аргиллит, средней<br>крепости | 29                  | 8,8                            | 8,8                            |

В результате моделирования получены следующие результаты:

1а) YF122, расход 0.6 м<sup>3</sup>/мин, максимальная концентрация 500 кг/м<sup>3</sup>, пропант 20/40 Форес, 5тн общий тоннаж. Закрепленная полудлина при проводимости >30.9 мД\*м 20м, гидравлическая высота 30м, закрепленная пропантом высота 3м, ширина 2.3 мм (рис. 2.2).

1б) YF122, расход 0.6 м<sup>3</sup>/мин, максимальная концентрация 500 кг/м<sup>3</sup>, пропант 20/40 Форес, 5тн общий тоннаж. Закрепленная полудлина при проводимости >25 мД\*м 40м, гидравлическая высота 20м, закрепленная пропантом высота 3м, ширина 2.4 мм (рис. 2.3).



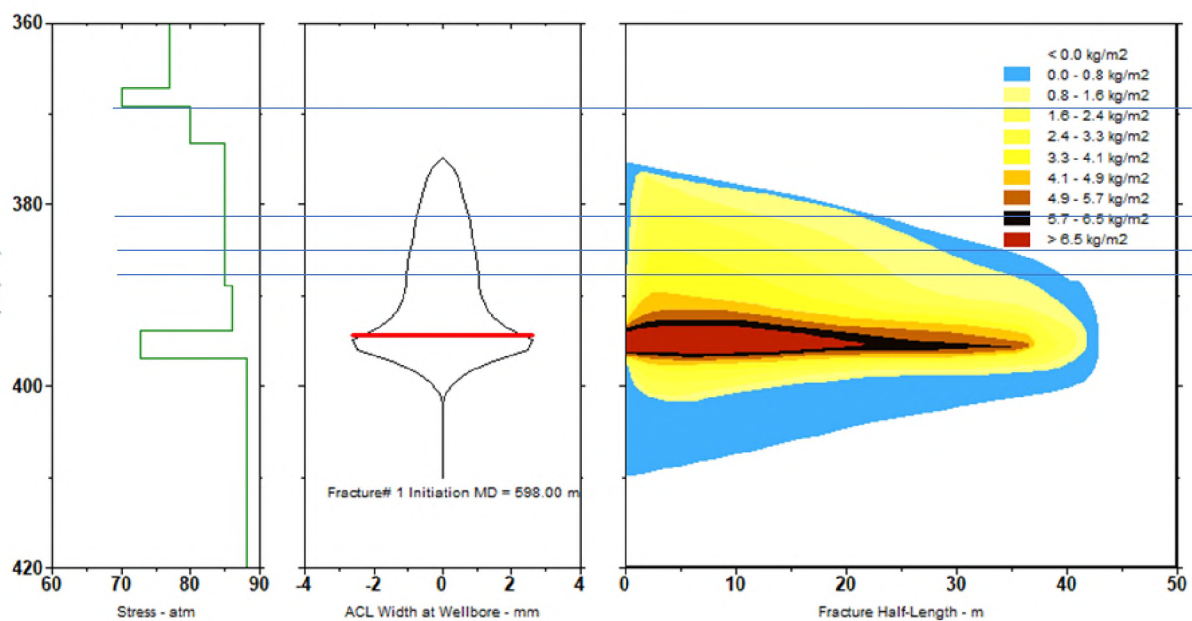


Рисунок 2.2 – Профиль проводимости и концентрации пропанта

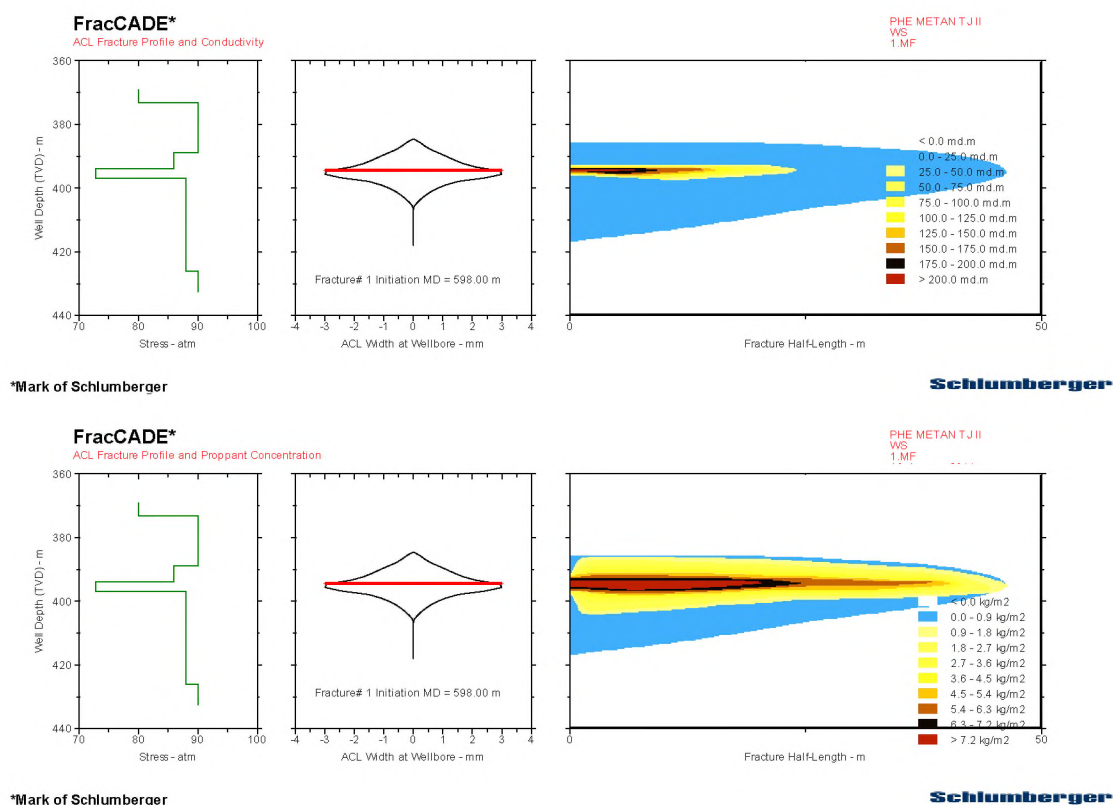


Рисунок 2.3 – Профиль проводимости и концентрации пропанта

2а) Водный раствор KCl 4%, расход 2 м<sup>3</sup>/мин, максимальная концентрация 300 кг/м<sup>3</sup>, пропант 40/70, тоннаж 3тн. Закрепленная полудлина 40м, гидравлическая полудлина 50м, закрепленная высота 2м, гидравлическая высота 15м, ширина 0.6 мм.

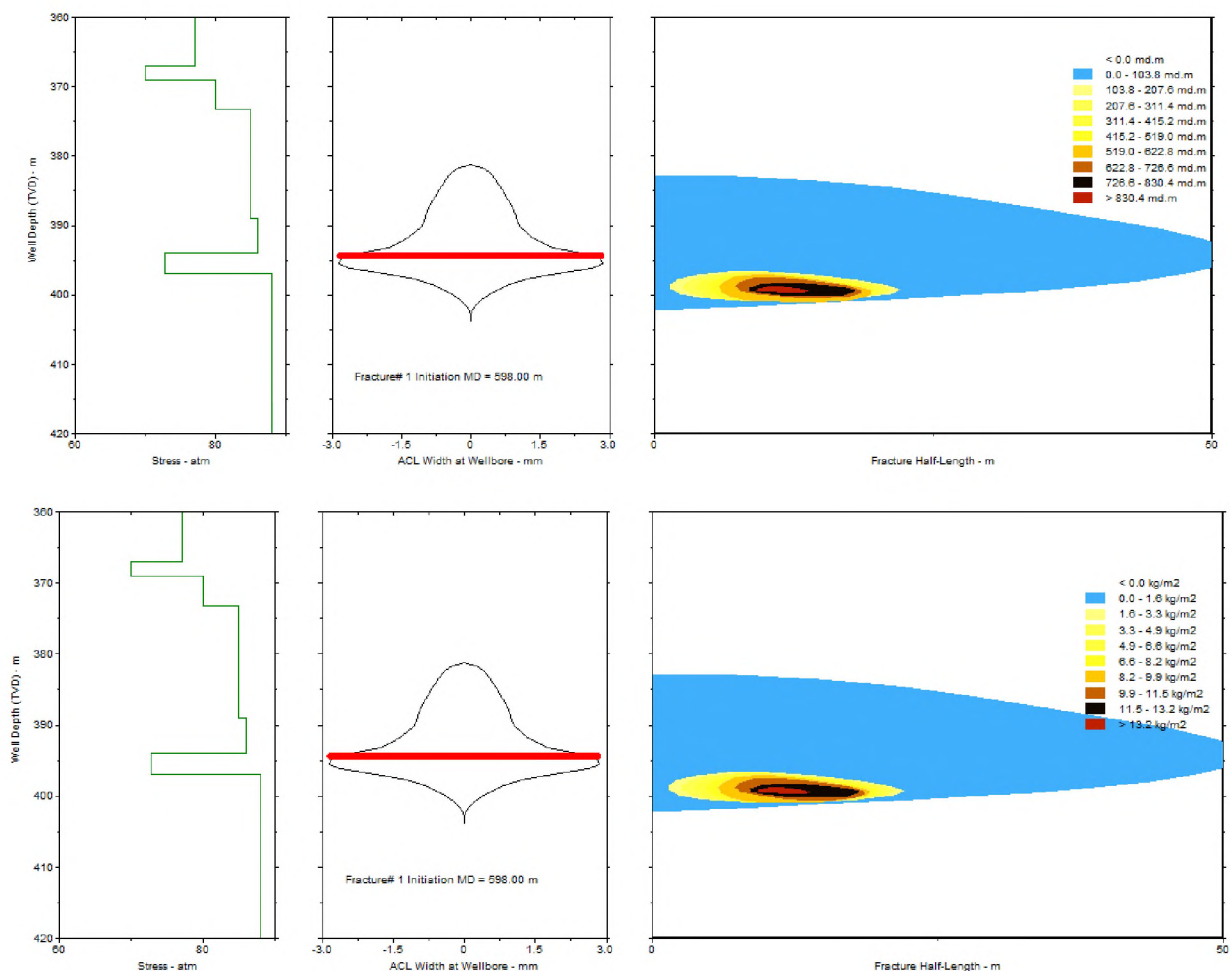
Таблица 2.3 – Программа закачки

| Стадии | Расход, м <sup>3</sup> /мин | Система жидкости | Загрузка гуара, кг/м <sup>3</sup> | Объем жидкости, м <sup>3</sup> | Концентрация пропантa, кг/м <sup>3</sup> | Объем пропантa, кг |
|--------|-----------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
| PAD    | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 8                              | 0                                        | 0                  |
| 0.5    | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 5                              | 50                                       | 250                |
| 1      | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 5                              | 100                                      | 500                |
| 1      | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 5                              | 200                                      | 1000               |
| 2      | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 4                              | 300                                      | 1200               |
| 3      | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 3                              | 400                                      | 1200               |
| 4      | 0.6                         | YF122            | 2.6                               | 1.6                            | 500                                      | 800                |
| FLUSH  | 0.6                         | WF122            | 2.6                               | 3.2                            | 0                                        | 0                  |

Минимальный расход 2 м<sup>3</sup>/мин, ниже этого расхода моделирует призабойный “СТОП”.

Таблица 2.4 – Программа закачки

| Стадии | Расход, м <sup>3</sup> /мин | Система жидкости       | Объем жидкости, м <sup>3</sup> | Концентрация пропантa, кг/м <sup>3</sup> | Объем пропантa, кг |
|--------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
| PAD    | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 8                              | 0                                        | 0                  |
| 0.5    | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 5                              | 50                                       | 250                |
| 1      | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 5                              | 100                                      | 500                |
| 1      | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 5                              | 200                                      | 1000               |
| 2      | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 4                              | 300                                      | 1200               |
| FLUSH  | 2                           | Brine {8.53ppg 4% KCl} | 3.2                            | 0                                        | 0                  |



Proppant Concentration

**Proppant Concentration**  
**t = 846 sec (100% EOJ)**

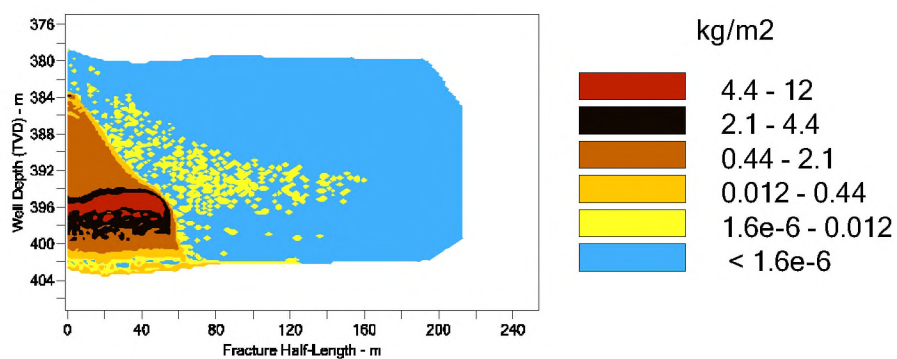


Рисунок 2.4 - Профиль проводимости и концентрации пропанта

2б) Водный раствор КСІ 4%, расход 2 м<sup>3</sup>/мин, максимальная концентрация 300 кг/м<sup>3</sup>, пропант 40/70, тоннаж 3тн. Закрепленная полудлина

40м, гидравлическая полудлина 60м, закрепленная высота 2м, гидравлическая высота 10м ширина <0.2 мм (рис. 2.5).

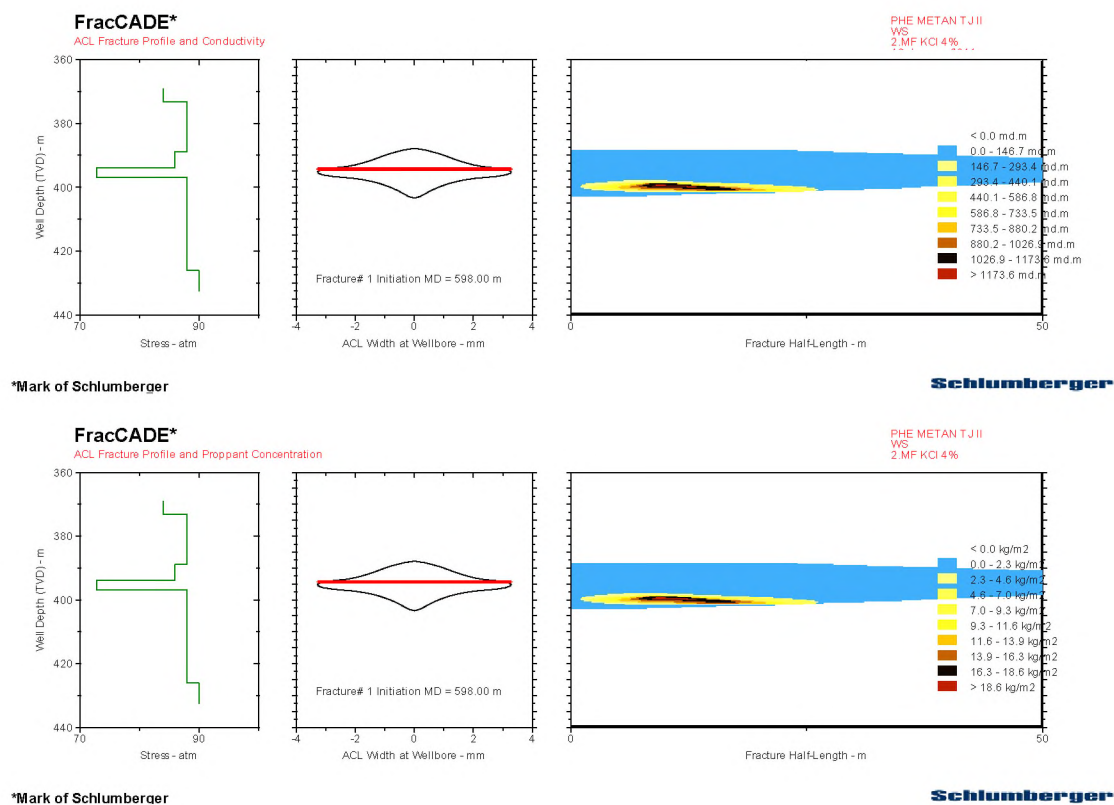


Рисунок 2.5 - Профиль проводимости и концентрации пропанта

3) Водный раствор KCl 4%, расход 0.6 м<sup>3</sup>/мин, Тестовая закачка, объем 20м<sup>3</sup>.

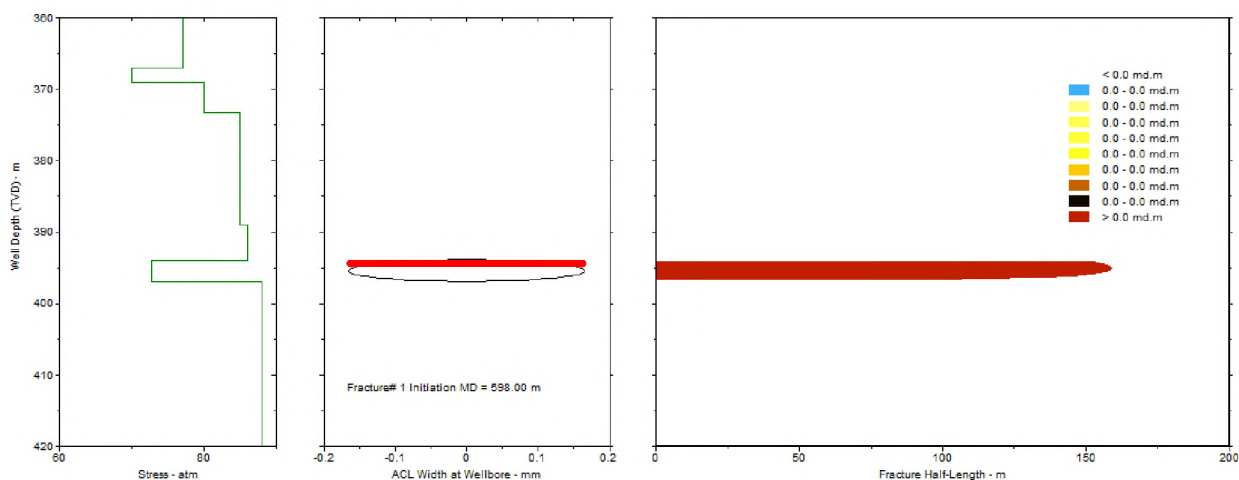


Рисунок 2.6 - Профиль проводимости и концентрации пропанта

Следует отметить, что в условиях шахты Мао Хе, когда достаточно широко используется полевая подготовка, применение гидродинамического воздействия из полевых выработок обеспечивает возможность достаточно простой и эффективной схемы герметизации скважин гидроразрыва, при последующей дегазации пластовыми скважинами.

Кроме этого, важное значение имеет вопрос оптимизации размеров фильтрующей части скважины, через которую осуществляется обработка угольного пласта. Данная задача решалась для условий ш. им. С.М. Кирова.

В качестве объекта для исследований были выбраны две зоны выемочного участка 24-58.

Первая сравниваемая зона 300 метров - зона, где не проводилась обработка, была взята в качестве оценки эффективности стандартной технологии подземной пластовой дегазации. Вторая зона 220 метров – зона подземного гидроразрыва, с которой оценивалась эффективность технологии подземного гидроразрыва (Рисунок 2.7).

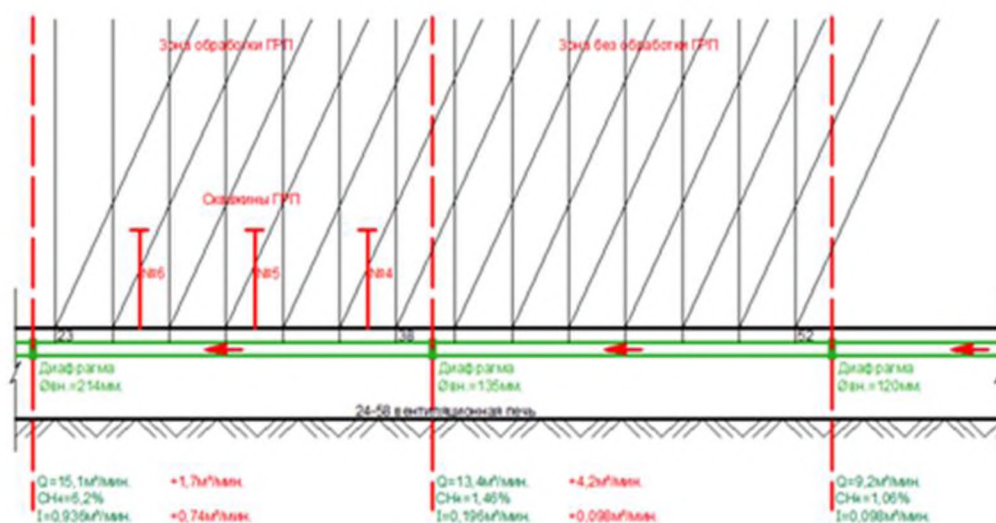


Рисунок 2.7 – Зоны сравнения для исследования

Средняя мощность пласта - 2,22 м и колеблется в пределах 1,9-3 м. Непосредственная кровля пласта – аргиллит мощностью 5.0 м средней крепости и средней устойчивости ( $f=3-4$ ). Непосредственная подошва пласта – аргиллиты

средней крепости ( $f = 3-4$ ), верхний предел которой на мощность 0.2-0.6 м с прожилками угля ( $f=2-2.5$ ).

Глубина залегания пласта 394-464 м. Коэффициент пористости угля 6,4%, прогнозная газоносность – 14 - 16 м<sup>3</sup>/т с б м.

Естественная проницаемость пласта  $(10\div 50) \cdot 10^{-4}$  мД. По данным ФИЦ УУХ СО РАН после гидроразрыва она составила  $0,15\div 0,8$  мД.

Газоносность углевмещающих пород характеризуется низкими значениями от 0,1 до 0,2 см<sup>3</sup>/г. Характеристика вмещающих пород: общая пористость – до 10,08%, открытая пористость – до 9,24%, газопроницаемость – до 0,01 мД.

Для того чтобы оценить влияние длины обсаженного и необсаженного участков скважин подземного ГПП на его эффективность, использовались расчеты на гидродинамических моделях. В гидродинамическом симуляторе разработка метаноугольного пласта моделируется посредством использования опции двойной пористости (одинарной проницаемости) и специальной опции метано-угольного пласта LANGMUIR.

Модель двойной пористости состоит из двух взаимосвязанных систем, представляющих угольную матрицу и систему высокопроницаемых трещин. Связь между матрицей и трещинами выстраивается для моделирования потока между двумя системами. Физические процессы описываются модифицированной моделью Уоррена и Рута.

Ключевое слово DUALPORO отображает модель двойной пористости в виде матричных блоков и системы трещин. Течение жидкости в пласте происходит через сеть трещин, причем матричные блоки действуют как аккумуляторы газа.

Концентрация адсорбированного на поверхности угля метана считается функцией давления, описываемой изотермой Ленгмюра. Изотерма Ленгмюра обозначается ключевым словом LANGMUIR и вводится в виде таблицы с данными по давлению и концентрацией адсорбированного газа.

Соответствующие модели рассматриваемого выемочного дегазационного участка были созданы в программном комплексе RFD tNavigator (Рисунок 2.8).

Параметры моделей были заданы в соответствии с данными выемочного участка 24-58 (Таблица 2.5).

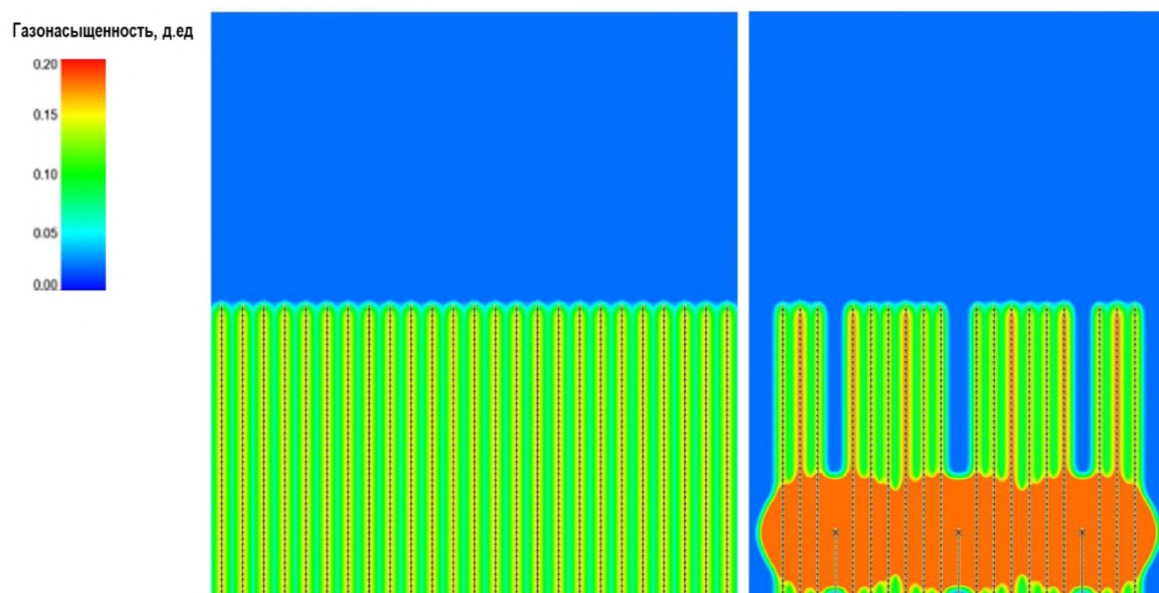


Рисунок 2.8 – Поле распределения насыщенности в моделях без ГРП (а) и с ГРП(б)

Таблица 2.5 – Исходные данные для моделирования

| Параметры                                     | Базовая модель без ГРП | Модель с ГРП |
|-----------------------------------------------|------------------------|--------------|
| Размеры модели, м                             | 300*300                | 220*300      |
| Толщина угольного пласта, м                   | 3                      | 3            |
| Количество скважин под ГРП, шт                | -                      | 3            |
| Расстояние между скважинами ГРП, м            | -                      | 50           |
| Количество дегазационных скважин, шт          | 25                     | 18           |
| Расстояние между дегазационными скважинами, м | 12                     | 12           |
| Длина дегазационных скважин, м                | 150                    | 150          |
| Длина обсаженного фактического ствола, м      | 35                     | 35           |

|                                            |   |   |
|--------------------------------------------|---|---|
| Длина необсаженного фактического ствола, м | 1 | 1 |
|--------------------------------------------|---|---|

Большое значение в решении поставленной задачи имела неопределенность фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) моделируемого выемочного участка метано-угольного пласта. Поскольку достоверные данные о ФЕС пласта отсутствовали, а имеющиеся данные по добыче носили фрагментарный характер, то для получения модели, корректно воспроизводящей добычу, решалась обратная задача. Она заключалась в адаптации ФЕС модели, а именно подбору параметров пласта (пористости и проницаемости трещин и матрицы) и параметров зоны ГРП (размеров зоны влияния, степень улучшения фильтрационно-емкостных свойств этой зоны) таким образом, чтобы оптимизировать невязку получаемой на модели добычи газа с объемами добычи газа по факту. При этом требовалось обеспечить соответствие добычи как по базовому участку сравнения, в котором не происходило ГРП, так и по участку, который подвергался обработке. Для определения зоны влияния ГРП моделировалась закачка жидкости для гидроразрыва в пласт. В ходе закачки, фильтрационные свойства ячеек модели, давление в которых превышало пороговую величину, итеративно улучшались, для обеспечения соответствия фактической и модельной добычи газа.

На Рисунке 2.9 показаны результаты адаптации объемов добычи газа по базовой модели и модели, в которой воспроизводился процесс ГРП. Учитывая неполноту имеющихся данных, результаты расчетов показывают удовлетворительное соответствие фактическим данным, что позволяет использовать модели для дальнейших расчетов.

Для дальнейшего анализа подход с определением зоны улучшения фильтрационно-емкостных свойств в результате ГРП распространялся на другие варианты с различными длинами обсаженного и не обсаженного ствола скважин по ГРП. При этом объем накопленной закачки жидкости для ГРП принимался аналогичным по всем вариантам. В частности были рассмотрены варианты с

длиной обсаженной части ствола скважин равным 35, 70, 100 и 150 метров, а также варианты с длинами необсаженной части ствола составляющими 1, 10, 25 и 50 метров.

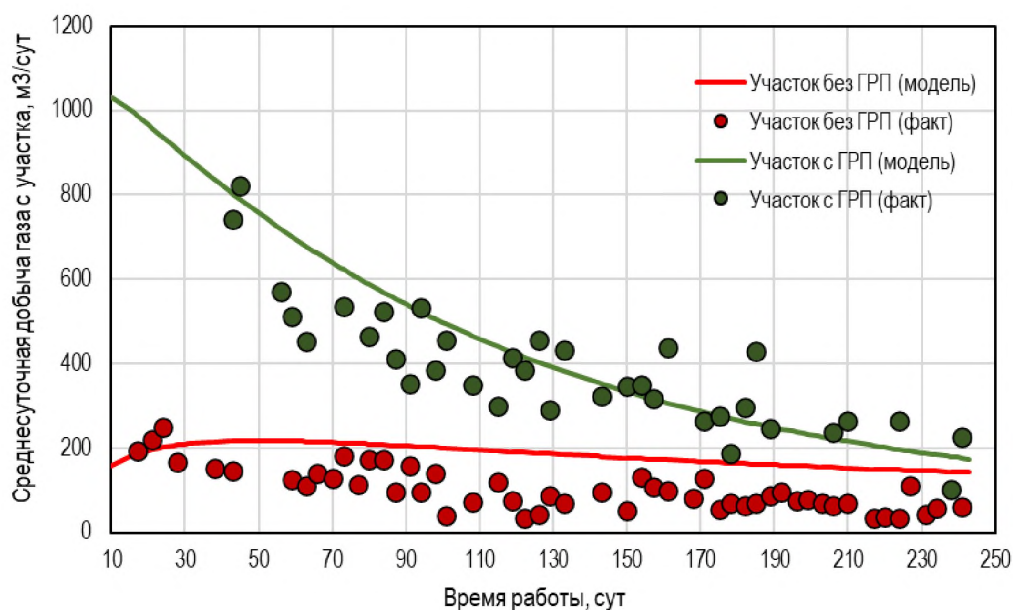


Рисунок 2.9 – Результаты адаптации объемов добычи газа

На рисунке 2.10 показаны зависимости приростов накопленной добычи от соотношения длин частей горизонтального ствола. Первый вариант с приростом 2.7 соответствует для 35м обсаженного ствола и 1 м необсаженного участка (Таблица 1). Данный прирост адаптирован под фактические данные по добыче газа (Рисунок 2.10). Увеличение длины обсаженного ствола до 70, 100 м при необсаженном участке 1 м позволяет увеличить прирост до 2,73 (<5%). Увеличение необсаженной длины ствола до 150 м снижает прирост в накопленной добыче до 2.54, так как уменьшается зона обработки в каждой скважине ГРП.

В зависимости от длины обсаженного участка при одинаковой длине необсаженного участка разный прирост в добыче обусловлен асимметрией расположения зоны улучшенных свойств после ГРП. Расположение скважины в середине участка моделирования позволяет отобрать больший объем газа. Таким образом, максимальный прирост в накопленной добыче 3.58 был получен при 50 м обсаженной длины и 35 м необсаженной длины. Дальнейшее увеличение

длины необсаженного ствола включает негативный фактор сужения области обработки.

Таким образом, исследование по выбору длины обсаженного и необсаженных длин горизонтального ствола подземного ГРП является многопараметрической задачей. Неопределенности в прогнозировании поведения многих свойств угля (распределение трещиноватости, объем трещин, наличие техногенных трещин, газонасыщенность угля в условиях шахты и в массиве) усложняют процесс анализа выходных данных. Увеличение длины необсаженного ствола имеет двойственную природу, при достижении длины большей, чем длины дегазационных скважин отбора (150м) прирост в добыче газа начинает замедляться. В условиях данных участков лучший результат показала конфигурация скважины с обсаженным участком 50м и необсаженным 35 м.

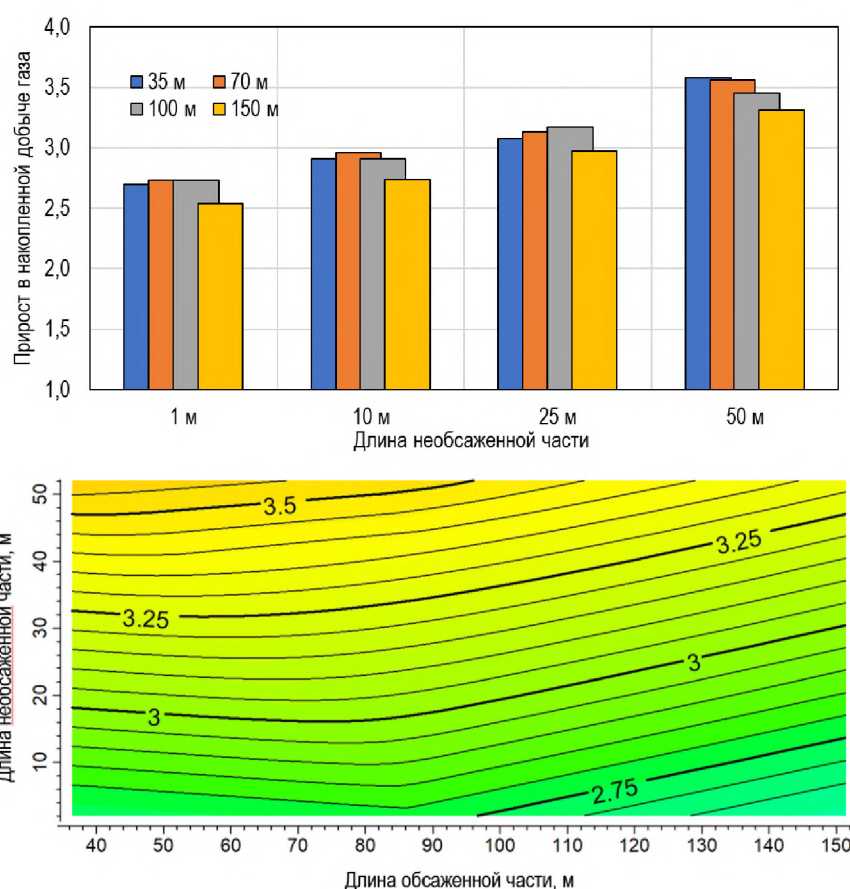


Рисунок 2.10 – Зависимость прироста в накопленной добыче газа от длины обсаженных и необсаженных интервалов скважин под ГРП

## 2.2 Оценка дегазации угольного пласта подготовительными выработками

Известным фактом является процесс естественной дегазации угольного пласта подготовительными выработками. В нормативных документах зоны дегазации в зависимости от времени функционирования выработок и характеристик угля достигают 6-12 м [129]. При этом фактическая зона влияния выработок как показали исследования, проведенные в Карагандинском бассейне может достигать 40-50м [130]. С учетом того, что на шахте Мао Хе длина лав в настоящее время составляет от 60 до 230 м [96] процесс естественной дегазации имеет важное значение для определения целесообразности проведения предварительной дегазации.

Интенсивность естественной дегазации определяется длиной очистного забоя, площадью поверхности выработок, длительностью процесса и фильтрационными свойствами пород кровли и почвы. Дифференциальное уравнение фильтрации, описывающее взаимосвязь указанных параметров имеет вид [131]:

Модель фильтрации метана в угольном пласте с учетом изотермы Лэнгмюра

Основополагающее уравнение, описывающее движение метана в угольном пласте получено в работах [131, 132]

$$\operatorname{div}\left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} p\right)=\frac{\partial}{\partial t}\left[m \rho+(1-m) \frac{a b p}{(1+a p)}\right] \quad (2.1)$$

где  $k$  – проницаемость угля,  $\text{м}^2$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$m$  – пористость угля;

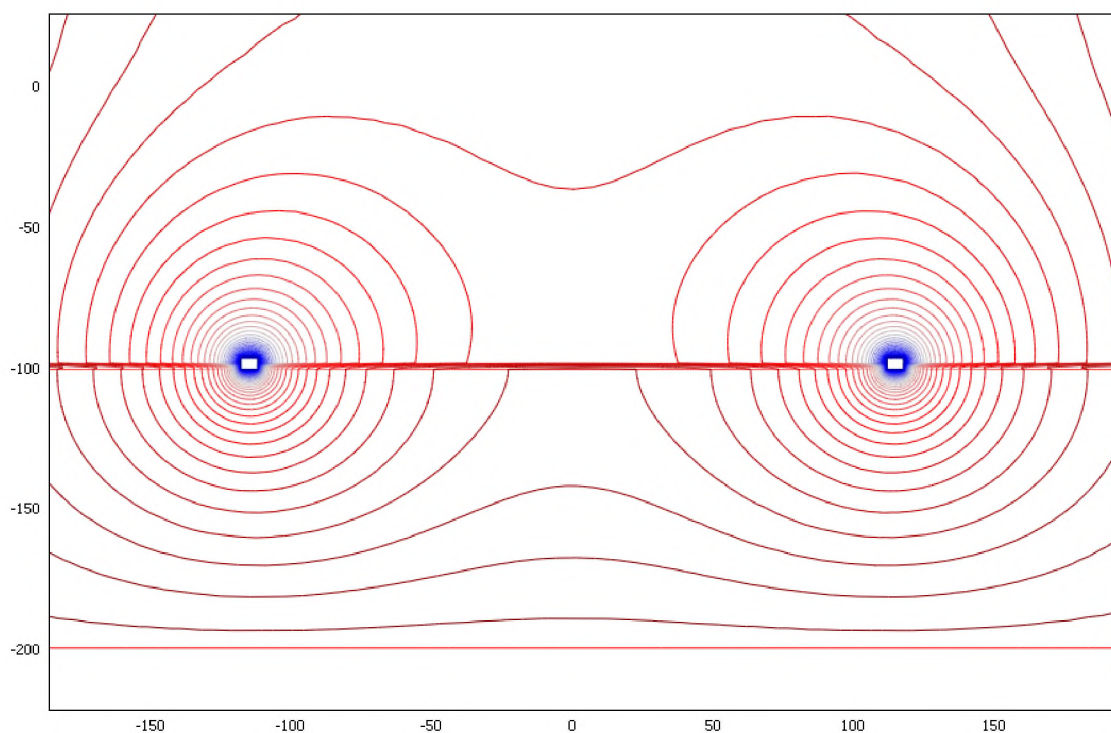
$a, b$  – константы адсорбции;

$p$  – давление газа,  $\text{Па}$ .

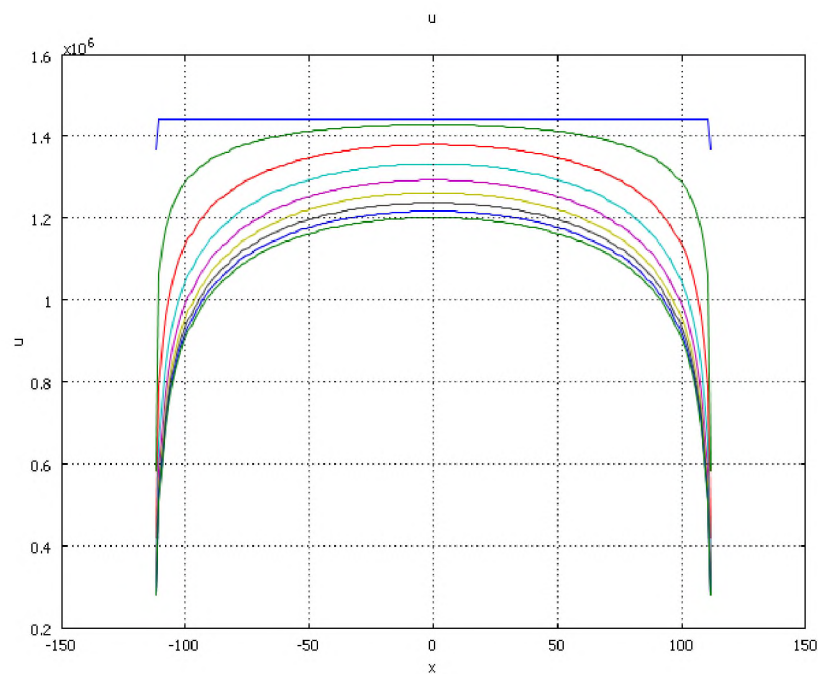
Таким образом, представленное уравнение учитывает закон сохранения массы, линейный закон Дарси, уравнение сорбции Лэнгмюра, а также изменение проницаемости угольного пласта вследствие уменьшения размера угольных матриц по мере перехода метана из связанного в свободное состояние при десорбции (уравнение Палмера-Мансури) [133-135].

Принципиальная расчетная схема представлена на рисунке 2.11. Отметим, что пример носит демонстрационный характер, а фактическая горно-геологическая ситуация может быть уточнена и скорректирована в соответствии с реальной стратиграфической колонкой. При описанных условиях выполнен расчет распределения давления в угольном пласте. Изолинии давления в пласте и вмещающих породах, представленные на рисунке 2.11, характеризуют ситуацию, сформированную через один год функционирования штреков. При этом поверхности штреков с угольным пластом и вмещающими породами имеют свободный контакт при атмосферном давлении газа.

Рассмотрим распределение пластового давления метана в угольном пласте между выработками. Картина распределения давления через каждые три месяца после проходки выработок представлена на рисунке 2.12. Видно, что пласт серединой части (координата  $x=0$ ) между выработками также подвергается дегазации, однако даже через два года пластовое давление падает на величину не более чем на 15%. Очевидно, более интенсивно дегазируется часть пласта, примыкающая к штрекам и данный процесс может иметь весомое значение при расстоянии между выработками менее 100-150м. При больших величинах существует необходимость в специальных дегазационных мероприятиях, например, пластовой дегазации пласта через скважины, пробуренные из горных выработок.



Изолинии давления газа через год эксплуатации выработок  
 Рисунок 2.11 – Расчетная схема и изолинии давления в пласте через  
 один год



Через каждые три месяца, в течение двух лет  
 Рисунок 2.12 – Распределение давления метана в пласте между  
 штреками

На рисунке 2.13 представлена еще одна важная зависимость, описывающая изменение величины притока метана из угольного пласта и вмещающих пород в штреки. Размерность представленной величины –  $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м})$  имеет смысл удельного притока метана на единицу продольного размера штрека. Видно, что с течением времени удельный приток метана уменьшается и через год составляет  $0,018 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м})$ . Тогда, если длина штрека равна 200 м, то в соответствии с исходными данными суммарный приток метана вентиляционную струю составит  $3,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Следовательно, если объемный поток воздуха в вентиляционном штреке составляет  $600 \text{ м}^3/\text{мин}$ , то концентрация метана в воздушной струе на входе в очистной забой составит 0,6%. Данный расчет представляет интерес с точки зрения получения дополнительной информации о фильтрационных свойствах пласта по результатам измерения концентрации метана в воздушной струе в течение времени, в зависимости от геометрии штрека и других параметров отраженных в аналитической модели.

Таким образом, представленная методика позволяет производить расчеты степени дегазации пласта и притока метана в прилегающие к пласту выработки, что представляет практический интерес и в комбинации с аналитическими моделями массопереноса в различных системах разработки является путем оптимизации и повышения технологической эффективности.

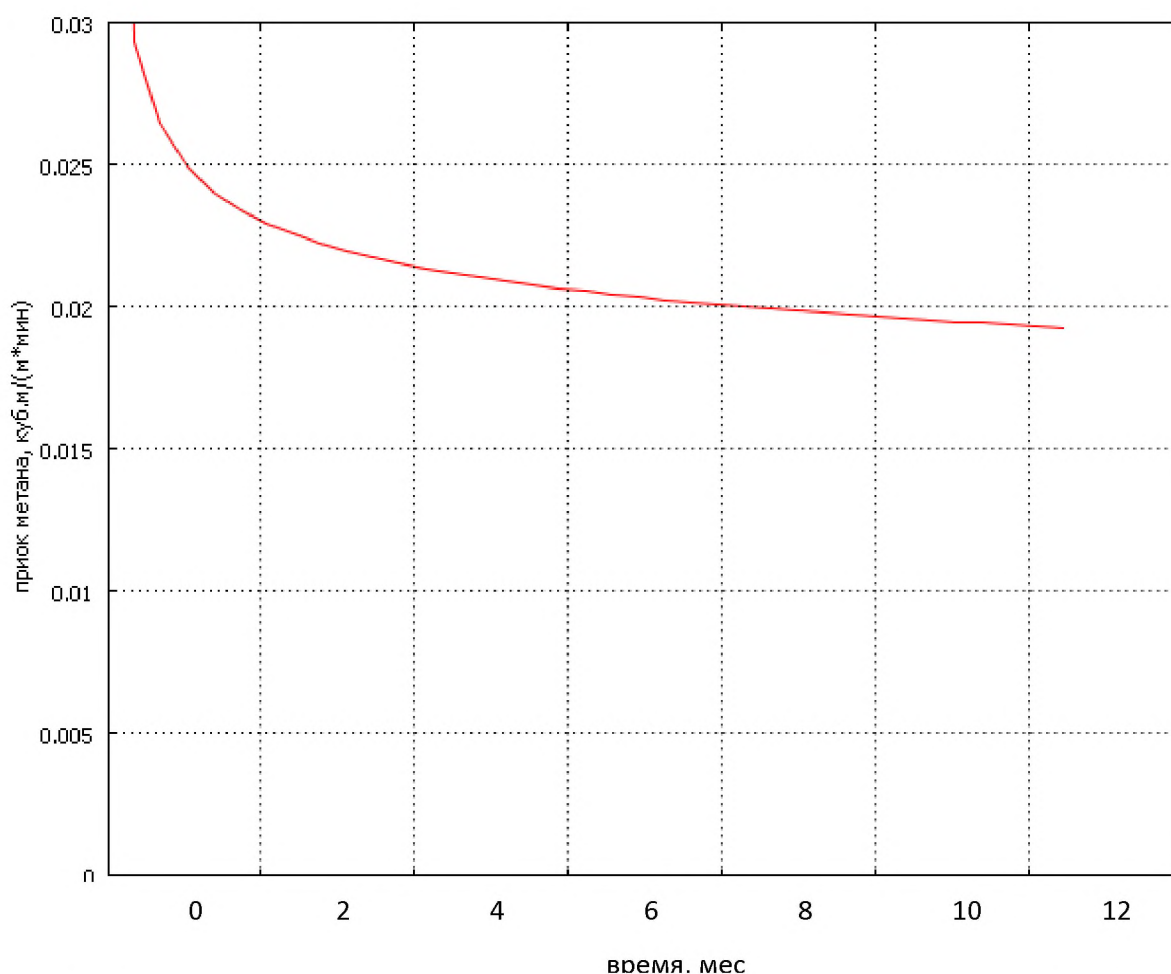


Рисунок 2.13 - Приток метана в штрек (суммарный), куб.м/мин в течение года

### 2.3 Численное моделирование процесса пластовой дегазации угольного пласта группой скважин с учетом сорбции

При пластовой дегазации угольных пластов через скважины, пробуренные из откаточного штрека, необходимо выбрать рациональный шаг расположения скважин и обосновать длительность их функционирования до момента достижения удовлетворительного результата. Количество газа, поступающего в очистную выработку, зависит также от расположения некондиционных тонких угольных пластов и других факторов, таких как газовая проницаемость угля и вмещающих пород, изотермы сорбции метана из угля, фрактальной трещиноватости.

Методика моделирования процесса дегазации пласта опирается на теоретические достижения, описанные в работах [133, 134], и использует возможности современных компьютерных технологий и средств программирования.

Теоретическая модель процесса фильтрации в сплошной среде с каналами проницаемости описывает процесс следующими дифференциальными уравнениями:

в угольном пласте с учетом сорбции:

$$\operatorname{div}\left(\frac{C_1}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} P\right) = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \Pi_1 \rho + (1 - \Pi_1) \frac{abP}{(1 + aP)^2} \right] \quad (2.2)$$

в породах кровли и почвы (отсутствие сорбции)

$$\operatorname{div}\left(\frac{C_{2,3}}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} P\right) = \frac{\partial}{\partial t} [\Pi_{2,3} \rho] \quad (2.3)$$

Перепишем уравнение (2.2) с учетом уравнения состояния идеального газа в изотермическом процессе фильтрации в виде

$$d(P) \cdot \frac{\partial P}{\partial t} - \operatorname{div}(P \cdot \operatorname{grad} P) = 0, \quad (2.4)$$

где 
$$d(P) = \frac{\mu \Pi_1}{C_1} \left[ 1 + Aab \frac{1}{(1 + aP)^2} - 2Aa^2b \frac{P}{(1 + aP)^3} \right];$$

$$A = \left[ \frac{(1 - \Pi_1)}{\Pi_1} \frac{RT}{\mu_{\text{сн4}}} \right].$$

Рассмотрим процесс дегазации для следующих условий: проницаемость угольного пласта ( $C_1$ ) составляет 0,05 мД; проницаемость пород почвы и кровли, соответственно ( $C_2$  и  $C_3$ ) – 0,02 мД; пористость пород кровли и почвы ( $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ ) составляет 0,06; газовое давление ( $P_\infty$ ) – 1,5 МПа

Показатели изотермы сорбции:

$$a = 0.207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}; b = 60,0 \text{ кг/м}^3 ;$$

Промежуточные значения параметров:

$$A = \left[ \frac{(1 - \Pi_1) RT}{\Pi_1 \mu_{сн4}} \right] = \frac{(1 - 0,064 \cdot 0,8) \cdot 8,31 \cdot 300}{0,064 \cdot 0,8 \cdot 16 \cdot 10^{-3}} = 2,887 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$Aab = 2,887 \cdot 10^6 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot 60,0 = 35,857 \text{ (безразмерная)}$$

$$2Aa^2b = 2 \cdot 2,887 \cdot 10^6 \cdot (0,207 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 60 = 1,484 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$$

Размерный параметр для угля

$$\frac{\mu \Pi_1}{C_1} = \frac{1,08 \cdot 10^{-5} \cdot 0,064 \cdot 0,8}{0,05 \cdot 10^{-15}} = 1.106 \cdot 10^{10} \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Выражение функции, входящей в дифуравнение (2.4) принимает вид:

$$d(P) = 1.106 \cdot 10^{10} \cdot \left[ 1 + 35.857 \cdot \frac{1}{(1 + 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot P)^2} - 1,484 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{P}{(1 + 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot P)^3} \right]$$

Значения показателей для пород кровли почвы:

$$a = 0 ;$$

$$\frac{\mu \Pi_{2,3}}{C_{2,3}} = \frac{1,08 \cdot 10^{-5} \cdot 0,026 \cdot 0,8}{0,025 \cdot 10^{-15}} = 8.986 \cdot 10^{10} \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Результаты решения уравнений (2.3), (2.4) методом конечных элементов позволяют детально описать процесс дегазации в пространстве и во времени. На рисунке 2.14 показаны изолинии распределения давления в установившемся

режиме фильтрации, когда происходит максимально возможная дегазация пласта. Установившийся процесс фильтрации реализуется теоретически через неограниченно большое время, исчисляемое годами. На практике длительность существования дегазационных скважин не превышает полугода. Тем не менее, важно оценить степень дегазации по максимуму ожидаемой эффективности.

На рисунке 2.15 показано распределение давления в центральной части между скважинами. В установившемся режиме дегазации давление газа между скважинами понижается от величины 1,43 до не менее 1 МПа. В этом режиме количество метана, выходящее из дегазационных скважин, равно количеству метана, который притекает в пространство между скважинами из вмещающих пород.

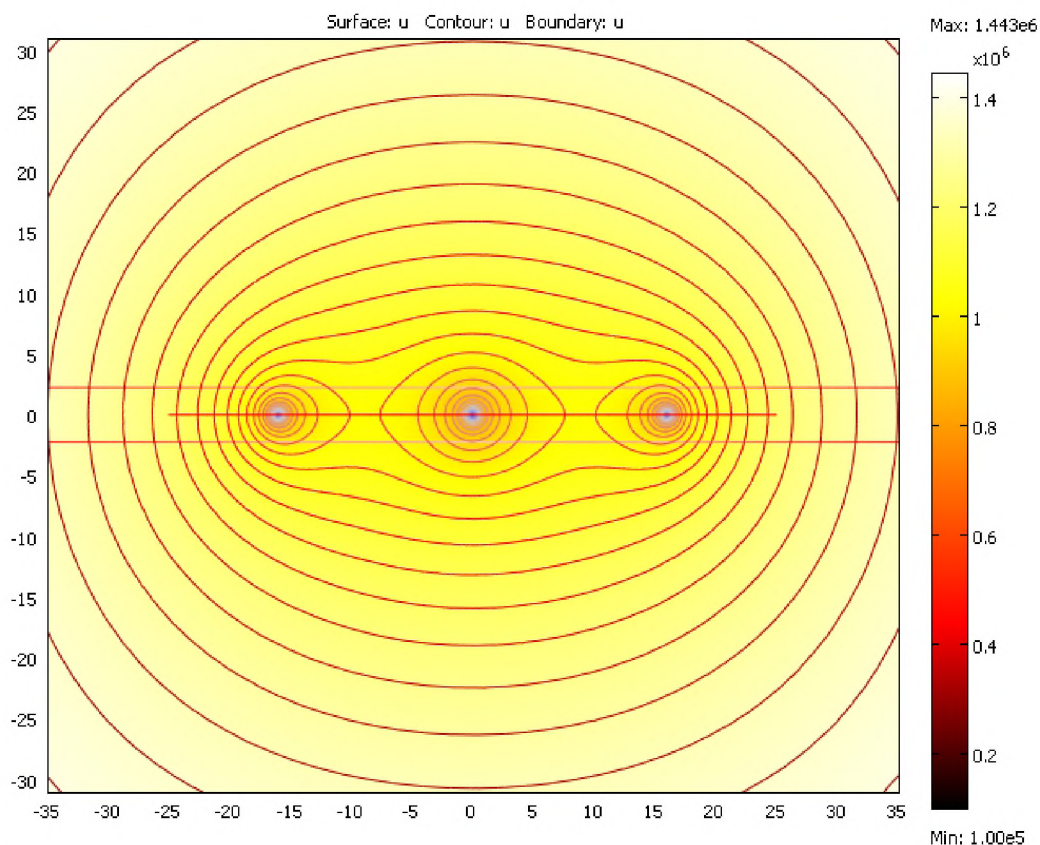
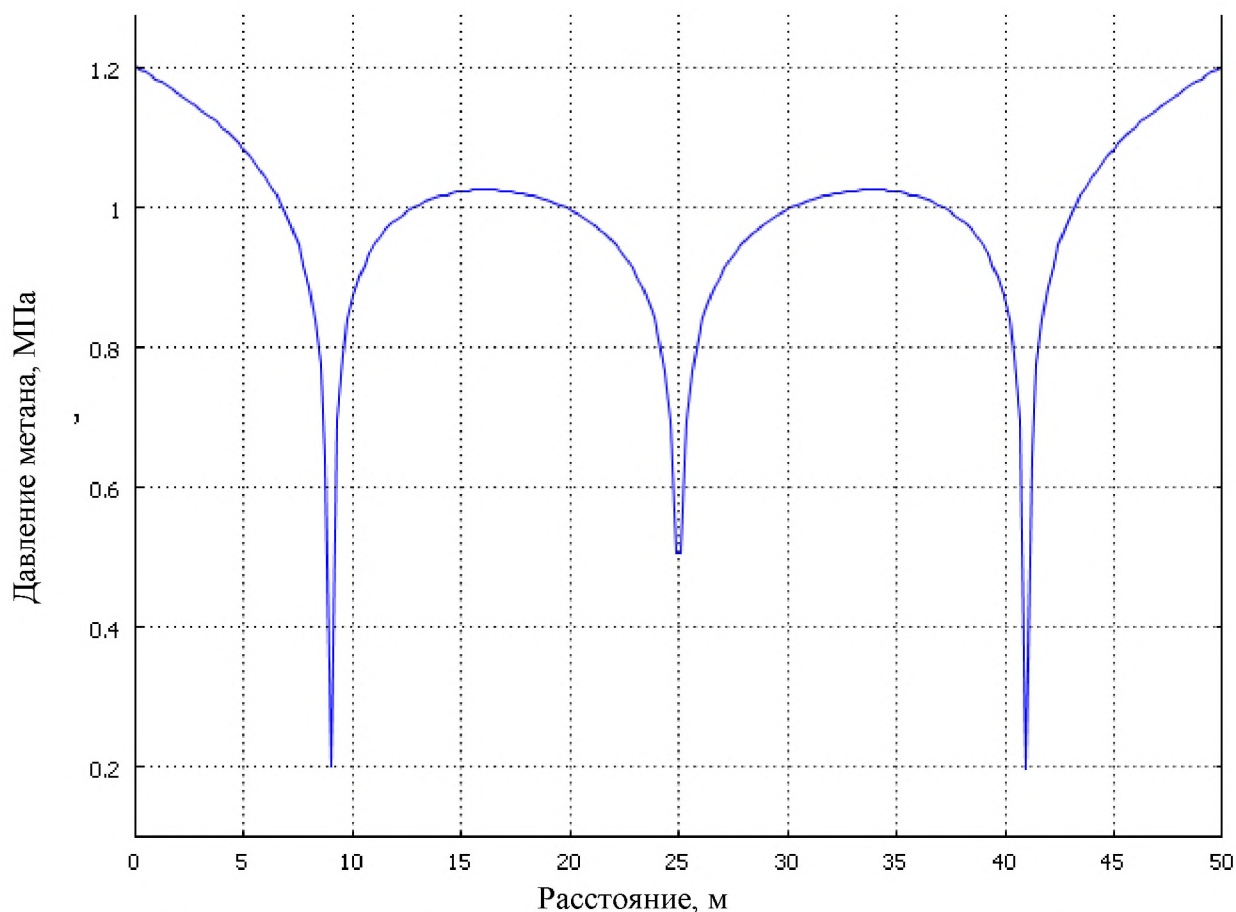


Рисунок 2.14 – Изолинии давления метана вокруг дегазационных скважин



$C_1=0,05 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $C_2=C_3=0,025 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $a=0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ;  $b=60,0 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_r=12,5 \cdot 0,9 \text{ м}^3/\text{т}$ ;  $m=4,5 \text{ м}$ ;  $T=300 \text{ К}$ ;  $\Pi_1=0,064 \cdot 0,8$ ;  $\Pi_2=\Pi_3=0,026 \cdot 0,8$ ;  $\mu=1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ ;  $P_{пл}=14,43 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Рисунок 2.15 – Распределение давления вдоль центральной плоскости пласта в установившемся режиме (через несколько лет)

Интегрирование притока метана в центральную скважину в установившемся режиме показывает, что эта величина составляет  $0,23 \text{ м}^3/\text{мин}$ . В крайних скважинах установившийся дебит несколько выше и составляет  $0,246 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Произведем оценку максимально возможного съема метана из пласта. Если принять во внимание, что среднее давление свободного метана в пространстве вокруг центральной скважины понижается до средней величины  $P_{cp}$ , то съем метана из участка дегазации с учетом изотермы Лэнгмюра составит:

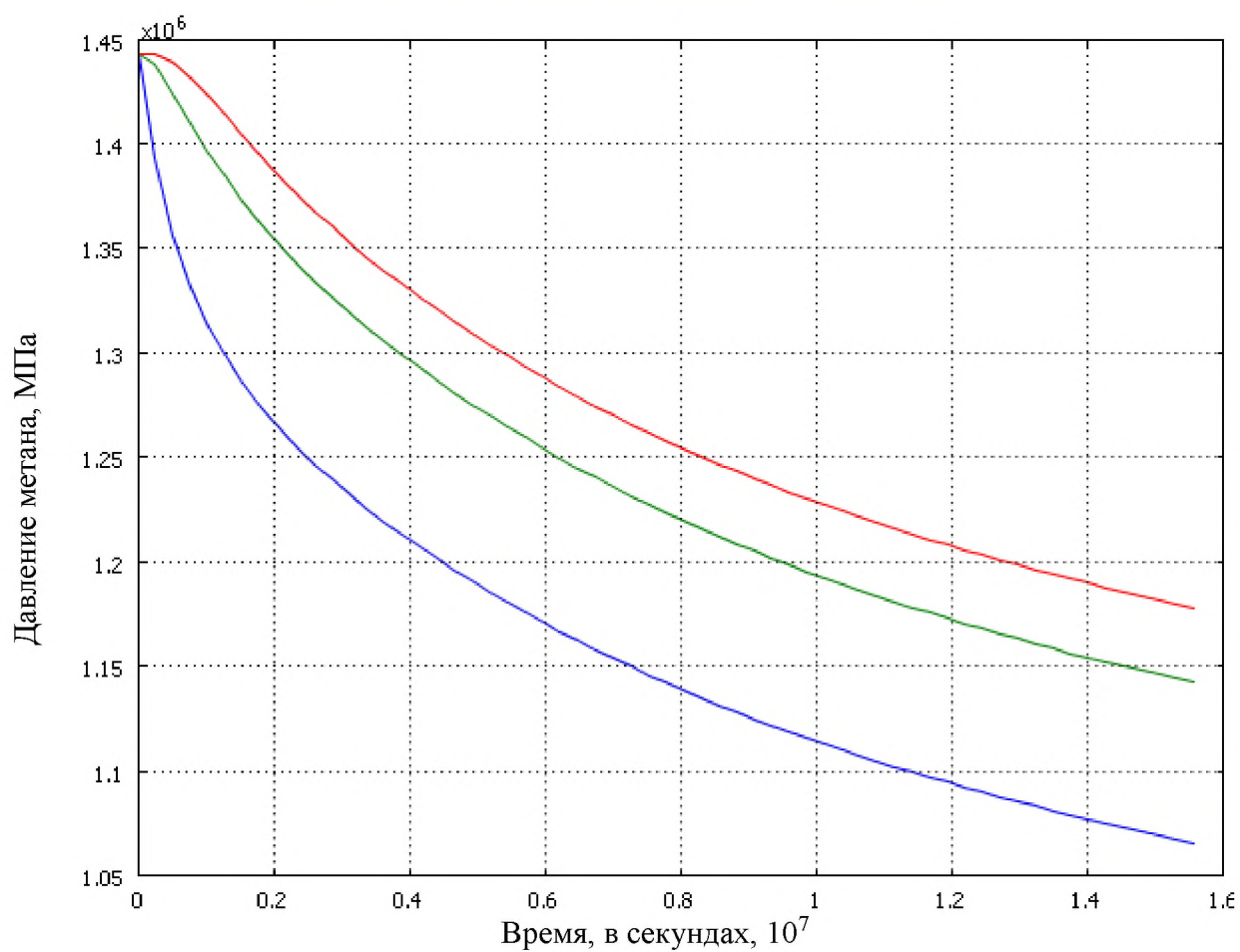
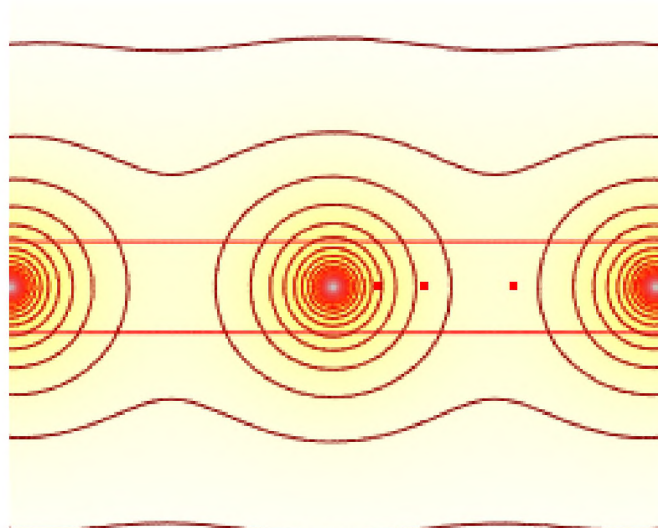
$$\Delta q = \frac{(P_{\infty} - P_0) a \cdot b}{1 + a(P_{\infty} - P_0)} - \frac{(P_{cp} - P_0) a \cdot b}{1 + a(P_{cp} - P_0)} \quad (2.5)$$

В качестве примера, произведем следующий оценочный расчет: если до дегазации первоначальное пластовое давление метана составляло  $P_{\infty} = 1,5 \cdot \text{МПа}$ , а после дегазации средневзвешенное по объему пласта давление метана составило  $P_{\text{ср}} = 0,9 \text{ МПа}$ , то съем метана из участка дегазации, рассчитанный по формуле (2.5), равен  $\Delta q = 4,53 \text{ м}^3/\text{т}$ . При этом содержание метана в пласте понизилось до величины  $8,52 \text{ м}^3/\text{т}$  или в процентах на величину

$$\frac{\Delta q}{q_e} \cdot 100\% = \frac{4,53}{13,05} \cdot 100\% = 34,7\%$$

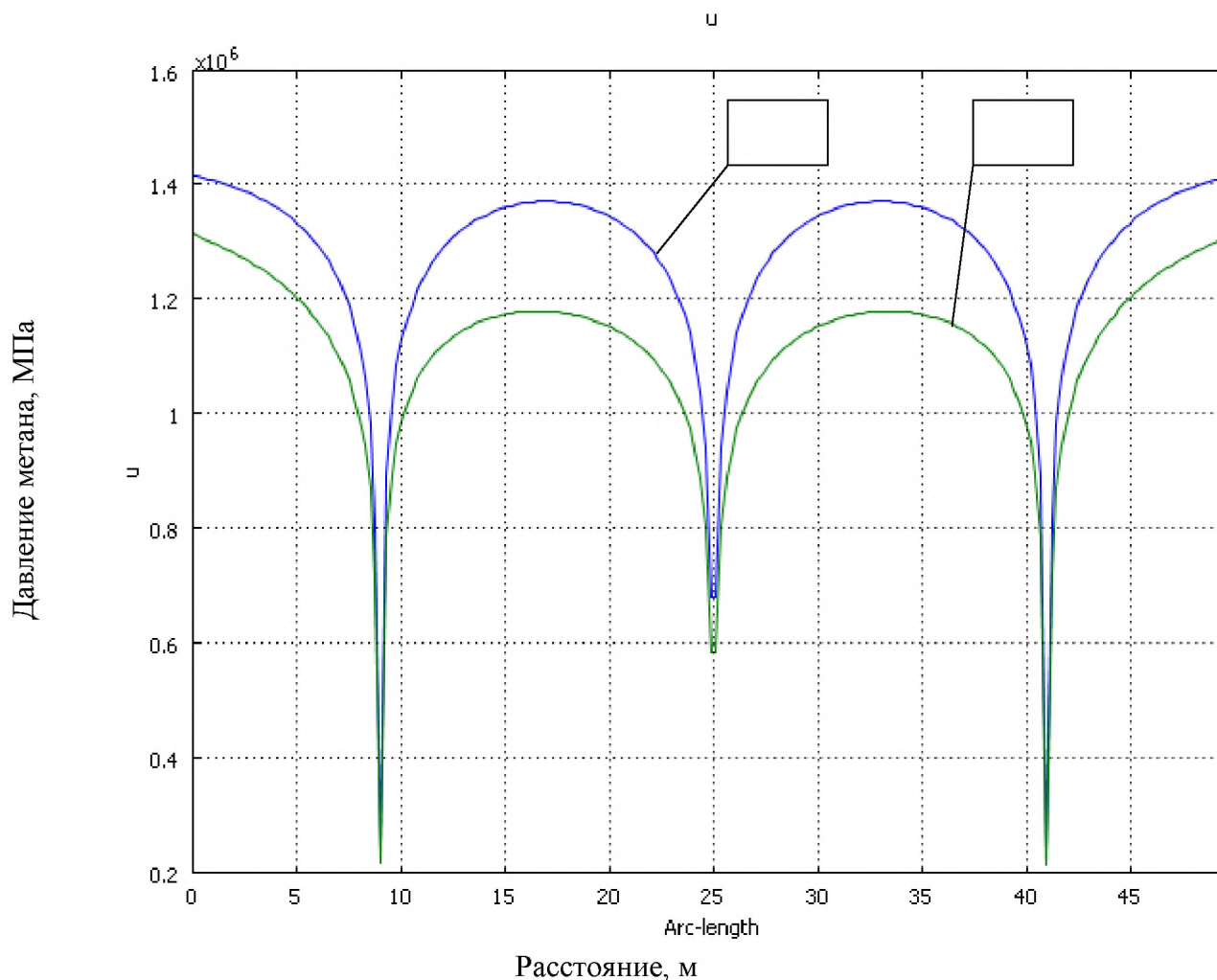
Аналогичная задача при тех же фильтрационных и сорбционных свойствах пласта решена с учетом фактора времени (нестационарная задача фильтрации). На рисунке 2.16 показано изменение давления в трех точках пласта в течение шести месяцев дегазации.

На рисунке 2.17 показано распределение давления газа в пространстве между скважинами через один и шесть месяцев дегазации, соответственно. Понижение давления в центре между скважинами, на расстоянии 9 м от оси составляет 1,18 МПа.



$C_1=0,05 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $C_2=C_3=0,025 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $a=0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ;  $b=60,0 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_r=12,5 \cdot 0,9 \text{ м}^3/\text{т}$ ;  $m=4,5 \text{ м}$ ;  $T=300 \text{ К}$ ;  $\Pi_1=0,064 \cdot 0,8$ ;  $\Pi_2=\Pi_3=0,026 \cdot 0,8$ ;  $\mu=1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ ;  $P_{пл}=14,43 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Рисунок 2.16 - Изменение давления газа в пласте течение шести месяцев дегазации в точках с координатами в: (2,25;0); (4,5;0); (9,0;0)

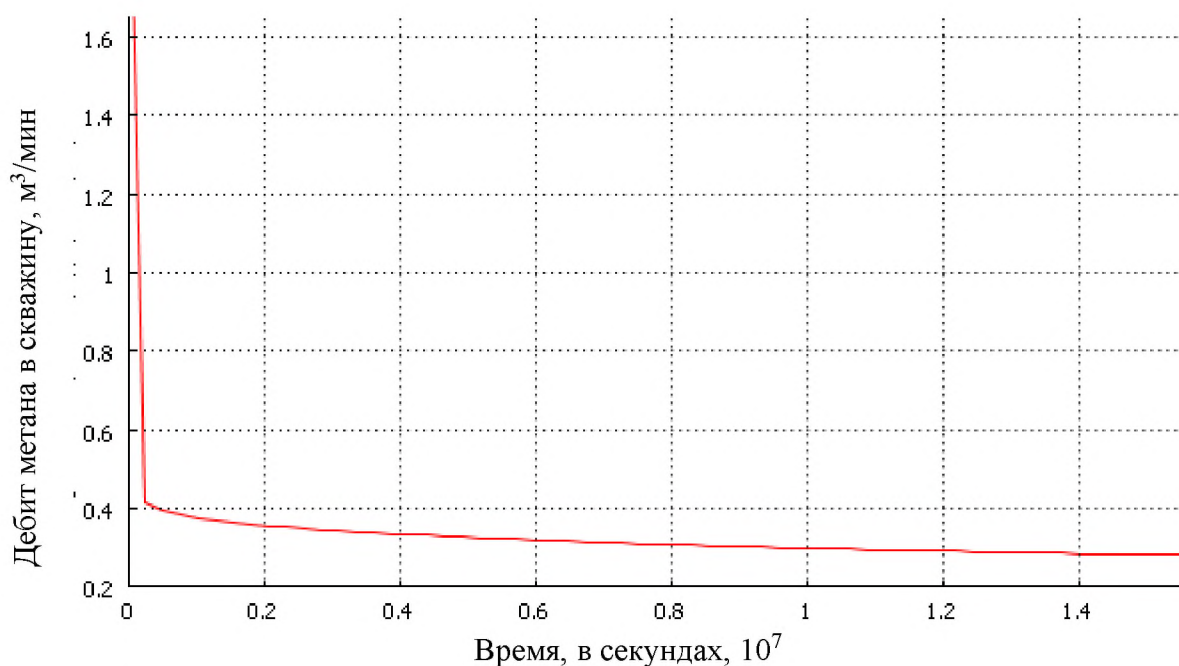


1 – через один месяц дегазации; 2 – через шесть месяцев дегазации

$C_1=0,05 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $C_2=C_3=0,025 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $\alpha=0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ;  $b=60,0 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_r=12,5 \cdot 0,9 \text{ м}^3/\text{г}$ ;  $m=4,5 \text{ м}$ ;  $T=300 \text{ К}$ ;  $\Pi_1=0,064 \cdot 0,8$ ;  $\Pi_2=\Pi_3=0,026 \cdot 0,8$ ;  $\mu=1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ ;  $P_{пл}=14,43 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Рисунок 2.17 – Распределение давления вдоль центральной плоскости пласта через один и шесть месяцев дегазации

На рисунке 2.18 показано изменение дебита метана в течение времени. Интенсивная дегазация происходит из ближней зоны скважины в течение начального времени первых 2-3 суток. В дальнейшем дегазация стабилизируется до величины  $0,23 \text{ м}^3/\text{мин}$ .



$C_1=5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ ;  $C_2=C_3=2,5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ ;  $\alpha=0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ;  $b=50,445 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_r=12,5 \cdot 0,9 \text{ м}^3/\text{т}$ ;  $m=4,5$  м;  $T=300 \text{ К}$ ;  $P_1=0,064 \cdot 0,8$ ;  $P_2=P_3=0,026 \cdot 0,8$ ;  $\mu=1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ ;  $P_{пл}=14,43 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Рисунок 2.18 - Дебит метана из центральной пластовой скважины в течение шести месяцев дегазации ( $0,259 \cdot 10^7 \text{ с} = 1 \text{ мес}$ )

Сопоставление аналитических исследований, представленных на рисунке 2.18 с результатами шахтного эксперимента свидетельствует об общности тенденции резкого падения дебита метана из скважин и последующей стабилизации режима истечения метана с постепенным уменьшением дебита. Теоретическое значение дебита метана через месяц дегазации составляет  $0,35 \text{ м}^3/\text{мин}$  при проницаемости  $C_1=5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ . Значение дебита в шахтном эксперименте через пластовую скважину составляло  $0,09 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Таким образом, можно предположить, что в расчете использовано завышенное значение проницаемости пласта. Если повторить расчет при проницаемости пласта  $C_1=1,3 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ , то получим более точное совпадение эксперимента и теории. В качестве различия отметим, что в шахтном эксперименте отмечается более резкое падение дебита, чем расчетное. Возможно, это связано с тем, что в теоретической модели скважина «включается» в дегазацию сразу же, после «мгновенного» бурения, что не соответствует действительности. В реальном

процессе после бурения и обустройства скважины проходит несколько суток, в течение которых угольный пласт отдает через скважину не учтенный в эксперименте газ.

Сопоставляя данные теории и практики можно сделать прогноз об ожидаемой проницаемости пласта. При установившихся дебитах метана в шахтном эксперименте  $0,025 \dots 0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$  прогнозные значения проницаемости находятся в пределах:

$$(0,325 \dots 1,3) \cdot 10^{-17} \text{ м}^2.$$

## **2.4 Анализ факторов, определяющих метановыделение разрабатываемого пласта и допустимую нагрузку на очистной забой**

После того как уголь отбит он попадает на конвейер (забойный конвейер) и движется в направлении штрека. Само собой, при отбивании угля происходит его разрушение и из порового пространства угля в атмосферу забоя попадает  $\text{CH}_4$  (метан) идет резкое повышение его концентрации вплоть до предельно допустимого значения. Удельная поверхность угля, то бишь его размер определяет концентрацию  $\text{CH}_4$  в забое, чем дисперснее уголь, тем больше концентрация метана. Данный тезис наталкивает на идею использования этого явления для регулирования выделения метана. Регулировка дисперсности отбиваемого угля, возможна путём изменения формы зубьев комбайна, регулируя размер зубьев (или проще говоря твердосплавных вставок) можно управлять гранулометрическим составом отбиваемых ископаемых. Комбайновая выемка дает мелкие куски угля, а струговая выемка дает более мелкий уголь, поэтому при использовании комбайновой выемки уголь находящийся на транспортном конвейере даст меньшее количество метана. Данный факт является известным и широко используется, то есть соотношение метода с гранулометрическим составом отбиваемого угля и определяется все это горно-геологическими условиями конкретной выработки.

Комбайн может загораживать путь вентиляционным потокам и концентрация метана может повыситься. Положение его вблизи конвейерного штрека ухудшает приток метана в струю забойного конвейера. Очистной забой является самым большим источником  $\text{CH}_4$  из угольного пласта. На пласт оказывает давление горная порода, что инициирует процесс миграции метана к свободной поверхности (в атмосферу призабойного пространства). Если конвертный штрек и сам конвейер разнесены в пространстве на большое расстояние, то это приводит к снижению концентрации метана, хотя время транспортировки значительно увеличивается. Как видно данные характеристики противоположны друг другу, значит есть некое среднее значение (положение комбайна в забое), при котором поток метана в лаву не будет превышать максимальное допустимое значение и скорость разработки угольного пласта будет максимальной.

Данная задача решается практическим путем и представляет первостепенное значение, так как правильное положение комбайна определяет возможность проведения безопасной работы. Скорость передвижения отбитого угля по конвейеру также влияет на баланс метана в атмосфере шахты, чем скорость продвижения отбитого угля ниже, тем ниже и концентрация метана. Правильная регулировка скорости продвижения конвейера в идеализированном случае (он скорее теоретический и недостижимый), можно получить практически нулевую концентрацию метана, так как он не будет успевать накапливаться и сразу будет выноситься вентиляционным потоком. В этой связи скорость движения конвейера стараются задавать максимальной и притоки метана максимально сокращаются.

На шахте устанавливается наличие пластов, угрожаемых по горным ударам, на основе анализа механических свойств, глубины залегания, мощности и тектонической нарушенности пластов и боковых пород по специальной методике. При наличии угрожаемых по горным ударам пластов производят прогноз удароопасности.

Таким образом, на ранних стадиях разработки шахтного поля или его участка достаточно достоверно можно выявить наличие угрожаемых по динамическим явлениям пластов. Но конкретные опасные участки выделяют только в процессе эксплуатации, когда уже происходит выделение сейсмической энергии.

Эффективность и надежность прогноза удароопасности месторождений, регионального прогноза в процессе их отработки могут быть значительно повышены, если использовать знания о блочном строении массива горных пород в районе месторождения, о взаимодействии блоков и, как результат этого, о напряженном состоянии нетронутого массива в каждом блоке. Согласно разработок по геодинамическому районированию, геодинамически опасные зоны возникают на участках между фрагментами границ блоков и вблизи тектонических нарушений. Вместе с тем известно, что не все тектонические нарушения и границы блоков являются опасными. В практике ведения горных работ отмечено также, что опасными могут быть только отдельные участки массива вдоль смесителя нарушения.

Обратной задачей является оценка факторов, влияющих на нагрузку на очистной забой при отработке угольных пластов. Данная задача решена на базе использования ПО [138] для следующих горно-геологических условий: пористость угля - 4,5% (0,045); пористость пород почвы и кровли: 4,0% (0,040); объемная масса угля - 1310 кг/м<sup>3</sup>; проницаемость угля -  $0,5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>; проницаемость кровли и почвы -  $0,2 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>; температура метана в пласте - 30°K; вязкость метана -  $1,08 \cdot 10^{-5}$  Па·сек; вынимаемая мощность угля - 4,0 м; длина очистного забоя - 300 м; ширина заходки комбайна в забой - 0,8 м; коэффициент раскрытия трещин в отбитом угле, зависящий от кусковатости - 0,7; минимальное сечение очистной выработки - 9,6 м<sup>2</sup>; критическое содержание метана в струе, (1%) - 0,01; максимальная скорость воздуха в очистной выработке - 4 м/сек. Проведенная оценка позволяет сделать следующие выводы:

- если газоносность уменьшаются от 14 до 9 куб м /т то в этом случае нагрузка возрастает почти в 2,5 раза;

- влияние пластового давления аналогично фактору газоносности, что естественно, а также определяется параметрами Ленгмюра. При снижении пластового давления с 2,6 МПа до 1,5 МПа нагрузка на забой возрастает в 2,5 раза;

- при увеличении пористости угля с 2% до 6%, нагрузка уменьшается в 1,75 раза;

- при снижении проницаемости угля с  $0.5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$  до  $0,05 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$  нагрузка возрастает с 6811 т/сут. до 19500 т/сут, т.е. в 2,9 раза.

## **Выводы по главе 2**

1) Расход 10 л/с при проведении ГРП является расходом приемистости пласта, обычно ГРП проводят при расходах  $> 2 \text{ м}^3/\text{мин}$ . При исходном расходе маловязкие сшитые гели имеют достаточную несущую способность для пропанта. Для водных растворов расход необходим выше, при расходе  $2 \text{ м}^3/\text{мин}$  происходит оседание пропанта по низу целевого пласта, ухудшение призабойного контакта трещины со скважиной.

2) Было проведено сравнение геометрий трещин в случае разных напряжений на верхнем крепком песчанике. В втором случае высота трещины ограничена плотным верхним барьером, рост преимущественно происходит в нижний аргиллит.

3) В третьем варианте рассматривалась возможность пульсовой закачки воды без песконосителя. Данные работы проводились Lambert and Trevits and Mahoney на тонкослоистом угле толщиной 0.76 м на глубине примерно 366 м. Махони и др. сообщили, что уголь расщеплялся водой, а затем обрабатывался со скоростью 2-6 бар/мин ( $0.3\text{-}0.95 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) пеной, содержащей флуоресцентную краску. Величина суточной выработки после стимуляции была описана как приемлемая. Проверка показала, что как вертикальные, так и горизонтальные поверхности были окрашены краской по всей эллиптической области, и

частично трещина состояла из множества параллельных поверхностей внутри естественно разрушенного угля. Авторы сообщили, что трещины не распространялись в пласты, лежащие выше угольного пласта. Таким образом, был достигнут желаемый контроль роста высоты [136]. В работах, где имеются сравнения, гидроразрыв пласта без расклинивающего агента оказался менее эффективным, чем обработка расклинивающим материалом. Тем не менее, в некоторых случаях было доказано, что этот метод жизнеспособен [136].

4) применение традиционных параметров гидрообработки приводит к раскрытию трещин в кровле и почве пласта, что снижает эффективность дегазационной подготовки.

5) моделирование процесса дегазации показывает, что в условиях шахты им. Кирова максимальный результат показала конфигурация скважины с обсаженным участком 50м и необсаженным 35 м, для эффективного моделирования процесса необходимым условием является определение фильтрационно-емкостных показателей угля и вмещающих пород, которые могут уточнены на основе решения обратной задачи о газовыделении в подготовительных выработках.

6) для условий шахты Мао Хе, где длина лав в настоящее время составляет от 60 до 230 м процесс естественной дегазации подготовительными выработками имеет важное значение для определения целесообразности проведения предварительной дегазации, т.к. может обеспечить до 20% съема метана.

### **ГЛАВА 3. Исследование перспективных проблем разработки угольных пластов на шахтах Куангниньского угольного бассейна СРВ**

#### **3.1 Оценка метаноопасности шахт**

Угольные шахты являются производственными объектами с повышенной опасностью труда, особенно разработка угольных пластов с опасным по метану ещё более высокой степенью этой опасности. Из-за этого необходимости применения комплексно-специальных технических решений и мер, направленных на его снижение и обеспечение содержания вредных и опасных газов в шахтной атмосфере в пределах безопасных норм.

Рост глубины горных работ приводит к усложнению условий добычи угля и повышению метаноносности угольных пластов. По данным генеральной угольной компании «Винакомин» Вьетнама шахты Маохе, Куангхан, Хечам, Зыонгкюй и др. характеризуются высокими метанообильностью и метаноносностью угольных пластов [123-125]. Результаты категории по метанообильности и метаноносности для шахт Куангниньского угольного бассейна Вьетнама по приказу № 595/QĐ –ВСТ выдано 22.02.2018, приведены на табл.3.1.

Таблица 3.1 - Категория по метанообильности и метаноносности для шахт Куангниньского угольного бассейна Вьетнама

| №  | Шахты     | Метанообильность<br>$\text{м}^3/\text{т}_{\text{сут. добычи}}$ | Метаноносность<br>$\text{м}^3/\text{т}$ | Категория шахт  |
|----|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| 1  | Маохе     | 23,52                                                          | 3,93                                    | Сверхкатегорная |
| 2  | Хечам     | 14,7                                                           | 4,49                                    | III             |
| 3  | Куангхань | 10,97                                                          | 2,45                                    | III             |
| 4  | Монгзыонг | 7,5                                                            | 2,03                                    | II              |
| 5  | Халонг    | 5,07                                                           | 1,8                                     | II              |
| 6  | Зыонгкюй  | 6,9                                                            | 2,4                                     | II              |
| 7  | Хетам     | 8,5                                                            | 2,3                                     | II              |
| 8  | МТВ - 86  | 8,2                                                            | 1,8                                     | II              |
| 9  | Вангзань  | 3,57                                                           | 0,09                                    | I               |
| 10 | Халам     | 3,6                                                            | 1,02                                    | I               |
| 11 | Наммау    | 1,09                                                           | 0,75                                    | I               |

Анализ взрывов метана и пылевоздушных смесей с человеческими жертвами, которые происходят практически на всех шахт угледобывающих странах мир. Не являются исключением и угольные шахты Вьетнама. В период с 1997г. по настоящее время на шахтах Куангнинского угольного бассейна Вьетнама произошло 8 взрывов метана, погибли 72 человека, что иллюстрируется данными, приведенными в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Взрывы метана на угольных шахтах Вьетнама в период 1997-2018

| №     | Шахты       | Год  | Время | Количество человеческих жертв |
|-------|-------------|------|-------|-------------------------------|
| 1     | Камфа       | 1997 | 15:00 | 1                             |
| 2     | Маохе       | 1999 | 8:00  | 19                            |
| 3     | Донгбак     | 1999 | 19:30 | 1                             |
| 4     | Шуойлай     | 2002 | 8:30  | 7                             |
| 5     | Шахт №909   | 2002 | 19:00 | 6                             |
| 6     | Тхонгнат    | 2006 | 8:30  | 8                             |
| 7     | Хечам       | 2008 | 1:20  | 11                            |
| 8     | Донгбак №86 | 2012 | 5:30  | 4                             |
| 9     | Шуойлай     | 2012 | 20:30 | 11                            |
| 10    | Донгвонг    | 2014 | 19:30 | 6                             |
| Итого |             |      |       | 72                            |

Отсутствие достоверных данных о газоносности угольных пластов является одними из основных причин, приводящих к взрыву метана, что затрудняет разработку и использование мероприятий по управлению газовым режимом шахт, кроме этого другой причиной являются не обеспечение проветривания выработок в выходные дни и субъективность с неисправностью приборов.

В настоящее время более 95% угольной продукции во Вьетнаме производится на шахтах Куангнинского угольного бассейна из 25 подземных угольных шахт и 6 карьеров [126]. Для обеспечения безопасной величины концентрации газа в рудничном воздухе основным способом в настоящее время

является проветривание шахты. Однако для обеспечения высоко гарантированных условий безопасности и с учетом проблем обеспечения горных выработок необходимым количеством воздуха при отработке угольных пластов с категорией по метанообильности и метаноносности выше III возникла необходимость не только совершенствования вентиляционной системы, но и разработки новых подходов к дегазации угольных пластов, которые в перспективе обеспечат и использование шахтного метана как энергического сырья.

### **3.2 Исследование метаноносности и относительной метанообильности угольных пластов на шахте Мао Хе**

Метаноносность угольных пластов на шахте Маохе, а также на шахтах угольного бассейна Куангнинь зависит от множества различных факторов. В основном метаноносность угольных пластов зависит от степени метаморфизма угля, глубины залегания угольного пласта, гидрогеологических условий шахты, наличия и характера геологических нарушений в залегании угольных пластов.

Результаты определения метаноносности угольных пластов и измерений содержания метана в скважинах, выполненные при доразведке угольных пластов на шахте Маохе в 2018 году, представлены на рис.3.1.

Определение метаноносности угольных пластов в зависимости от глубины разработки прогнозируется на основе многолетней статистики и использования результаты измерений на различных глубинах в текущем и предыдущем годах. Результаты измерений метаноносности для угольных пластов шахты Маохе показывают, что метаноносность в угольных пластах увеличивается с глубиной их залегания.

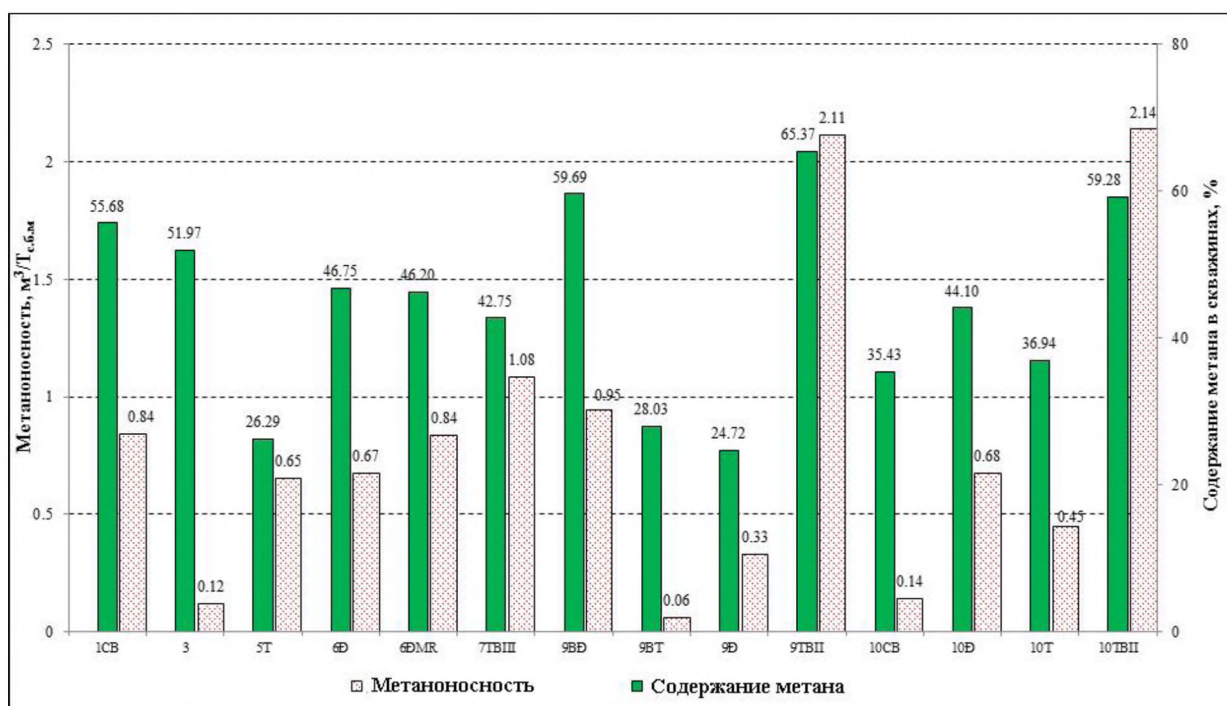


Рисунок 3.1 - Метаноносность и содержание метана в скважинах на шахте Маохе

Для уточнения оценки опасности ГДЯ установлены зависимости кривые отражающие связь метаноносности с глубиной залегания угольных пластов (Рис.3.2 - 3.5). Эти зависимости представлены формулами (3.1 - 3.4).

$$\text{Пласт 9D: } y_1 = -4E - 06x_1^3 - 0,0008x_1^2 - 0,0686x_1 + 3,89 \quad (3.1)$$

$$\text{Пласт 9Т: } y_1 = 2E - 07x_2^3 + 0,0002x_2^2 - 0,0297x_2 + 3,0434 \quad (3.2)$$

$$\text{Пласт 7D: } y_1 = -1E - 06x_3^3 - 0,0003x_3^2 - 0,0375x_3 + 1,2558 \quad (3.3)$$

$$\text{Пласт 9ТВШ: } y_1 = 1E - 06x_4^3 + 0,0003x_4^2 + 0,0035x_4 - 0,0391 \quad (3.4)$$

где:  $y$  – метаноносность угля, м³/Тс.б;  $x$  – глубина залегания угольных пластов, м.

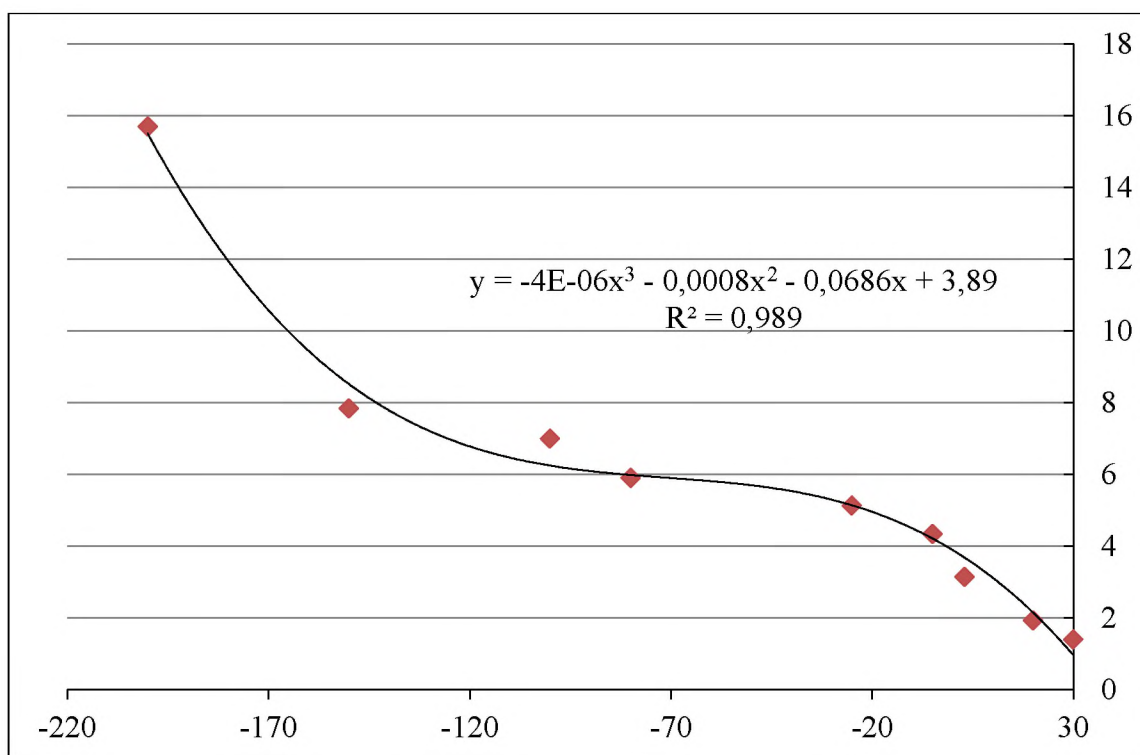


Рисунок 3.2 – Изменение метаносности угольного пласта «9D» с глубиной залегания

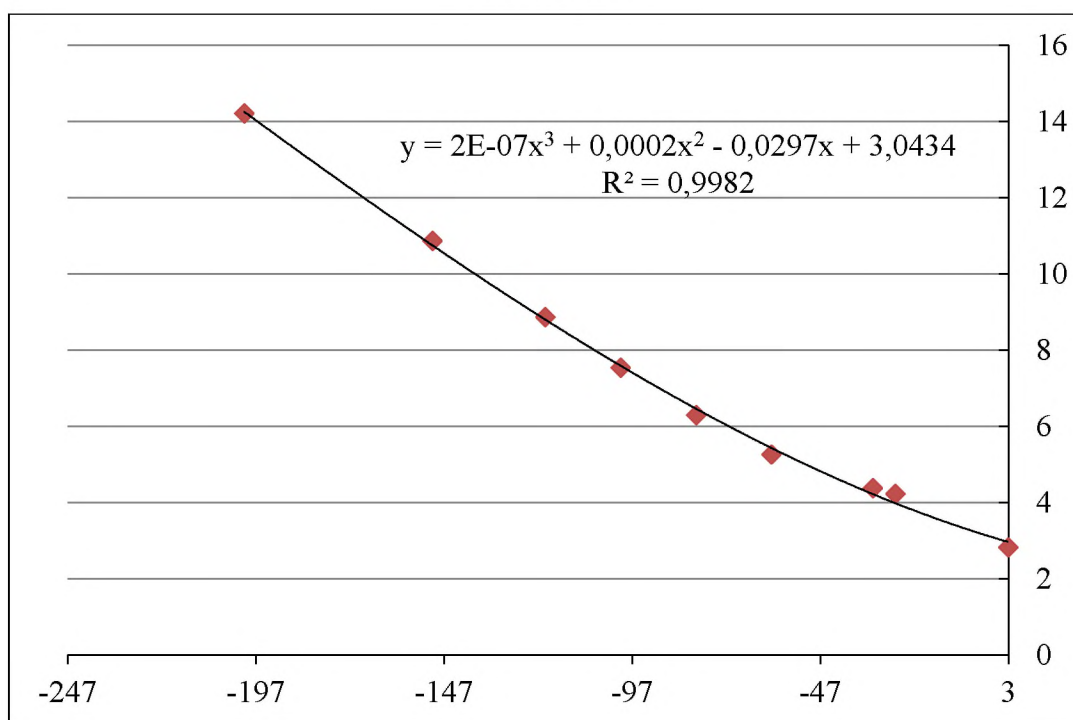


Рисунок 3.3 – Изменение метаносности угольного пласта «9Т» с глубиной залегания

Установленные зависимости (3.1) – (3.4) могут быть использованы для прогноза метанообильности подготовительных и очистных забоев, прогноза параметров и оценки эффективности дегазации, а также для оценки остаточных ресурсов метана.

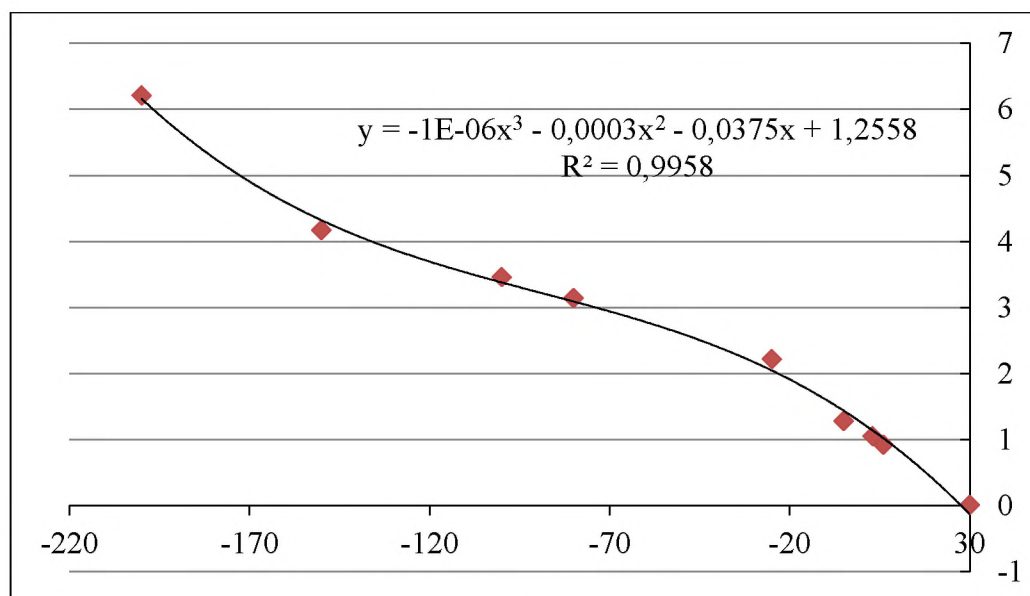


Рисунок 3.4 – Изменение метаноносности угольного пласта «7D» с глубиной залегания

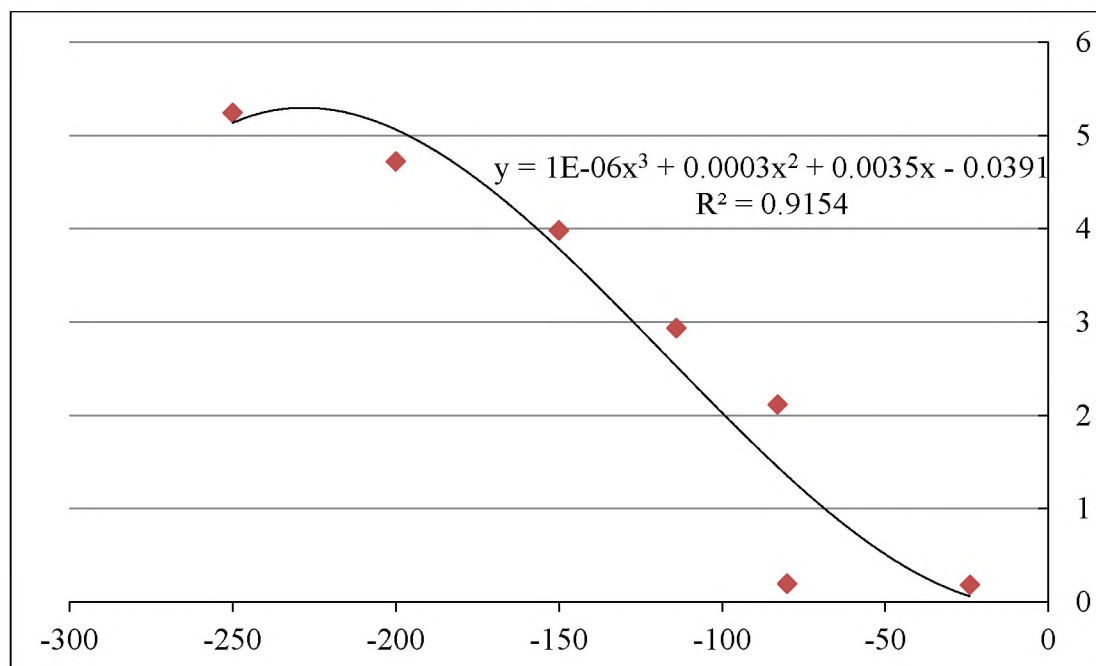


Рисунок 3.5 – Изменение метаноносности угольного пласта «9ТВП» с глубиной залегания

Кроме этого, для определения категории шахты по метану на шахте Маохе выполняют измерения газообильности для расчета относительного метановыделения при ведении горных работ. Результаты расчета относительного метановыделения в горных выработках угольных пластов представлены на рис.3.6 [127].

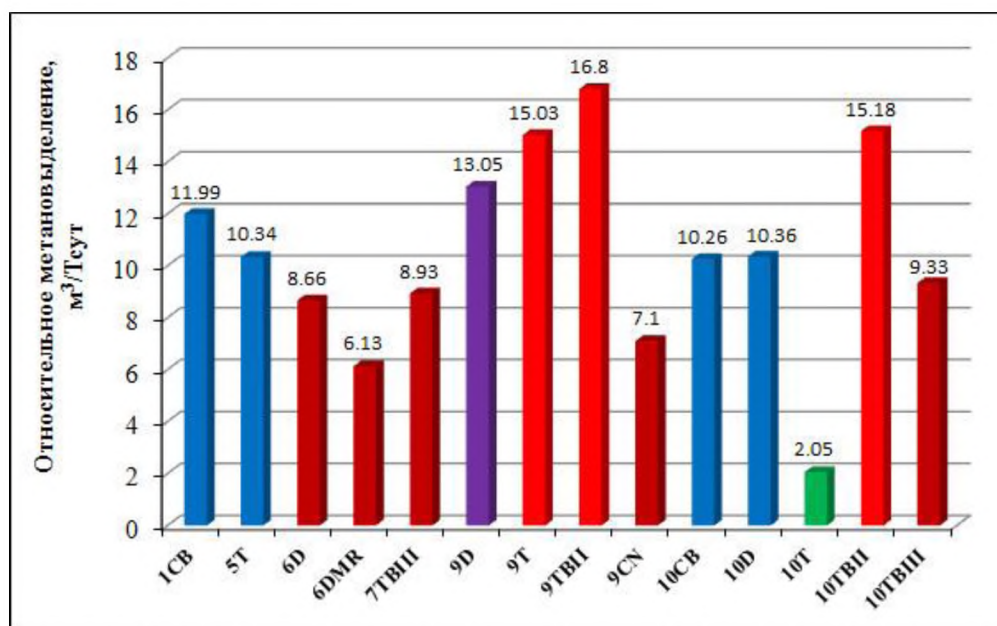


Рисунок 3.6 - Диаграмма распределения значений относительной метанообильности по пластам

Анализ данных, представленных на рис.3.6. свидетельствует о том, что наибольшее относительное метановыделение наблюдается на угольных пластах 9T, 9TBII, 10TBII, 9D, 5T, 1CB и 10D, 10CB, которые соответствуют более высокому уровню их метаноносности по сравнению с другими пластами.

С увеличением глубины разработки угольных пластов газовыделение возрастает, и вентиляционная система должна подавать все большее количество воздуха.

Большая проблема на угольных шахтах это управление газовыделением и водопитоками. Излишние флюидотоки ограничивают скорость ведения очистных работ, снижают промышленную и экологическую безопасность. Для уменьшения метановыделения, в угольных шахтах применяют системы дегазации, а для контроля водопитоков – системы водоотлива. Негативные

последствия неконтролируемого флюдопритока могут привести к взрывам, и пожарам в случае вспышки метана, затопления горных выработок или осушения поверхностных водоемов – в случае неконтролируемого водопритока.

Руководствуясь мировым и отечественным опытом исследований активизации опасных горно-геологических явлений и процессов, можно однозначно сделать вывод, что главным фактором обуславливающим их развитие в пространстве-времени является изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Именно техногенное изменение НДС обуславливает пространственно-временную изменчивость инженерно-геологических и гидрогеологических свойств горных пород (не рассматривая изменчивость в геологическом времени, т.к. длительность геологических процессов несопоставима со временем отработки месторождения). Такие параметры как проницаемость пород, коэффициент фильтрации, величина действующих напряжений, размеры зоны влияния (выработки, пласта, ПТС в целом), размеры мульды сдвижения и т.д. однозначно являются производными изменения НДС массива горных пород. В данной позиции управляющим органом ПТС будет набор геологических параметров массива геотехнологических методов разработки месторождения, определяющих НДС:

- мощность, угол падения и глубина разрабатываемых пластов;
- размеры горных выработок, последовательности прохождения и если рассматривать один пласт относительно другого, то необходим учет положения границ относительно друг друга;
- управление давлением горных пород;
- интенсивность движения забоя при проведении добычных работ.

При разработке запасов угля на шахте применяется способ полного обрушения кровли. Применение способа управления кровлей полным обрушением и применение многоштрековой подготовки, диктует необходимость

оставления значительных по масштабу предохранительных целиков, что усложняет ведение горных работ и уменьшает потенциал извлечения угля.

Анализ показывает, что на охранные целики может приходиться от четверти до трети запасов угля, что составляет существенную часть от общих запасов полезного ископаемого.

Один из альтернативных способов управления кровлей, при этом позволяющем повысить полноту извлечения запасов полезных ископаемых (угля) является подземная разработка угля с применением технологии закладки выработанного пространства. Следует отметить, что в этом случае за счет изменения НДС углепородного массива происходит снижение газовыделения в горные выработки и вероятности газодинамических явлений.

### **3.3. Оценка влияния вентиляции на метанообильность добычного участка**

Для проветривания применяют всасывающий метод, такой подход справедлив для большинства крупных шахт Вьетнама. Есть исключения, например шахта Монг Дуонг, где используют нагнетательный способ. Выбранная методика обоснована глубиной разработки, при небольшой глубине, около 250 м, применяют нагнетательный способ, при превышении данной глубины используют всасывающий способ проветривания. Устье вентиляционного ствола занимает вентилятор, который обеспечивает главное проветривание, такая схема считается центральной. В таблице 3.3 представлены данные собранные по системам вентиляции самых крупных шахт Вьетнама.

Недостаток воздуха на очистных и подготовительных забоях подтверждается данными съемки воздуха:

- все применяемое вентиляционное оборудование не соответствует аэродинамике вентиляционных сетей. Основным вентиляционным оборудованием является то, что еще было собрано в не существующем на

сегодняшний день СССР, а также в, Польше, Китае их ресурс уже давно исчерпан, но их продолжают использовать;

- значительные утечки воздуха через выработанное пространство, которые превышают нормативные значения в два раза;

Таблица 3.3 – Данные по известным типам вентиляционных систем

| Характеристика | СИ                      | Шахты    |           |             | Безопасные значения |
|----------------|-------------------------|----------|-----------|-------------|---------------------|
|                |                         | «Мао Хе» | «Нам Май» | «Хонг Тхай» |                     |
| $N_B$          | кВт                     | 881      | 362       | 351         |                     |
| $P_B$          | кВт час/т               | 3,90     | 2,48      | 3,34        | <10                 |
| $Q_B$          | м <sup>3</sup> /с       | 208,11   | 122,3     | 79,4        |                     |
| $H_B$          | ДаПа                    | 195,2    | 210,1     | 270,12      | ≤301 (360)          |
| $a_B$          | м <sup>3</sup> /т       | 3333     | 1965      | 2711        | <15000              |
| $\Delta h_B$   | ДаПа /м <sup>3</sup> /с | 0,91     | 1,72      | 3,42        |                     |
| $\omega$       | кВт/м <sup>3</sup>      | 4,20     | 4,57      | 4,44        | <3 – 5              |
| $R_B$          | кμ                      | 0,0044   | 0,013     | 0,041       | <0,015              |
| $A$            | т/сут                   | 5401     | 5386      | 2522        |                     |

Уровень утечек определяется использованием диагональных схем вентиляции и одновременной работой очистных забоев на нескольких пластах.

Высокий уровень утечек воздуха, определяет опасность пожаров и взрывов. Так в последнее время во Вьетнаме наблюдали 24 аварии данного типа, в результате которых погибло 54 человека, так же и пострадала добывающая техника.

У рабочих возникают хронические заболевания из-за недостаточного уровня проветривания в атмосфере шахты все время находится большое количество угольной пыли превышение предельно допустимой концентрации доходит до 30 раз в сравнении с положенными нормами. Около 11 тысяч человек во Вьетнаме имеют профессиональные заболевания, в особенности в провинции Куанг Нинь. Ввиду этих вредных факторов угольная отрасль считается одной из самых вредных и опасных для жизни и здоровья работников.

В шахтах создается свой микроклимат, который определяется вентиляционной системой. Основными составляющими этого микроклимата являются температура и влажность воздуха в подготовительных и очистительных забоях. Отсутствие хорошей вентиляции приводит к низкой концентрации воздуха, что является причиной большой утомляемости.

Существует линейная корреляция между глубиной разработки и количеством выделяющегося метана, согласно [73] с увеличением глубины добычи растет количество выделяемого метана.

Два горизонта 80/-25 и -150/-80 на которых сегодня ведется добыча угля на шахте Мао Хе, а вот на горизонте +30/-25 добыча уже завершена.

Угольные пласты – V1, V6, V7, V8, V9a разрабатываются на шахте Мао Хе в период до 2020 г. планируется добыча на гор. – 400. Вскрываются вертикальными стволами и квершлагами –230, –320, –400.

В 2013 – 2020 г. на шахте Мао Хе годовая производительность достигла 3,2 миллион тонн, потребность свежего воздуха составит 216 м<sup>3</sup>/сек.

Дополнительной спецификой в формировании опасностей по газу и пыли вызвано применением последовательной схемы проветривания.

Эффективность проветривания, возможно, повысить, ориентировочно на сорок процентов при выполнении ряда определенных технологических задач:

- во-первых, необходимо провести ревизию применяемого сегодня вентиляционного оборудования. Провести оценку его эффективной работы в различных пылевых и газовых условиях. На основе этих данные принимать решение о возможности применения его на планируемых выработках;

- промоделировать газодинамические условия в угольной шахте и выбрать те вентиляторы, которые могут гарантировать необходимый уровень вентиляции для обеспечения безопасной работы в забое;

- установить места рационального размещения в горных выработках устройств для регулирования распределением воздуха, выбрать типы этих устройств и разработать алгоритмы управления ими.

Это позволит снизить потери депрессии существующей и вновь создаваемой вентиляционной сети и добиться максимального уменьшения утечек воздуха через вышележащее выработанное пространство и вентиляционные сооружения, а также повысить эффективность вентиляционного оборудования.

В настоящее время для управления метановыделением в угольных шахтах применяют вентиляцию, дегазацию и изолированный отвод метана средствами вентиляции (газоотсос). При этом в выработанном пространстве одновременно действуют различные источники тяги, что усложняет контроль распределения утечек воздуха и мест возможного самонагревания угля. Утечки воздуха являются основной причиной всех эндогенных пожаров, которые опасны также с точки зрения уменьшения количества воздуха поступающего в очистной забой, что, в свою очередь, может стать причиной превышения допустимых значений концентрации метана и появлений скоплений газа.

### **3.4. Опасность газодинамических явлений**

Горно-геологические условия отработки шахты Мао Хе определяют достаточно высокие темпы углубления горных работ. В связи с этим одной из перспективных проблем отработки являются динамические явления (внезапные выбросы угля и метана, горные удары). Газодинамические явления (ГДЯ) – внезапные и быстропротекающие процессы, вызванные разрушением предельно напряженной частью массива полезных ископаемых или вмещающей породы и сопровождающиеся пород в горную выработку, сильным звуковым эффектом, возникновением мощной воздушной волны. Прямое негативное влияние газодинамических явлений заключается в следующем: деформирование, засыпка и разрушение горных выработок; залповые выбросы метана в атмосферу горных выработок; неполнота извлечения запасов вследствие аварий на шахте и т.д. Помимо этого, следует выделить высокую вероятность развития неблагоприятных последствий такого явления, как возможность возникновения пожара на шахте, образования крупной воронки оседания земной поверхности, потери дорогостоящей техники, и конечно массовая гибель людей.

В Российской Федерации выделяют 5 категорий газовых шахт, четыре из которых (I-III и сверхкатегорные) определяются относительной метанообильностью, а пятая выделяет шахты опасные по внезапным выбросам. Аналогично осуществляется категорирование шахт в угольной отрасли Вьетнама в соответствие с параграфом 51 стандарта Вьетнама (QCVN 01:2011/ВСТ, издан 15.2.2011). В большинстве стран основное отличие при решении вопросов безопасности связано с оценкой выбросоопасности, так Лама [137] определил, что пороговым значением, при котором может произойти выброс, является  $8 \text{ м}^3/\text{т}$ . Опыт отработки угольных пластов во Франции, Германии и Мексики позволил установить отсутствие выбросов угля при газоносности менее  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ .

В Новом Южном Уэльсе, где было зафиксировано большинство выбросов по Австралии, Министерство природных ресурсов разрешает применение традиционной технологии угледобычи, если содержание газа в пласте не превышает  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  для  $\text{CH}_4$  и  $5 \text{ м}^3/\text{т}$  для  $\text{CO}_2$  (в соответствии со статьей 64 Правил ведения горных работ по добыче угля, 1982). При метаноносности от 9 до  $12 \text{ м}^3/\text{т}$  необходимо проведение мероприятий по предотвращению внезапных выбросов, а при более высоких значениях отработка разрешается только безлюдная технология. Следует отметить, что во многом преобладает подход, разработанный компанией «ГеоГАЗ» («GeoGAS»), предусматривающий определение количества газа выделяющегося при разрушении керна угля, отбираемого в герметичный сосуд, до величины меньше 200 мкм в течение 30 сек. Данная величина и является индексом DRI (Desorption Rate Index), определяющим уровень безопасности. Критической величиной был принят 900DRI, т.е. выделение 900мл метана при разрушении образца. В зависимости от марки угля и процентного содержания газа ( $\text{CH}_4$  или  $\text{CO}_2$ ), уровень безопасности может быть меньше или больше  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  при 100% $\text{CH}_4$  и  $6 \text{ м}^3/\text{т}$  при 100% $\text{CO}_2$ . Например, в штате Квинсланд уровень безопасности при 100%  $\text{CH}_4$  установлен около 6-7  $\text{м}^3/\text{т}$ , а не  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  как в Сиднее. При этом разделения шахт по уровню

газоносности нет. Такой подход представляется более корректным с точки зрения метанобезопасности, т.к. газовую обстановку определяют в основном нагрузка на очистной забой и горно-геологические условия [104].

В случае если отсутствует техническая возможность проведения подземного гидроразрыва или опасность ГДЯ вызвана в основном не газоносностью, а концентрацией напряжений необходимо осуществить низконапорное нагнетание рабочей жидкости в пласт.

Считается, что предотвращение ГДЯ происходит при повышении влажности угля до 6%. Следует отметить, что данный способ может быть использован и для снижения газовыделения из угольного пласта за счет блокирования метана водой. Для повышения эффективности увлажнения применяются добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Если в качестве критерия опасности ГДЯ принять величину газоносности в  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , то пласты 7D, 9ТВП являются не опасными до горизонтов соответственно «-220м» и «-300м», пласты 9D и 9Т опасны по внезапным выбросам с горизонтов соответственно «-160м» и «-140м».

Техногенная (наведённая) сейсмичность подразумевает явление инициирования и возбуждения землетрясения. Инициирование – это воздействие на очаг уже подготовленного землетрясения, ускорение процесса его возникновения. Возбуждение – это воздействие на определенные зоны земной коры, вследствие которого и происходит землетрясение, а без внешнего воздействия явление не произошло бы. Буровзрывные работы и механизированные системы добычи с применением угледобывающих комбайнов, экскаваторов и погрузоразгрузочных механизмов оказывают интенсивное, в том числе вибрационное воздействие на породный массив. Затопление выработанного подземного пространства шахтных полей, более трещиноватого и разуплотненного чем исходный массив, изменяет гидродинамический режим за счет более эффективной передачи гидравлического давления на структурные неоднородности и тектонические

разломы, увеличивая поровое давление в тектонических нарушениях. Поступление воды снижает прочность пород, контактов блочных структур и разломных зон. В результате в массиве происходит перестройка напряженно-деформированного состояния, которая сопровождается развитием сейсмических событий разного масштабного уровня. Негативные последствия землетрясений и горно-тектонических ударов по сути те же, что и у ГДЯ, но только в больших масштабах. Сюда же следует отнести разрушение гражданских зданий и сооружений, т.к. землетрясения вызванные техногенными факторами, могут проявиться не только в зоне ведения горных работ.

Сейсмические явления (землетрясения, горно-тектонические удары, новые режимы взаимодействия геодинамических блоков и т.д.). Техногенная (наведённая) сейсмичность подразумевает явление инициирования и возбуждения землетрясения. Инициирование – это воздействие на очаг уже подготовленного землетрясения, ускорение процесса его возникновения. Возбуждение – это воздействие на определенные зоны земной коры, в следствии которого и происходит землетрясение, а без внешнего воздействия явление не произошло бы. Буровзрывные работы и механизированные системы добычи с применением угледобывающих комбайнов, экскаваторов и погрузоразгрузочных механизмов оказывают интенсивное, в том числе вибрационное воздействие на породный массив. Затопление выработанного подземного пространства шахтных полей, более трещиноватого и разуплотненного чем исходный массив, изменяет гидродинамический режим за счет более эффективной передачи гидравлического давления на структурные неоднородности и тектонические разломы, увеличивая поровое давление в тектонических нарушениях. Поступление воды снижает прочность пород, контактов блочных структур и разломных зон. В результате в массиве происходит перестройка напряженно-деформированного состояния, которая сопровождается развитием сейсмических событий разного масштабного уровня. Негативные последствия землетрясений и горно-тектонических ударов по сути

те же, что и у ГДЯ, но только в больших масштабах. Сюда же следует отнести разрушение гражданских зданий и сооружений, т.к. землетрясения вызванные техногенными факторами, могут проявиться не только в зоне ведения горных работ.

В этих условиях, действующий подход целесообразно применять при незначительных изменениях горно-геологических и горнотехнических условий. При этом используют данные геологоразведки, которые предусматривают только определение пористости и природной газоносности угольных пластов. При значительных изменениях необходимо более детальное исследование свойств и состояния угольных пластов и вмещающих пород, в первую очередь таких как величины пластового давления метана, параметры сорбции Ленгмюра. В этом случае прогноз метаноносности может осуществляться в соответствии с рекомендациями [91].

### **3.5. Анализ влияния газового состояния и коллекторских характеристик на газовыделение из разрабатываемого пласта**

Исследователи в работе [78] выделяют три основных зоны во Вьетнаме по газоопасности угольных шахт. К ним относят следующие области:

- высокая газовая опасность при содержании метана в  $25 \text{ м}^3$  на одну тонну угля;
- умеренная газовая опасность, здесь метаноносность составляет  $15 \text{ м}^3$  на одну тонну угля;
- негазовые шахты, здесь концентрация метана менее  $1 \text{ м}^3$  одну тонну угля.

К шахтам, которые имеют высокую газовую опасность, относят Нонгшон бассейна Куангнам. Переходные шахты или шахты с умеренным уровнем газовой опасности относят шахты Анчау, Шонгда, район Тхань-Хоа. А такие месторождения как Баодай, Назыонг относят к негазовым шахтам. Как отмечалось ранее, в случае некоторых разработок метан пытаются использовать в качестве источника энергии. Во Вьетнаме, например, шахты первой (высокой

газовой опасности) и второй группы (умеренной газовой опасности) имеют достаточно большое количества метана для того, чтобы добывать его как попутное полезное ископаемое.

Угли под марками ПА<sub>1</sub>, ПА<sub>2</sub> и А<sub>1</sub>, обладают самой высокой метанообильностью. Для подтверждения метаноносности необходимо проводить геологическую разведку. Вторым вариантом является исследование газовых режимов непосредственно в работающих шахтах. Высокая концентрация метана является условием повышенной взрывоопасности шахты, поэтому шахта с высоким содержанием метана классифицируется соответственно и применяются соответствующие меры предосторожности (например, этот подход справедлив для Ногшинского и Куангнам бассейнов).

Шахты с содержанием метана 15 м<sup>3</sup> относятся к переходным и они менее опасны. В таких шахтах добывают бурые угли и антрациты. Яркими представителями бассейнов с умеренным содержанием метана являются бассейны впадины Анчау, бассейн впадины Шонгда. Как отмечалось ранее метан может быть использован как попутное полезное ископаемое, но есть также угли содержащие в себе нефть (например, то же месторождение Баодай). Ресурсы газа и нефти содержатся в буром угле, разработка такого угля предъявляет высокие требования к безопасности по пожароопасному и взрывоопасному фактору.

Угольные пласты содержат в своем составе большое количество различных газов, среди них:

- инертные: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar;
- тяжелые углеводороды, которые способны к самовозгоранию: CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>;
- другие взрывоопасные газы: H<sub>2</sub>.

Соотношение CH<sub>4</sub> и воздуха позволяет выделить метановую зону и зону проветривания. Соответственно в проветриваемой зоне исходя из ее названия концентрация метана минимальна, но, тем не менее, все же метан присутствует, ну а в метановой зоне этого газа много.

В бассейнах, где содержатся антрациты, и полуантрациты идёт явное разделение по зональности, например в Куангнинском бассейне. Так как азот является основной составляющей воздуха, то он присутствует в углях в виде смесей: азот-углекислый газ, азот-метан. В диапазоне глубины угольного пласта 50-300 м содержится большое количество смеси газов с метаном.

В районе Баодай на глубине 500 – 700 м содержатся антрациты, есть зона выветривания. Глубина газоносного слоя будет составлять 800 – 1000 м. В северо-западных районах Баодай метаноносных угольных пластов не содержится.

Есть бассейны, где все области насыщенные метаном, например один из таких при глубине залегания метана 150 – 300 м, в районе Тхайнгуен.

В других бассейнах типа Шонгда, мощность угольных пластов 700 м. Однако только в двух местах обнаружены метаноносные зоны (Ньюкуанг и Шуойбанг) причем ниже 150 м. Примерно на такой же глубине в бассейне в Каунгнам расположены метаноносные зоны [79].

При исследовании угля под микроскопом можно установить его структуру (группу витринита). Поверхность исследуемого угля будет характеризоваться наличием трещин, пор, линз и различного рода полос и разветвлений. Все это позволяет реально выделить те области, где метан распределяется в свободном, адсорбированном или химически связанном виде. Метан, который находится в адсорбированном виде и не имеет химической связи с углем, накапливается в отдельных емкостях в угле. Имеется ввиду он находится либо в самой угольной частице либо между скоплением отдельных частиц, более подробно все показано в таблице 3.4. Для данного типа структуры, характерного высокой пористостью,  $\text{CH}_4$  в основном находится в адсорбированном состоянии либо между частицами, либо в каждой отдельной частице в кластере. Еще раз стоит подчеркнуть, что в зависимости от места нахождения газа (в частности, метана) он находится в связанной, или в адсорбированной форме.

Таблица 3.4 - Формы метана в некоторых марках углях основных групп метаморфизма

| В какой форме находится метан | Стадии метамарфоза |         |         |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------|
|                               | Нижняя             | Средняя | Высокая |
| В полостях пор и трещин (%)   |                    |         |         |
| Свобод.                       | 9-31               | 4-11    | 6       |
| Сорбиров.                     | 4-11               | 7-16    | 21-31   |
| Связанный газ (%)             |                    |         |         |
| Межагрегатн. адсорбиров. газ  | 4-16               | 14-31   | 29-41   |
| Внутриагрегатн. абсорбиров.   | 9-21               | 7-16    | 11-21   |
| Молекулярн.-связанн. (%)      |                    |         |         |
| Кластер.                      | 39-34              | 14-31   | 4-10    |

Ермаковым В.И. и другими авторами находится в адсорбированном состоянии [80-83]. Коллективом авторов в работах [84-87] показано, что  $\text{CH}_4$ , в угле находится в виде твердых растворов. Метан в угле может быть в виде, адсорбированном либо в химически связанном виде.

Существует модельное представление связи между собой сорбции метана и его диффузии в угольных пластах. Согласно данной модели в целостных угольных блоках диффузия метана идет согласно уравнениям Фика, а вот если блок нарушен, то диффузия идет уже по закону фильтрации. В случае если блок угля однороден, то благодаря диффузионным процесса происходит его равномерное распределение по поровому пространству, если угольный пласт не равномерен то за счет фильтрации в газовая фаза продвигается по трещинам образующим сеть сообщающихся пор и так же равномерно заполняет угольный пласт(фрагмент). Если угольные блоки не разрушены, то метан из него выделяется путем диффузии к открытой поверхности, то есть к угольной шахте. Диффузия по вторичным порам идет быстрее, чем по вторичным микропорам.

Адсорбированный метан и свободный, соответственно по разному и разным механизмам мигрирует в поровом пространстве углей. Одновременно происходит в угле два процесса сорбция и диффузия, во-первых, идет формирование газонаполняемой емкости, происходит это также в несколько этапов:

- исходная стадия - метаногенерация здесь происходит выделение метильных радикалов из порового пространства угля, что приводит к образованию молекул метана;
- сорбция метана – образует равновесная система, в которой концентрация атомов постоянна, сохраняется соотношение в системе сорбат-сорбент
- десорбция – процесс обратный адсорбции, сопровождается нарушение соотношения атомов, система переходит в неравновесное состояние;
- перемещение (диффузия, фильтрация) десорбирующегося газа, система стремится к равновесию, поэтому возникший градиент концентраций будет способствовать движению газа пока его концентрация не сравняется во всех точках.

С позиции теории фильтрации необходимо рассматривать свойства системы «уголь - коллектор свободного газа». Существует большое количество моделей описывающих диффузию метана в угольных пластах, наиболее распространение в современной науки получил механизм под названием региональный метаморфизм. Существуют два феноменологических закона Фика описывающего диффузию в твердых телах:

- диффузия по Фику (I-го рода);
- диффузия не по Фику, а диффузия второго рода (II-го рода).

Цилиндрические каналы, образованные в угле в результате геологической активности, способствуют диффузии метана в виде совместных алифатических цепочках. Для диффузии в угле есть два пути вдоль и поперек образовавшихся трещин, то есть идет своего рода фильтрация через трещины.

Перепад давления в угле ведет к тому, что метан внутри порового пространства начинает перераспределяться, происходит перемещение объема метана под давлением в свободные объемы угля. Движение газа при этом происходит по разным механизмам, которые определяются размером порового пространства, условиями нахождения газа в каналах (давлением, температурой, концентрацией). Движение частиц газа идет по градиенту концентраций изнутри угля наружу к поверхности. Уголь, находящийся в земной толще находится под определенным горным давлением, содержит метан, который диффундирует не только по порам угля, но и через сами частицы, диффузия процесс длительный, но и уголь залегают под землей достаточно долго, этого времени достаточно, чтобы диффундирующий метан изменил структуру самого угля. Диффузия  $\text{CH}_4$  приводит к изменению структуры в плане его разрушения и разрыхления, тем самым насыщая его равномерно метаном по всему объему угольного пласта. Горные угольные пласты под действием геологических условий может разрушаться и в этом случае метан может перемещаться в порах по разным механизмам, но в нетронутых угольных пластах метан проходит исключительно диффузионно.

Рассчитать концентрацию метана можно используя всем знакомые уравнения Менделеева-Клайперона и знание стандартных коэффициентов, в частности универсальной газовой постоянной и числа Авогадро.

Диффузия вызванная микрозалежами угля имеет низкую скорость перемещения, она определяется размером пор в угле, который контактирует с микрозалежью.

Размер пор (в частности диаметр пор, если рассматривать их форму в виде трубок) определяет механизм диффузии в пористом теле, в данном случае угле. Различают следующие типы движения газа в порах:

- при размере пор 0,1-1 мкм наблюдают поверхностную диффузию;
- диффузия по Кнудсену, когда диаметр пор составляет кнудсеновские 1,0-10,0 мкм, то есть длина свободного пробега много больше диаметра пор;

- свободное движение газа (Пуазейлевское движение) при диаметре пор более 10 мкм.

При воздействии на горную породу, имеется ввиду механическом воздействии, из угля начинает выделяться метан, который был адсорбирован на его поверхности, а также метан, который был молекулярно связан с ним в глубине добываемого угля.

Выделение газа в процессе добычи происходит непрерывно, так как процесс добычи не останавливается. Газ выделяется при отбивании угля, при падении его на конвейер и непосредственно при транспортировке. Конечно даже при этом есть области пересыщения и области обедненные выделяемыми газами, в частности метаном, все выравнивается за счет диффузии и принудительной продувки (вентиляции). Образующаяся угольная пыль так же является источником метана, ее движение может приводить к повышению концентрации метана либо концентрация может оставаться неизменной, все определяется газонасщенностью угольного пласта, одно понятно точно, высокая концентрация угольной пыли неудовлетворительно отражается на состоянии здоровья, что так же отмечалось при рассмотрении угольных шахт во Вьетнаме. Движение выделявшегося газа от забоя к выходу из шахты за счет принудительной вентиляции разбавляет его воздухом и в целом ведет к снижению его концентрации до безопасного уровня [88].

Несмотря на это есть ряд факторов, которые способны значительно повысить концентрацию метана в выработке, поэтому при конструировании вентиляции закладывают дополнительные возможности. При конструировании и разработке системы вентиляции обязательно закладываются возможные внезапные выбросы метана и иные вероятностные факторы, все это учитывается при моделировании (компьютерное моделирование) вентиляции так как она должна в любом случае обеспечивать безопасную работу снижая концентрацию метана и реагируя на ее резкие изменения.

Существует так называемый неподвижный слой или его еще называют слой Прандтля (диффузионный слой). В этом слое скорость движения потока нулевая, с какой скоростью бы мы не дули на поверхность поток газа ударяется о диффузионный слой и дальше на поверхность газ доставляется только диффузионно. Толщина слоя в стационарных (т.е. постоянных условиях) определяется скоростью надвигающегося потока, в нашем случае это воздух, задача которого выдуть метан с поверхности угля [89]. Модель того как идет распространение метана от точечного источника метана показана на рисунке 3.7.

1— высокое значение конвективного переноса и незначительное газовыделение;

2— условия малого значения конвективного переноса при газовыделении из стенок выработки;

3— одномерное газовыделение из почвы и кровли.

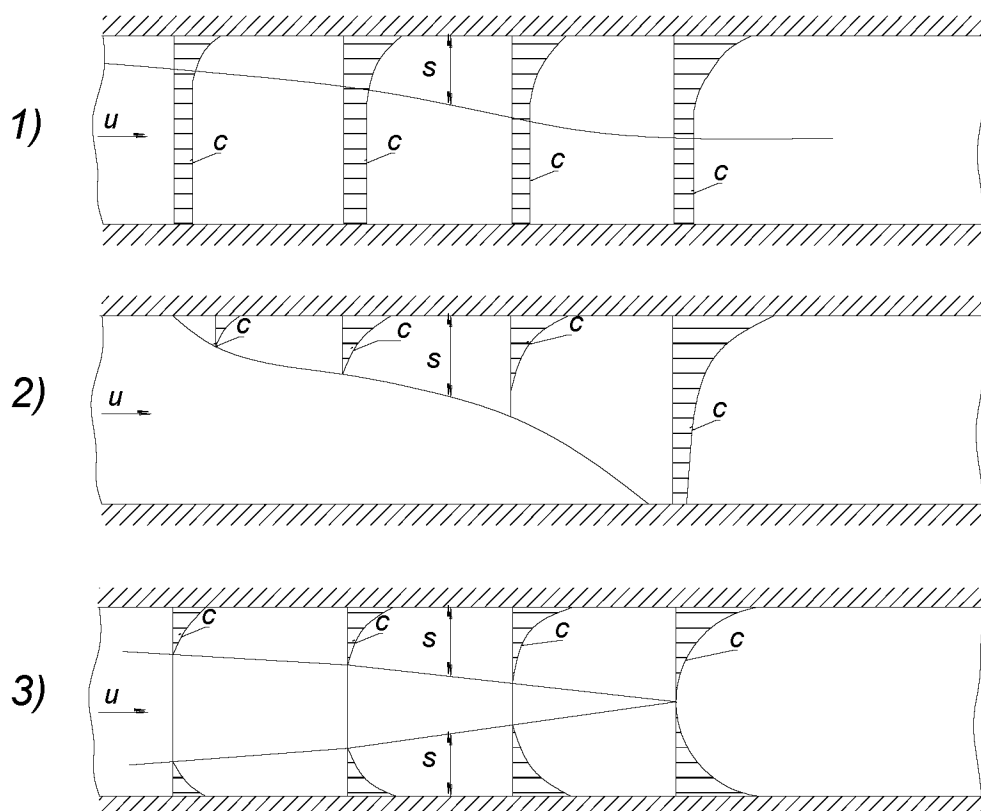


Рисунок 3.7 - Эпюры распределения концентрации газа с поверхности выработок

Экспоненциальным законом описывается концентрация метана:

$$C = c_z e^{\frac{az}{\delta}} \quad (3.5)$$

где  $c_z$  – выделение метан из поверхности, %;

$z$  - Длина нормали к газвыделяющей поверхности;

$\delta$  – Толщина слоя Прандтля;

$a$  – коэффициент определяемый диффузионными процессами.

Регулируя скорость движения вентиляционного потока, идет регулирование концентрации метана. Если скорость вентиляции увеличить, то это может снизить скорость газовыделения.

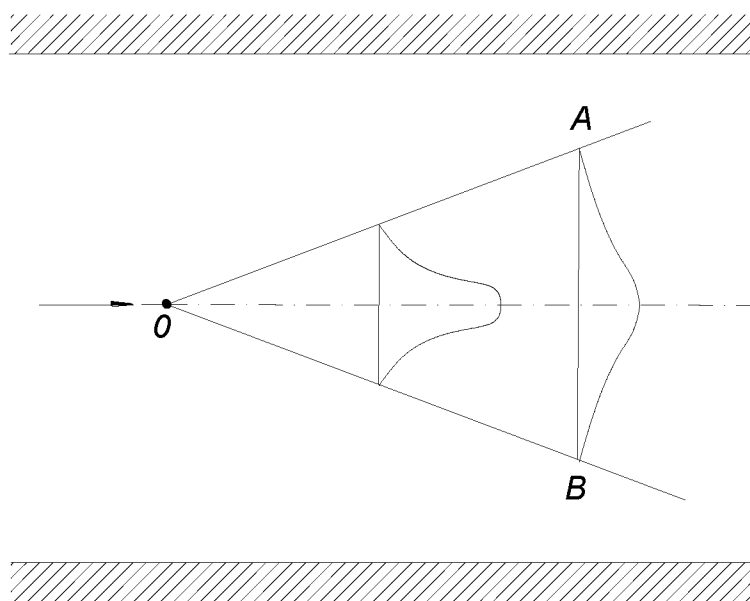


Рисунок 3.8 - Распределение концентрации газа при выделении от точечного источника

Распространение газа, из какого-либо точечного, источника продемонстрировано на рисунке 3.8. При условии, что газ распространяется

диффузионно, согласно теоретическим представлениям и математическим моделям, концентрация метана будет описываться кривой Гаусса.

Равномерное распространение вредных газов (в частности метана) обусловлено градиентом концентраций, который согласно законам Фика приводит к диффузии. Самостоятельно распределенный метан по длине выработки, в случае отсутствия внешних воздействий, имеется ввиду принудительной вентиляции, рано или поздно образует области пересыщенные метаном и тем самым создаст пожара и взрывоопасную ситуацию, которую необходимо исключить. Когда воздух неподвижен, за счет действий сил молекулярной диффузии идет выравнивание концентрации метана, это наблюдается в шахтах, где не принудительного проветривания или когда вентиляция не исправна.

Так как скорость диффузии ниже скорости выделения  $\text{CH}_4$  из горной породы, то высока вероятность накопления газовых выделений. Коэффициент молекулярной диффузии  $D_m$  зависит от свойств газов, а не от направления диффузии. Коэффициент диффузии  $\text{CH}_4$  в воздухе  $D_m=0,196 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Хаотичное перемещение воздушных масс путем образования завихров различного размера и направлений способствует диффузионному перемещению воздушных потоков. Если рассматривать выработки, то данный тип диффузии является самым быстрым, он в 100 раз быстрее, чем молекулярная диффузия.

Молекулярная и турбулентная диффузии неразрывны и проявляют себя совместно. Если забой принудительно проветривается, то к этим двум типам диффузии добавляется еще и конвекция. Возникающие турбулентные оттоки, способствующие соответствующей диффузии, приводят к равномерному распределению  $\text{CH}_4$  по сечению выработки.

Важно обеспечить выделение газа именно в поперечном направлении, то есть перпендикулярно выработки, в этом случае аэрологические условия, возникающие при выделении газа обеспечат безопасную работу в угольной шахте, снижая скорость движения газового потока. На градиент перемещения

(или скорость) турбулентной диффузии оказывает выделение  $\text{CH}_4$ . У края кровли, которая получается после выработки и укрепляется, образуются скопления метана, что создает пожароопасную ситуацию. Переход от турбулентного потока к ламинарному определяются числом Рейнольдса, а переход к турбулентной диффузии числом Ричардсона. Значение коэффициента диффузии с названием  $D_T$  изменяется в диапазоне 1- 100  $\text{см}^2/\text{с}$ .

Помимо диффузионных способов переноса вещества, который вызван градиентом концентраций, возможно осуществления переноса больших масс за счет конвекции. В струе конвективного потока все равно идет диффузионные процессы, так как только в идеальных лабораторных условиях возможна реализация лишь диффузионного или лишь конвекционного режима течения газа. Конвективный поток реализуется по двум режимам, в зависимости от числа Рейнольдса: ламинарный режим, или турбулентный режим. Стоит отметить что от реализации конвективного режима перемещения воздушных потоков идет большой выигрыш, так как конвективный поток обеспечивает осуществляет перемещение пылевого потока из забойного пространства шахты, диффузия же наоборот не помогает а способствует лишь тому что воздух в шахте насыщается опасными примесями, в частности угольной пылью[88]. Воздушный поток содержит определенное количество (концентрацию) примесей, количество определяется конвективным потоком, а точнее его интенсивностью. Количественно величину конвективного потока для вещества, перемещающегося по шахте можно оценить по соотношению:

$$J = cu \quad (3.6)$$

где,  $c$  – количество вещества в воздухе по отношению к общему количеству воздуха (концентрация);

$u$  – интенсивность движения газового потока.

Конвективным потоком обеспечиваются нормы воздуха, необходимые для проведения безопасной работы.

Концентрация газа в забое может быть оценена в общем виде как отношение общего количества газовыделений к количеству подаваемого воздуха в рабочую шахту. Оценка газонасыщенности может быть осуществлена с использованием по газовоздушным съемкам.

Интегральная характеристика газовыделения во времени отнесенная к единице площади таким же образом определяется и для тупиковых, и подготовительных выработках, то есть здесь так же используется метод газовоздушных съемок [89].

На рисунке 3.9 представлено схема призабойного пространства и области газовыделений и утечек.

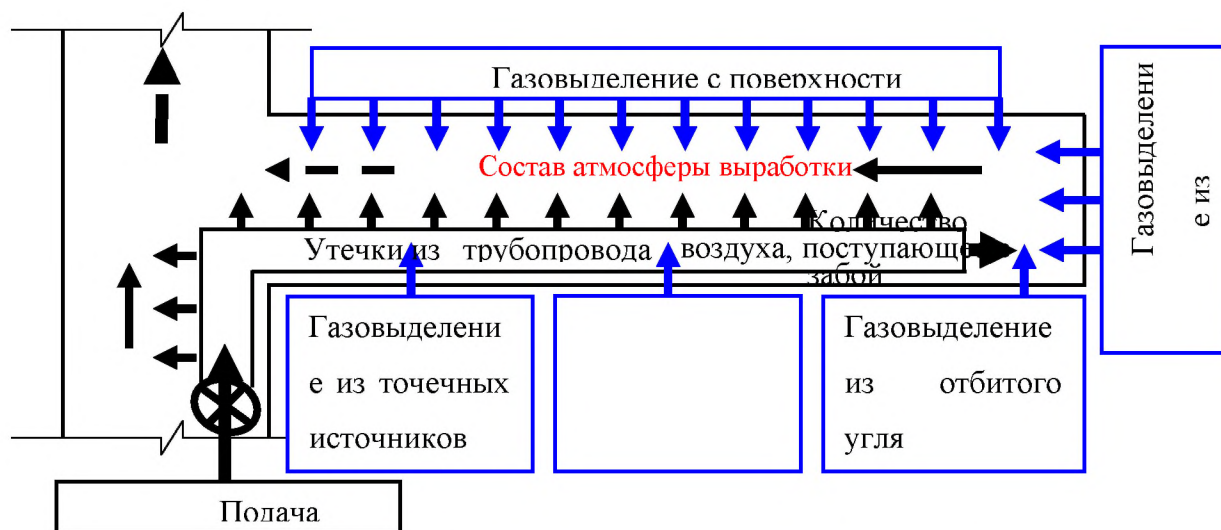


Рисунок 3.9 - Модель формирования газовой обстановки

Каждый кусочек отбитого угля попадающий на конвейер, является точечным источником метана, тогда получается что общее газовыделение является интегральной величиной относящейся ко всему количеству угля на единицу площади отбитого в единицу времени. Отбитый уголь, попадающий на транспортную ленту, является источником выделения  $\text{CH}_4$ . Выделяемый газ

изменяется по концентрации и интенсивности выделения из-за его транспортировки из зоны забоя. Крупные пустоты и трещины являются источником газовыделений (так называемых суффлярных), эти области являются точечными зонами газовыделения. Такие зоны образуются в результате тектонических нарушений в областях перемычек с выработанным пространством.

Обсуждение экспериментальных результатов полученных А.Т. Айруни и другими авторами в работах [83-89] показывает, что существует взаимосвязь между тем, из какого источника в атмосферу шахты поступает метан и временем активности данного источника. Это соотношение определяется эмпирическими коэффициентами и величиной начального газовыделения. Фильтрационно-диффузионные процессы могут быть описаны с привлечением компьютерного моделирования по различного рода математическим моделям переноса газа в угольных пластах. То количество газа (имеется ввиду метана), которое привносится в атмосферу забоя определяется интенсивностью источника, начальным временем и продолжительностью его активности. Никакое моделирование не позволит установить какую долю  $\text{CH}_4$  он внес в общий газовый поток, для этих целей необходимо проведение экспериментов по забору пробных образцов газа.

В подготовительную выработку может попадать  $\text{CH}_4$ , это происходит конвективно-диффузионным путем, для описания поступления метана в выработку существует дифференциальное уравнение, рассчитав которое можно определить динамику поступления газа в атмосферу угольной шахты, в которой ведется добыча. Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC) = D_{\text{э}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n I_i(t). \quad (3.7)$$

где  $C$  – концентрация вещества;

$u$  – среднее значение скорости воздуха;

$I_i$  – обильность газовыделения.

Необходимо проверить выполнимость следующих условий:

$$\begin{aligned}C(x, 0) &= C_0 = \text{const}; \\C(0, t) &= C_H = \text{const}; \\ \lim_{x \rightarrow \infty} C(x, t) &\neq \infty.\end{aligned}\tag{3.8}$$

Суммарное значение газовыделения из угольных шахт представляет собой совокупность выделения газа из разноплановых источников с различным периодом действия, такое предположение подтверждается.

Изменение интенсивности газовыделения при разработки угольных пластов может быть обусловлено различными причинами. Многие исследователи связывают изменение газовыделения либо с горно-геологическими причинами, либо с самими технологическими операциями которые проводятся во время разработки угольных пластов [89].

Действующий подход прогноза метановыделения целесообразно применять при незначительных изменениях горно-геологических и горнотехнических условий. При этом используют данные геологоразведки, которые предусматривают только определение пористости и природной газоносности угольных пластов. При значительных изменениях горно-геологических условий для корректного прогноза метановыделения необходимо учитывать давление газа в поровом пространстве и кинетику сорбции (параметры сорбции Ленгмюра). В этом случае прогноз метаноносности может осуществляться в соответствии с рекомендациями [91].

Следует отметить, что на современном этапе с точки зрения безопасности, экологии и комплексного освоения угольные месторождения необходимо рассматривать как углегазовые. Это требует кардинальных изменений в геолого-разведочной информации, т.е. исходные данные должны обеспечивать не только решение вопросов обеспечения метанобезопасной добычи угля, но и освоения нетрадиционного ресурса – метана угольных месторождений. При этом

особенностью технологий освоения данного ресурса является необходимость учета последующей отработки запасов угля. Основой комплексного и безопасного освоения углегазовых месторождений является технология заблаговременной дегазационной подготовки угольных пластов [92,93].

Данная технология обеспечивает извлечение газа в течение 10 лет и более при концентрации метана 95–100 %, снижение газообильности горных выработок достигает 75–80 %. Снижение метаноносности дегазируемого угольного пласта может достигать 50–60 %. Однако, несмотря на высокую эффективность, способ не нашел широкого применения из-за значительных долгосрочных капитальных вложений для его реализации и недостаточной стабильности результатов при его применении в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях [94]. В настоящее время осуществляется внедрение данной технологии на шахте им. С.М. Кирова (АО «СУЭК-Кузбасс»). Перспективным с точки зрения обеспечения дегазации всего выемочного участка представляется сочетание гидрорасчленения с поверхности и подземного гидроразрыва с освоением и дегазацией разрабатываемого пласта скважинами из подземных горных выработок [95].

### **Выводы по главе 3**

На современном этапе развития угольной отрасли при прогнозе метанообильности необходимо учитывать не только газоносность угольных пластов, но и сорбционно-кинетические параметры угля. Анализ результатов исследований метаноносности угольных пластов на шахте Мао Хе показали, что метаноносность закономерно увеличивается с глубиной горных работ, а по пластам 9Т, 9ТВII, 10ТВII, 9D, 5Т, 1СВ и 10D, 10СВ превышает  $10 \text{ м}^3/\text{т}$ . Программа ведения горных работ на шахте Мао Хе предусматривает значительное углубление разработки и повышение нагрузки на очистные забои, что требует эффективного решения вопросов обеспечения аэрологической

безопасности. При незначительном повышении нагрузок применяемый в настоящее время способ прогноза метанообильности обеспечивает корректную оценку, однако в перспективе целесообразно использовать способы, учитывающие коллекторские характеристики угольных пластов, газовое давление и кинетику десорбции метана.

Для условий шахты Мао Хе установлены зависимости отражающие связь метаносности с глубиной залегания угольных пластов, которые могут быть использованы для оценки опасности ГДЯ.

Если в качестве критерия опасности ГДЯ принять величину газоносности в  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , то пласты 7D, 9ТВП являются не опасными до горизонтов соответственно «-220м» и «-300м», пласты 9D и 9Т опасны по внезапным выбросам с горизонтов соответственно «-160м» и «-140м».

Для обеспечения метанобезопасности при отработке угольных пластов с высокой метаносностью на шахте Мао Хе необходимо использование дегазационной подготовки, которая в конечном итоге позволяет перейти к комплексному освоению углегазовых месторождений.

## **ГЛАВА 4. Обоснование направлений совершенствования дегазации выемочных участков**

### **4.1 Разработка предложений по использованию вязко-пластичных наполнителей для повышения эффективности дегазации угольных пластах**

Для повышения эффективности гидродинамического воздействия на угольный пласт рассматривается задача раскрытия вторичных трещин, которая обеспечивается тем, что после проведения гидроразрыва угольного пласта за счет закачки стопорного геля и создаются условия для повышения давления из-за различия упругих свойств и вязкости в среде при последующей гидрообработке. В качестве основного критерия может быть приняты минимальные объемы рабочей жидкости и геля. Последовательность операций в этом случае следующая:

на первом этапе при закачке рабочей жидкости с максимальным темпом (10 л/с) и минимальным объемом (5-10 м<sup>3</sup>) раскрывается основная система трещин;

на втором минимальным темпом закачивается минимальный объем геля, который должен обеспечивать увеличение давления закачки на 15-20%;

на третьем этапе осуществляется закачка рабочей жидкости с максимальным темпом (10 л/с), обеспечивающая раскрытие вторичной системы трещин.

Минимизация объемов закачки рабочей жидкости при гидрообработке угольных пластов с точки зрения обеспечения её эффективности является важной практической задачей, т.к. закачка рабочей жидкости приводит к снижению фазовой проницаемости пласта по газу.

Основной задачей является определение характеристик и объемов закачки геля.

В качестве рабочего инструмента используется метод моделирования физических процессов, основанный на методе подобия.

Обоснование подхода. Два явления будут подобными, если по характеристикам одного можно получить характеристики другого путем простого пересчета. Условиями подобия двух явлений является равенства некоторых безразмерных параметров, называемых числами подобия. Преимущества такого подхода очевидно, так как степень сложности дифференциальных уравнений исследуемых процессов при этом не имеет никакого значения. Решение уравнений не требуется. Поэтому изучение любого процесса сводится к тому, что по заданным величинам находятся неизвестные, определяющие этот процесс, численные характеристики. Числа подобия, полученные из величин, заданных для данного процесса, носят название критериев подобия.

Выбор критерия подобия. Рассматриваем систему гель-вода. Жидкости с разной плотностью (удельным весом) в таком случае можно воспользоваться числом подобия Архимеда:

$$A_r = \frac{l^3}{\nu^2} g \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (4.1)$$

$l$  – характерный линейный размер, м – (можно задавать из постановки задачи – частица, длина скважины, трещины и т.п.);

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ; (Ст)

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$  – изменение плотности жидкой фазы, (изменение плотности можно рассматривать по следующим причинам – при упругом сжатии под давлением; при изменении температуры в жидкости; за счет диффузионных процессов).

1. Предположим, что происходит процесс изотермического упругого сжатия и выполняется закон Гука:

$$\frac{\Delta p}{E} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.2)$$

где  $E$  – модуль упругости жидкости, ГПа.

Тогда критерий подобия Архимеда, можно представить как:

$$A_r = \frac{l^3}{\nu^2} g \frac{\Delta p}{E}, \quad (4.3)$$

2. Моделируем происходящие процессы, сравнивая критерии подобия:

$$\frac{l_1^3}{\nu_1^2} g \frac{\Delta p_1}{E_1} = \frac{l_2^3}{\nu_2^2} g \frac{\Delta p_2}{E_2} \quad (4.4)$$

3. Из предположения, что за счет высокой вязкости геля по сравнению с водой и наличия остаточного давления от начального «подпорного» давления  $\Delta p_{\text{п}} = 4,5$  МПа (давление в скважине 15 МПа – пластовое давление. Принимаем глубину 500 м, в этом случае величина давления будет 10,5 МПа) теоретически возможен рост давления достаточного для раскрытия второго ряда трещин в пласте ( $\Delta p_2$ ). Оценить относительный рост давления можно используя сравнение критериев подобия:

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{l_1^3}{l_2^3} \cdot \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (4.5)$$

Параметры с индексом «2» относятся к вязкой среде (гель).

Параметры с индексом «1» относятся к воде.

Для воды модуль упругости  $E \approx 2,11$  ГПа при нормальных условиях.

Для  $t = 15$  °С, кинематическая вязкость воды  $\nu = 1,14$  сСт или  $1,14 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

Для ориентировочных расчетов величину модуля упругости воды можно использовать таб. 4.1.

Используя соотношение (4.5) сформированы графики, позволяющие определить требуемые характеристики геля, который может быть использован для реализации данной технологии гидродинамического воздействия.

Таблица 4.1 - Модуль объемной упругости воды  $E_0$ , МПа

| t, °C | Давление, МПа |      |      |      |      |
|-------|---------------|------|------|------|------|
|       | 0,5           | 1    | 2    | 3,9  | 7,8  |
| 5     | 1893          | 1913 | 1933 | 1972 | 2031 |
| 10    | 1913          | 1933 | 1972 | 2011 | 2080 |
| 15    | 1933          | 1962 | 1991 | 2050 | 2129 |
| 20    | 1942          | 1982 | 2021 | 2080 | 2178 |

Допустим давление воды во время ГРП было  $P_1 = 40$  МПа, длину трещины при этом мы оценили допустим в  $L_1 = 20$  м. Для заполнения трещины гелем  $P_2 = 10$  МПа. Их отношение  $P_2/P_1 = 0,25$ . По графику 1, видим, что это отношение соответствует отношению  $L_2/L_1 = 0.24$ . Значит  $L_2 = 20 \cdot 0.24 = 4.8$  м.

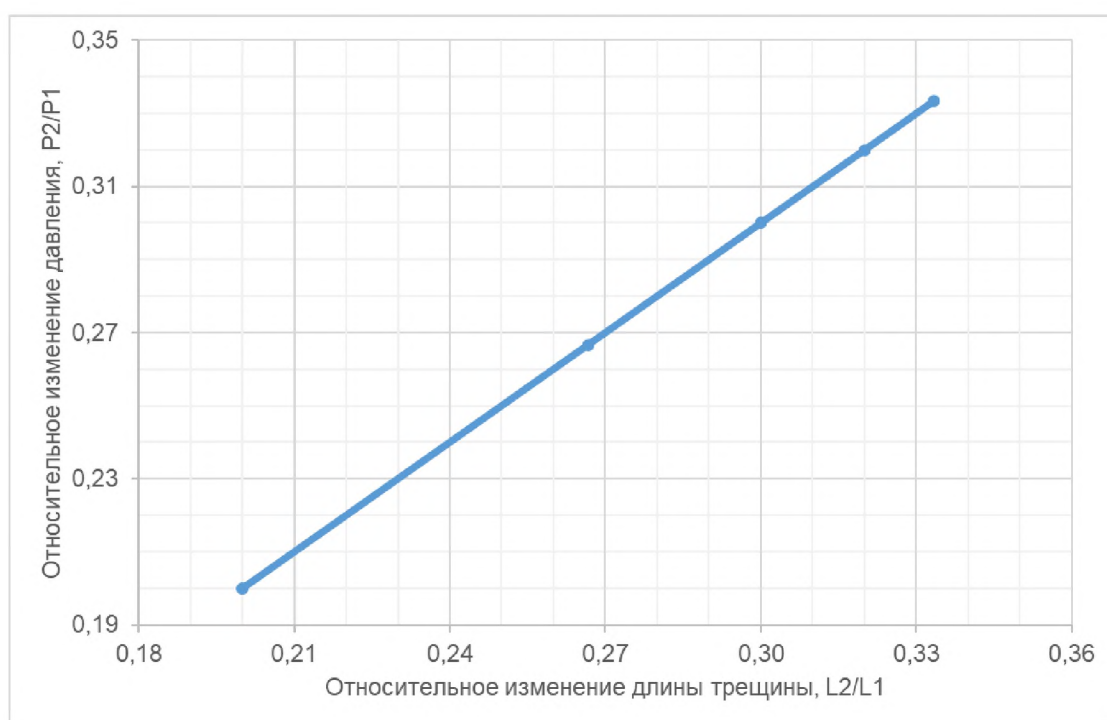


Рисунок 4.1 – График зависимости относительного изменения давления  $P_2/P_1$  от относительного изменения длины трещины  $L_2/L_1$

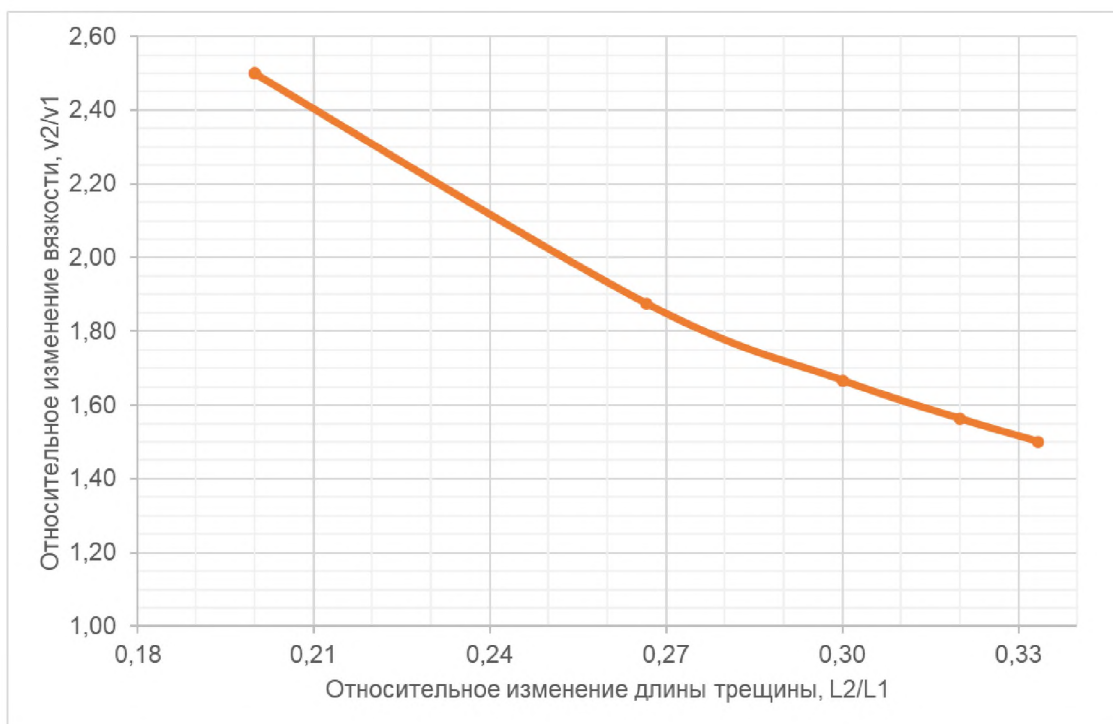


Рисунок 4.2 – График зависимости относительного изменения вязкости  $v_2/v_1$  от относительного изменения длины трещины  $L_2/L_1$

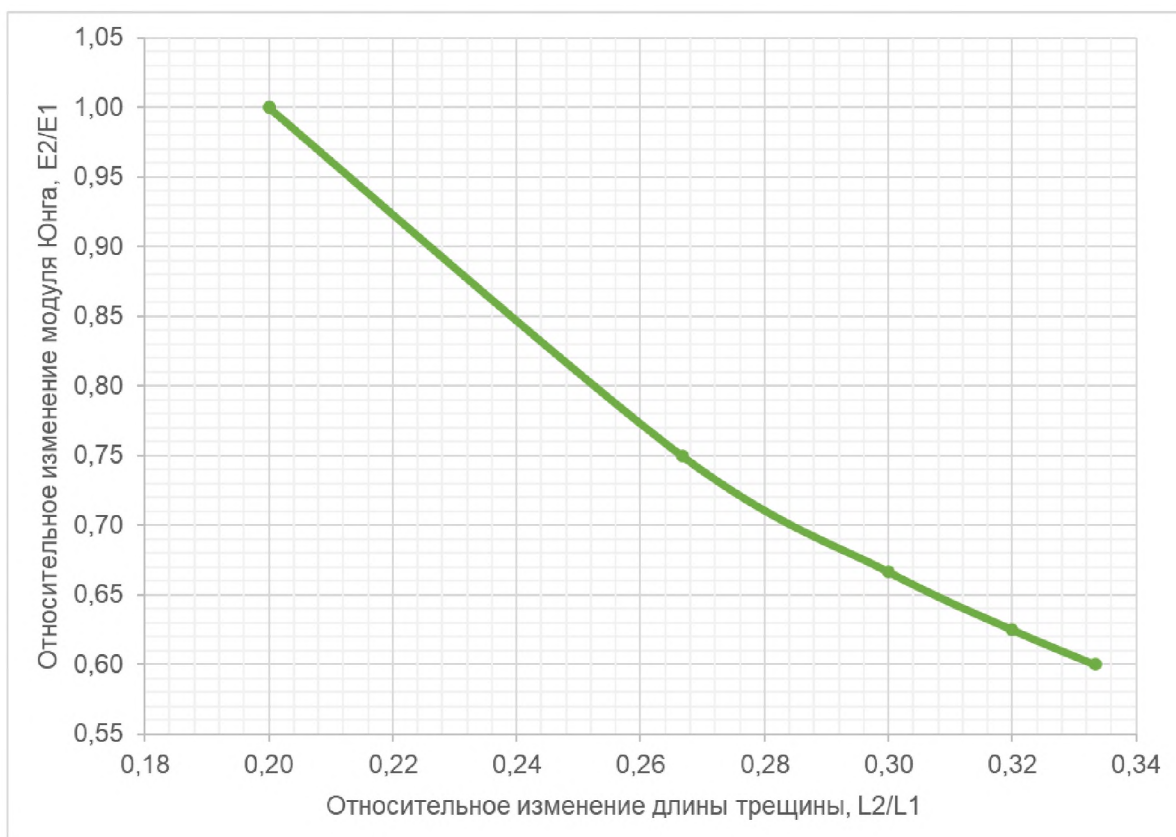


Рисунок 4.3 – График зависимости относительного изменения вязкости  $E_2/E_1$  от относительного изменения длины трещины  $L_2/L_1$

Определим параметры вязкости и модуля Юнга для этого. По графику 4.2, мы видим, что вязкость геля должна быть в 2.1 раза больше вязкости вод. По графику 4.3 мы видим, что модуль Юнга геля должен быть в 0.85 раза меньше, чем модуль Юнга воды.

#### **4.2 Предложения по совершенствованию технологии гидровоздействия с использованием эффекта набухания углей**

Следует отметить, что аналогом рассмотренной технологии может быть принята технология гидровоздействия с использованием эффекта набухания угля [140].

Как известно, в результате взаимодействия угля и рабочей жидкости гидровоздействия, происходит процесс набухания блоков угля, что приводит к снижению фильтрационных характеристик и к ускорению проникновения воды в микро- и переходные поры.

Теоретическая оценка режимов гидрообработки показывает, величина радиуса зоны гидрообработки практически линейно зависит от темпа закачки рабочей жидкости, что достаточно часто является ограничивающим фактором для применения технологии гидрообработки с целью повышения газоотдачи угольного пласта и особенно в подземных условиях.

В этом случае возможно применение технологии гидрообработки угольного пласта с использованием эффекта набухания угля в результате его взаимодействия с водой. Для подземных условий предлагается следующая последовательность воздействия:

- закачка 20-30 м<sup>3</sup> рабочей жидкости с темпом 5-10 л/с;
- затем осуществляется обработка следующей скважины, а в зоне первой в течение 5-7 суток реализуется набухание угля;
- повторная гидрообработка первой скважины с закачкой 15-20 м<sup>3</sup> воды с темпом 10 л/с;

- бурение пластовых скважин для освоения обработанной зоны и снижения газоносности угля в зоне гидрообработки.

Данная технология позволяет увеличить радиус воздействия, т.к. на втором этапе воздействия снижаются потери рабочей жидкости на фильтрацию в стенки ранее образованных трещин.

В качестве критерия возможности использования данной технологии предлагается использовать показатель устойчивости трещин, которые могут быть определены лабораторным путем. Типичные кривые нагружения приведены на рис. 4.4, 4.5.

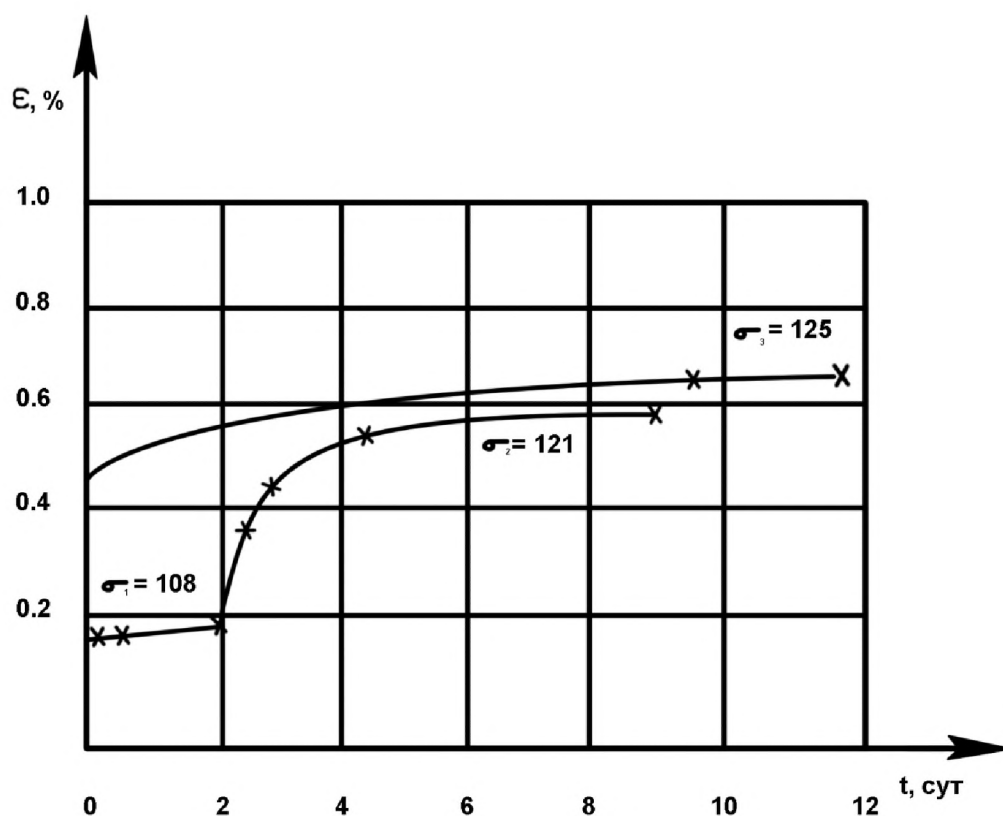


Рисунок 4.4 - Зависимость относительной деформации от времени

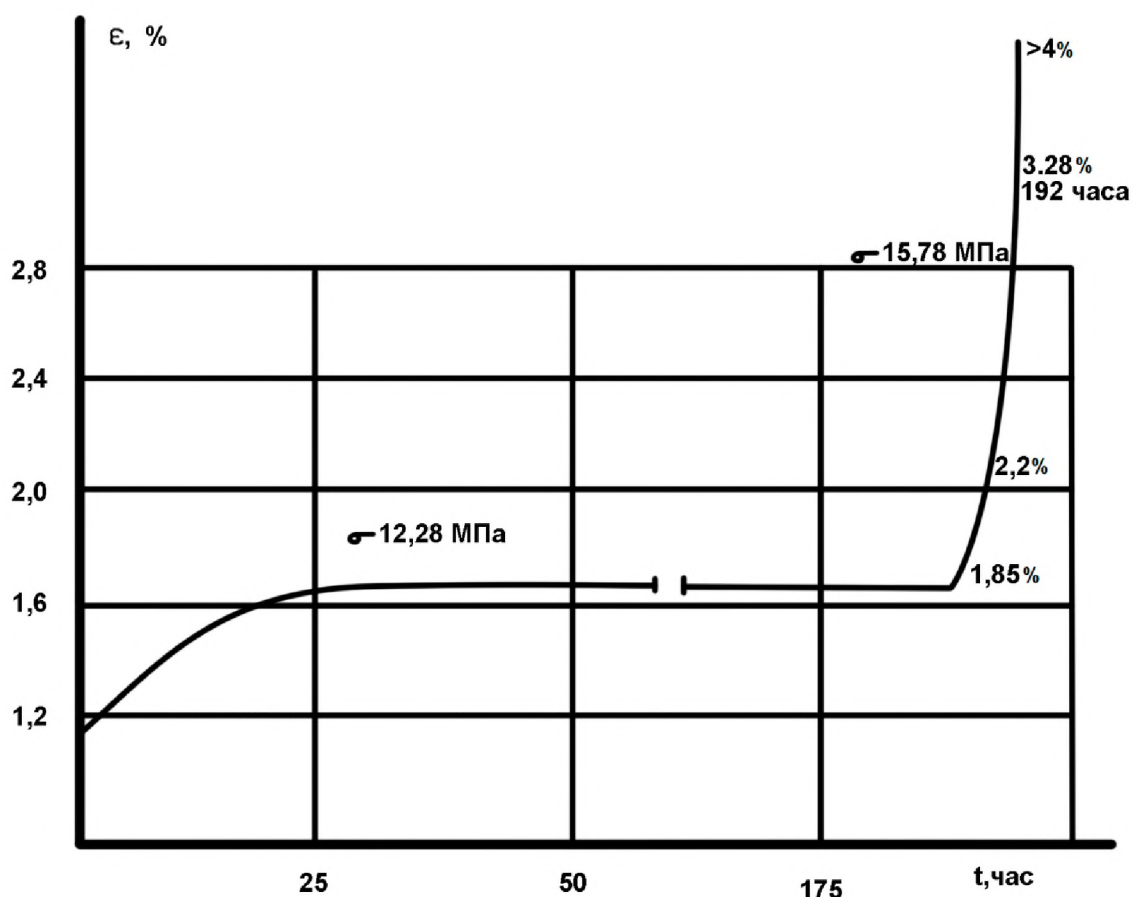


Рисунок 4.5 - Зависимость относительной деформации от времени для насыщенного образца

#### 4.3 Предложения по совершенствованию дегазации на шахтах СРВ

Среди парниковых газов, метан по парниковой активности в 21 раз превышает углекислый газ. В настоящее время на долю метана приходится 16% (без учета паров воды) [105-107] парникового эффекта, связанной с человеческой деятельностью. Ежегодно количество метана, выделяемого мировой добычей угля, составляет 6% от общего количества метана, выброшенного в атмосферу, эквивалентного примерно 400 млн. т  $\text{CO}_2$  (ЕРА, 2009) [105, 108-110]. При подземной добыче угля шахты Вьетнама ежегодно в атмосферу выделяют около 65000 тонн метана, что эквивалентно 1.365.000 тонн  $\text{CO}_2$  [111]. Кроме этого выделение метана не только усиливает парниковый эффект, но формируют опасность взрывов метана, которые

являются одними из самых опасных явлений при разработке запасов угля. В то же время метан угольных месторождений в последние годы рассматривается и как сырьевой ресурс, использование которого позволяет снизить себестоимость угледобычи. Вследствие этого, решение вопросов комплексного извлечения угля и метана не только позволит решить задачи повышения экономической эффективности шахт, но и проблемы, связанные с обеспечением промышленной и экологической безопасности.

В настоящее время в Вьетнаме только приведено опытно-промышленное испытание на шахте «Хечам» системы дегазации (рис. 4.6) и получены удовлетворительные результаты. Кроме этого, если метан вентиляционных струй и дегазации позволяет обеспечить кондиционный состав, то его можно использовать для выработки электроэнергии и получения тепла, а так же уменьшить загрязнение окружающей среды.

В этих условиях действующий подход прогноза метановыделения целесообразно применять при незначительных изменениях горно-геологических и горнотехнических условий. При этом используют данные геологоразведки, которые предусматривают только определение пористости и природной газоносности угольных пластов. При значительных изменениях горно-геологических условий для корректного прогноза метановыделения необходимо учитывать давление газа в поровом пространстве и кинетику сорбции.

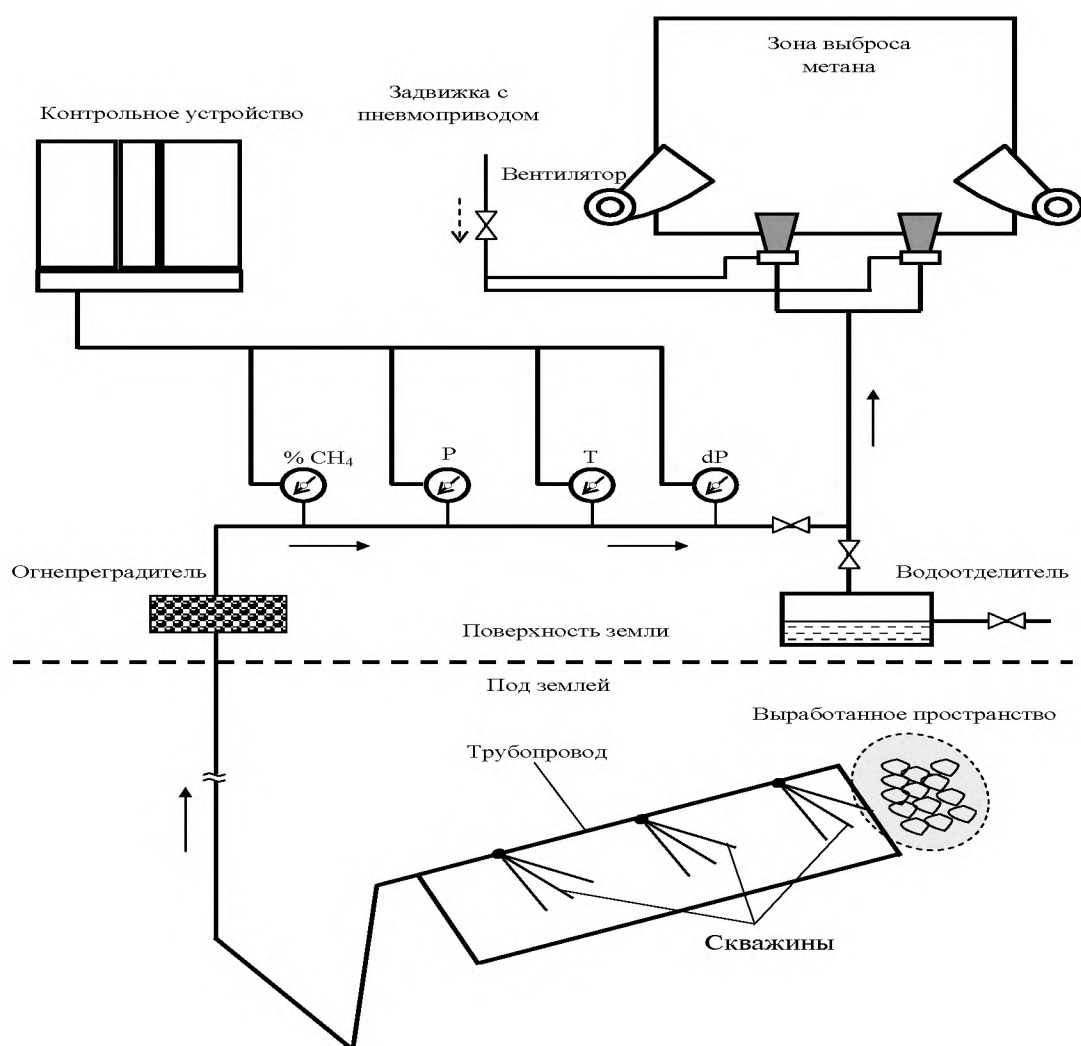


Рисунок 4.6 – Схема дегазации на шахте Хечам

Для повышения объемов угледобычи необходимо интенсифицировать газоотдачу разрабатываемых угольных пластов, в этой связи идет постоянное совершенствование технологии дегазации, так как при увеличении объемов работы должна обеспечиваться безопасная работа. Метан оказывает значительное влияние на парниковый эффект поэтому так же должна обеспечиваться его утилизация. Независимо от глубины залегания угольных пластов, существуют свои методы и подходы для дегазации пластов перед добычей угля. Все мероприятия, предпринимаемые по предварительной дегазации разрабатываемых угольных пластов, должны способствовать интенсивному процессу удаления метана и повышению производительности

добычи угля. Наибольшее распространение среди методов дегазации угольных пластов получили «гидродинамические» или «пневмогидродинамические воздействия». Воздействие на угольный пласт, содержащий в себе большое количество газа, используют комплексный технологический подход: пневмогидровоздействия воздействия.

Во всем мире активно используют метод гидрорасчленения, однако данный метод не лишен недостатков. К недостаткам гидрорасчленения можно отнести:

- 1) применение жидкостей в качестве рабочего флюида приводит к снижению газопроницаемости угольного пласта;
- 2) неравномерность зоны обработки скважины.

Существуют методы борьбы с этими недостатками. Для этого используют гидроимпульсное воздействие, в качестве материалов инициирующих гидроимпульс используются пороховые генераторы давления и горючие составы.

Осушение воды, то есть удаление ее из породы проводят совместно пневмо-гидродинамическому воздействию, при этом удаление воды и выделение(добыча) метана происходят одновременно. Существуют две основные причины по которым количество добываемого метана низкое:

- 1) Низкая проницаемость по газу угольного пласта;
- 2) Снижение проницаемости около скважины.

Описанные выше факты подвигли к разработке способов борьбы с ними, изобретен подход позволяющий интенсифицировать извлечение метана из породы так называемый метод пневматического воздействия через скважины с верхнего слоя.

Газопроницаемость массива можно повысить, если удалить воду из трещин, для этого подходит технология пневмооттеснения. Осуществляется данный подход путем накачки воздуха, это делается с использованием специализированной техники (воздушные компрессоры). Сорбционный объем

угля наполняется метаном, после того как рабочая жидкость была откачана (вытеснена) из порового пространства.

Есть так же методики, позволяющие интенсифицировать дегазацию и уменьшить в полтора раза газоносность угля, они так же относятся к режиму пневмогидровоздействий. Использование данной технологии снижает газообильность очистного забоя. Происходит это благодаря блокировке метана в трещинах и порах угольного пласта.

Таким образом при применении способов активного воздействия производительность угледобычи повышается. Стоит отметить, что в настоящее время апробировано и достаточно успешно применяются различные схемы интенсификации газовыделения при дегазации угольных пластов, однако промышленное значение пока имеет только гидроразрыв. Именно поэтому нами сделана попытка совершенствования технологии данного способа.

#### **Вывод по главе 4**

В настоящее время необходимо дальнейшее совершенствование управления газовыделением на основе использования программ по расчету и управлению системой вентиляции на шахтах, а также проведение ежегодной оценки категории шахт по метанообильности угледобычи и метаноносности угольных пластов.

Для снижения метаноопасности при отработке угольных пластов на шахтах Куангнинского угольного бассейна целесообразно использование дегазационной подготовки шахтных полей и выемочных участков. Применение эффективных способов дегазации угольных пластов должно осуществляться с учетом горногеомеханических факторов в зонах ее проведения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно - квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития угольной отрасли в части решения актуальной задачи развития технологий дегазации угольных пластов на основе применения вязких рабочих жидкостей для обеспечения раскрытия вторичных систем трещин.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

усовершенствована технология гидроразрыва разрабатываемый угольный пласт с использованием эффекта набухания угля, обеспечивающая снижение газоносности угля и напряженного состояния для предотвращения газодинамических явлений и загазирования горных выработок;

применение традиционных параметров гидрообработки приводит к раскрытию трещин в кровле и почве пласта, что снижает эффективность дегазационной подготовки.

моделирование процесса дегазации показывает, что в условиях шахты им. Кирова максимальный результат показала конфигурация скважины с обсаженным участком 50м и необсаженным 35 м, для эффективного моделирования процесса необходимым условием является определение фильтрационно-емкостных показателей угля и вмещающих пород, которые могут уточнены на основе решения обратной задачи о газовыделении в подготовительных выработках.

для условий шахты Мао Хе, где длина лав в настоящее время составляет от 60 до 230 м процесс естественной дегазации подготовительными выработками имеет важное значение для определения целесообразности проведения предварительной дегазации, т.к. может обеспечить до 20% съема метана.

Для условий шахты Мао Хе установлены зависимости отражающие связь метаноносности с глубиной залегания угольных пластов, которые могут быть использованы для оценки опасности ГДЯ.

Если в качестве критерия опасности ГДЯ принять величину газоносности в  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , то пласты 7D, 9ТВП являются не опасными до горизонтов соответственно «-220м» и «-300м», пласты 9D и 9Т опасны по внезапным выбросам с горизонтов соответственно «-160м» и «-140м».

Разработаны предложения по совершенствованию технологии дегазации на основе использования вязко-пластичных наполнителей для обеспечения раскрытия дополнительных систем трещин.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галазов Р.А., Айруни А.Т., Сергеев И.В. и др. Газообильность каменноугольных шахт СССР. Эффективные способы искусственной дегазации угольных пластов на больших глубинах. – М.: Наука, 1987. – 198 с.
2. Забурдяев В.С. Дегазация разрабатываемого пласта – эффективный способ повышения производительности и безопасности работ в метанообильных шахтах. М., ГИАБ, 1999г. №1, с.149-150.
3. Забурдяев В.С., Новикова И.А., Семькин Ю.А., Сметанин В.С. Структура газового баланса метанообильных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). // Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011, с.369 – 375.
4. Багриновский А. Д. Основы теории распределения воздуха в шахтных вентиляционных сетях // Рудничная аэрология: сб. научных трудов. — М.: изд. АН СССР, 1962. — С. 5–10.
5. Абрамов Ф. А. Воздухораспределение в вентиляционных сетях шахт / Ф. А. Абрамов, Р. Б. Тян, В. Я. Потемкин. — Киев: Наук.думка, 1971. — 136 с.
6. Айруни А.Т., Кузнецов Г.И., Слепцов Е.И. Способы и средства дегазации угольных пластов в практике наиболее развитых стран мира. - М.: ВИНТИ, т. 36. 1985. -219 с.
7. Айруни А.Т., Бобин В.А., Зверев И.В. и др. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах., М., Наука, 1987, 342с
8. Борщевич А. М., Ковалев Р. А., Бухтияров А. Ф., Сарычева И. В. Ограничение нагрузки на очистной забой по газовому фактору // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2010. №1. С.232-239.
9. Груздев В.А., Никишичев Д.Б. Совершенствование технологии отработки высокогазоносных угольных пластов. Горный информационно-аналитический бюллетень. • М.: МГГУ, 2002, № 11.-С. 158-161.

10. Забурдяев В.С. О необходимости разработки высокоэффективных способов и средств воздействия на массив угля через подземные скважины с целью снижения взрывов газа и пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. - 2004. - С. 140-143.
11. Забурдяев В.С. Дегазация разрабатываемого пласта – эффективный способ повышения производительности и безопасности работ в метанообильных шахтах. М., ГИАБ, 1999г. №1, с.149-150.
12. Забурдяев В.С., Новикова И.А., Семькин Ю.А. Эффективность дегазации сближенных угольных пластов вертикальными скважинами при высоких скоростях подвигания лав. Журнал "Безопасность труда в промышленности". 2011, №12. с. 52-53.
13. Абрамов Ф. А. Расчет сложных вентиляционных сетей методом касательных гипербола / Ф. А. Абрамов, Р. Б. Тянь, В. Я. Потемкин // Изв. вузов. Горн. журн. — Екатеринбург: изд. УГГУ, 1969. — №12. — С. 65–69.
14. Гришин В.Ю., Мазаник Е.В., Шевченко Л.А. Новые технологии дегазации шахт Кузбасса // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 19-22.
15. Гурьянов В.В., Труфанов В.Н., Матвиенко Н.Г., Бобин В.А. Формы нахождения метана в углях и геотехнологические методы дегазации угольных пластов. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ. 2000. 64 с.
16. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Уточнение технологических решений при проектировании выемочных участков и управлении газовыделением Вестник КузГТУ: 2014, № 3, С. 28-32.
17. Коликов К.С., Кашапов К.С., Иванов Ю.М. Опыт заблаговременного извлечения метана из угольных пластов Карагандинского бассейна// Технологии нефти и газа. 2011, №1. С. 37-41.
18. Проблемы разработки угольных пластов, извлечение и использование шахтного метана в Печорском бассейне/И. В. Сергеев, В.С.

Забурдяев, А.Д. Рубан, Е.Я. Диколенко и др.-М.: ННУГП-ИГД им. А.А. Скочинского 2002. - 350 с.

19. Рубан А.Д. Проблема шахтного метана в России. Уголь. 2012, № 1, С.23-27.

20. Рубан А.Д., Шатиоров С.В., Гранин И.В. Газо-угольная стратегия в топливообеспечении России. М.: ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского, 2000. - 101 с.

21. Coal Mine Methane Global Overview/U.S. Environmental Protection Agency's Coalbed Methane Outreach Program. 2006, August.

22. Сайт компании Austar Gas Pty Ltd (AG). <http://austargas.com.au/austar-gas.html>

23. Оганов С.А., Костеренко В.Н., Садов А.П., Байсаров Э.Э. Строительство горизонтальных скважин с дневной поверхности для дегазации угольных шахт с целью предупреждения внезапных выбросов метана и обеспечения эффективного управления газовыделением на выемочных участках, а также для решения задач защиты горных выработок от водопритоков// Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса.- М.: Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2014. - № 1. - С. 36-41

24. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 1 декабря 2011 г. № 680 об утверждении инструкции по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Зарегистрировано в Минюсте РФ 29 декабря 2011 г. № 22815. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 2012, № 17.

25. [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/pub/BestPractGuide\\_MethDrain\\_es31\\_r.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/pub/BestPractGuide_MethDrain_es31_r.pdf)

26. Черняк И.Л., Ярунин С.А., Бурчаков А.С. Технология и механизация подземной добычи угля. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности `Физические процессы горного производства`. М. Недра 1981г. 384 с

27. Шевченко, Л.А. Пути повышения эффективности дегазации угольных пластов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.: Горная Книга, 2011.- Отдельный выпуск №7.

28. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Современные проблемы метанобезопасности при высокопроизводительной отработке угля. ГИАБ, Труды научного симпозиума Неделя Горняка – 2011, отдельный выпуск 1, 2011. С. 202-210.

29. Сластунов С.В, Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт. // Уголь.- М.: 2013.-№1. С. 21-24.

30. Устинов, Н.И. и др. Газообильность и нагрузка очистных забоев при высокопроизводительной выемке газоносных угольных пластов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. 2001. -№ 5. - С. 49-54.

31. Васильев А.В. Задачник по подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых / А.В.Васильев, В.П.Зубов, К.Г.Синопальников. СПб – М.: Изд-во ООО "ИМИДЖ-ПРЕСС", 2012. 377 с.

32. Бурчаков А.С. Технология и механизация подземной разработки пластовых месторождений: Учебник для вузов /А.С. Бурчаков, Ю.А. Жежелевский, С.А. Ярунин. М.: Недра, 1989. 431 с.

33. Белан А. Е. Универсальный метод расчета кольцевых вентиляционных сетей // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — Новосибирск: изд. НГАСУ, 1964. — № 4. — С. 69–73.

34. Багриновский А. Д. Регулирование распределения воздуха в диагональных соединениях выработок // Проблемы рудничной аэрологии: сб. научных трудов. — М.: изд. АН СССР, 1963. — С. 9–17.
35. Васючков Ю.Ф. Горное дело: Учеб. Для техникумов – М.: Недра. – 190.- 512 с.
36. Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. - М.: Изд-во АГН, 2000. -519с.
37. Давыдов Е.Г. Метод пропорциональных поясных сопротивлений для расчета заданного распределения воздуха в вентиляционных сетях / Е. Г. Давыдов, Р. И. Габайдуллин, А. М. Чеховских // Изв. вузов. Горный журнал. — Екатеринбург: изд. УГГУ, 1992. — №2. — С.74–78.
38. Гендлер С.Г. Обоснование режимов работы автоматизированной системы управления параметрами микроклимата в Северо-Муйском железнодорожном тоннеле / С. Г. Гендлер, В. А. Соколов, Б. Н. Пищик // Горный инф.-анал. бюл. — Москва: ММГУ, 2002. — №8.— С. 148–153.
39. Васильев А.В., Зубов В.П., Синопальников К.Г. задачник по подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие / Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". Издательство ООО «Типография «Имидж-Пресс», СПб – М, 2012. 377 с.
40. Малинникова О.Н., Ерусланов А.П., Прохвятилов С.А. Газообильность выработанного пространства выемочного участка при наличии тектонических разломов // Безопасность труда в промышленности.-М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2014.-№ 5.-С. 46-48.
41. Бурчаков А.С., Жежелевский Ю.А., Ярунин С.А. Технология и механизация подземной разработки пластовых месторождений: Учебник для вузов.-М.: Недра, 1989.-431с.

42. Еременко В.А., Разумов Е.А., Зяятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления. Материалы Международной молодежной конференции «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». 19-23 ноября 2012 г. — Т 2. — Москва: ИПКОН РАН, 2012. — С. 520-523.

43. Козырев С. А., Вассерман А. Д., Осинцев В. В., Осинцева А. В. // Инновационные технологии и современные методы инженерного обеспечения горно-обогатительного производства: сб. инновационных проектов. — Апатиты: КНЦ РАН; СПб, 2010. — С. 14–16.

44. Казаков Б. П. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных шахт и рудников / Б. П. Казаков, Ю. В. Круглов, А.Г. Исаевич, Л. Ю. Левин // Горный инф.-анал. бюл. — Москва: ММГУ, 2006. — № S3. — С. 21–33.

45. Зубов В.П., Вьет К.К. Практический опыт использования систем разработки мощных крутых пластов в условиях бассейна Куанг Нинь // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) - № 02. –2015, - С. 10-14

46. Лупий М.Г. Обоснование технологии комплексной дегазации выемочных участков при высокоинтенсивной разработке газоносных угольных пластов. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. Наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010, 21 с.

47. Мазаник Е.В. Совершенствование технологии дегазации угольных шахт на основе заблаговременной поэтапной скважинной подготовки шахтных полей Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010, 21 с.

48. Семькин Ю.А. Опыт ведения работы высокопроизводительной лавы №808 шахты. ISBN: 0236-1493//Горный информационно-аналитический

бюллетень. Отдельный выпуск № 2. Сборник научно-технических работ горных инженеров СУЭК. – 2013. - С.296-299.

49. Бурчаков А.С., Жежелевский Ю.А., Ярунин С.А. Технология и механизация подземной разработки пластовых месторождений: Учебник для вузов.-М.: Недра, 1989.-431с.

50. Васючков Ю.Ф. Горное дело: Учеб. Для техникумов – М.: Недра. – 190.- 512 с.

51. Линник Ю.Н. Мерзляков В.Г., Линник В.Ю. Прогнозная оценка условий безопасности ведения горных работ на шахтах в период до 2030 года. // Маркшейдерский вестник, – М.: ФГУП «Гипроцветмет», 2010. - № 4. С. 38-44. (6/4,5 с.)

52. Линник В.Ю. Сравнительный анализ технического уровня и эффективности применения очистного оборудования угольных шахт. В ж-ле: Горное оборудование и электромеханика. – М.: Новые технологии, 2012. № 1. С.2-8.

53. Семькин Ю.А. Опыт ведения работы высокопроизводительной лавы №808 шахты. ISBN: 0236-1493//Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 2. Сборник научно-технических работ горных инженеров СУЭК. – 2013. - С.296-299.

54. Черняк И.Л., Ярунин С.А., Бурчаков А.С. Технология и механизация подземной добычи угля. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности `Физические процессы горного производства`. М. Недра 1981г. 384 с

55. Шувалов Ю.В. Комплексное использование ресурсов и регулирование газового режима шахт Воркутского месторождения / Ю.В. Шувалов, И.А. Павлов, А.П. Веселов. С-Пб.: Изд-во ООО «Диамант», 2006. - 392 с.

56. Цой С. Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями/ С. Цой, Г. К. Рязанцев. — Алма-Ата: Наука, 1968. — 257 с.

57. Потемкин В. Я. Метод декомпозиции сетевых законов для оптимизации потокораспределения в шахтных вентиляционных сетях / В. Я. Потемкин, М. П. Комаров // Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах : сб. научных трудов ИГД СО АН СССР. — Новосибирск: изд. ИГД СО АН СССР, 1977 — С. 50–52.

58. Палеев.Д.Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий/ Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н.Костеренко, А.Н. Тимченко//Издательство «Горное дело». том 6. Промышленная безопасность. Книга 2. Москва. 2011. 160 с

59. Осинцева А. В. Оптимизация количества и мест расположения регуляторов в вентиляционной системе рудника для обеспечения заданного распределения воздуха / А. В.Осинцева, В. В. Осинцев, С. А. Козырев // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: сб. тр. Всероссийской научной конференции с международным участием. — Апатиты; Санкт-Петербург: Реноме, 2009. — С. 233–237.

60. Осинцева А.В. Оптимизация размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма/ Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Апатиты. -2011. 20 с.

61. Осинцева А. В. Обоснование эффективных вариантов регулирования вентиляции подземного рудника и оптимизации параметров регуляторов посредством генетического алгоритма / А. В. Осинцева, С. А. Козырев // Вестник МГТУ. — Мурманск: Изд. МГТУ, 2011. — Том 14, № 3. — С. 530–534.

62. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугин Н.А. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта. Журнал технической физики, 2007, 77. вып. 4. С. 65-74.
63. Антощенко Н.И. Физико-математическая модель динамики метановыделения из подрабатываемых угольных пластов/Н.И. Антощенко, С. И. Кулакова // Горный журнал. –М.: Издательский дом "Руда и металлы", 2012.- № 8. - С. 89-93
64. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Обоснование допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Москва, Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2009», ИД ООО «Роликс», 2009г., с.151-159.
65. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Аналитическая методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору. Журнал Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 6. 2013. С.53-59
66. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкости и газа в природных пластах. – М.: Недра, 1984. –211с.
67. Полубаринова-Кочина П.Я. О неуставновившейся фильтрации газа в угольном пласте. Прикладная математика и механика. Том XVII, 1953. Институт механики Академии наук союза ССР. С 735-738.
68. Шмат В.Н. Совершенствование технологии пластовой дегазации угольных пластов в условиях их интенсивной разработки. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГТУ, 2012. 23с
69. Koza J. R. Genetic programming. — Cambridge, Massachusetts; London, England: A Bradford Book The MIT Press, 1998. — 814 p.
70. Lowndes I. S. The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: the influence of coding method and

population size [Электронный ресурс] / I. S. Lowndes, T. Fogarty, Z. Y. Yang // Soft Comput, 2005. — vol. 9. — pp. 493–506.

71. Полубаринова-Кочина П.Я. О неуставновившейся фильтрации газа в угольном пласте. Прикладная математика и механика. Том XVII, 1953. Институт механики Академии наук союза ССР. С 735-738.

72. Черных В.А. Черных В.В. Учебное пособие: Физические основы неклассической теории фильтрации нефти и газа/ СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2005.-58с

73. Нгуен Тхе Ха, Гендлер С.Г. Исследование природной метаноносности угленосной толщи и метанообильности шахты Мао Хе (Вьетнам) // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ 7. Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. – 2015. – С. 39–46.

74. Solomatin D. P. Genetic and other global optimization algorithms // Proc. 3rd Intern. Conf. on Hydroinformatics. — Copenhagen, Denmark :BalkenaPubl, 1998. — pp. 1021–1028.

75. The practical handbook of genetic algorithms : the new frontiers. Vol. II / ed. By Lance D. Chambers. London, NewYork : CRC Press, 1995. — 421 p

76. Viet C.Q. Need of development of technological mining in the coalseams with backfill in Vietnam // Scientific reports on resource Issues. 2013 - Volume 1 part I(International University of Resources), - P. 126 -129.

77. Yang Z. A. Optimization of subsurface ventilation systems – application of genetic algorithms / Z. A. Yang, I. S. Lowndes, B. Denby // Proc. of the 27-th Int. Symp. On Comp. Appl. In the Min. Ind. — London: 1998. — p. 753–764.

78. Нгуен Тат Тханг. Гидрогеохимические процессы и эволюция минерального и газового состава подземных вод угольного месторождения Маохе (северо-восток Вьетнама) : дис. канд. техн. наук: 25.00.07 / Нгуен Тат Тханг. – СПб., 2016. – С.10.

79. Нгуен Тьен Бао. Геологические условия метаморфизма углей и газоносности угольных бассейнов и месторождений Вьетнама : Дис. ... докт. техн. Наук : 04.00.16/ Нгуен Тьен Бао. — Москва., 1991. — 13с.

80. Лидин Г.Д. К вопросу о закономерности выделения метана из угля, отторгнутого от массива // Управление газовыделением и пылеподавлением в шахтах. Сб.ст./Недра. М., 1972. С. 37-41.

81. Лидин Г.Д., Эттингер И.Л., Шульман И.М. О возможности теоретического расчета потенциальной метаносности угольных пластов на больших глубинах // Уголь. 1973. № 5. С. 13-15.

82. Эттингер И.Л. Газоемкость ископаемых углей. М.: Недра, 1966. - 223 с.

83. Эттингер И.Л., Радченко С.А. Время релаксации как характеристика метанопереноса в углях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1988. № 4. С. 97-101.

84. Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. М.: Недра, 1981. — 335 с.

85. Айруни А.Т., Бобин В.А. Модель макро-структуры угольного вещества // Известия вузов. Горный журнал. 1987. № 2. С. 46-52.

86. Айруни А.Т., Бобин В.А., Зверев И.В. Теоретические основы формирования микроструктуры газонасыщенного угольного вещества // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1985. № 6. С. 89-96.

87. Айруни А.Т., Иофис М.А., Зенкович Л.М. Научные основы определения газопроницаемости горных массивов при изменяющихся фильтрационных параметрах // Прогноз и предотвращение газопроявлений при подземной разработке полезных ископаемых: Сб. ст./ ИНКОН АН СССР. М., 1982. С. 158-170.

88. Рудничная вентиляция: / Справочник под ред. К.З.Ушакова. - М.: Недра, 1988. С. 29.

89. Стукало В.А. Совершенствование оценки угольных шахт по опасности выделений метана, участию во взрывах угольной пыли и тепловым условиям / В.А Стукало // «Известие» Донецкого горного института №2 / Донецк, 1996, С. 15–17.

90. Мясников А.А. Научные основы метановыделения и проветривания шахт Кузнецкого бассейна. Дис. ...докт.техн.наук. Кемерово, 1968. 426 с.

91. Slastunov S.V., Karkashadze G.G., Kolikov K.S., Ermak G.P. Method of calculating the permissible load on the cleaning coal face by gas factor. FTPRPI. 2013. no. 6. pp. 53—59. [In Russ]

92. Nozhkin N.V. Zablagovremennaya degazaciya ugol'nyh mestorozhdenij [Earlydegassing of coal deposits]. Moscow: Nedra. 1979. 271 p. [In Russ]

93. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. Izvlechenie metana iz ugol'nyh plastov [Extraction of methane from coal seams]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2002. 383 p. [In Russ]

94. Slastunov S.V., Kolikov K.S., Kashapov K.S., Groznov N.N., Shmidt M.V. Experience and prospects of advance degassing in the Karaganda coal basin. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. Otd. vypusk no. 11 «Metan». 2009. pp. 17—26. [In Russ]

95. Slastunov S.V., Mazanik E.V., Sadov A.P., Ponizov A.V. Deepening of reservoir degassing on the basis of improved technology of underground hydraulic fracturing. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2016. no. 9. pp. 296—302 [In Russ]

96. Нгуен Тхе Ха. Обоснование рациональных способов обеспечения воздухом выемочных участков угольных шахт Вьетнама при углублении горных работ: Дисс. канд. техн. наук: 25.00.20/ Нгуен Тхе Ха; НМСУ «Горный». — С.-Петербург, 2016, — 131 с.

97. Гендлер С.Г., Нгуен Тхе Ха. Обоснование рациональных способов обеспечения воздухом выемочных участков действующих угольных шахт вьетнама при углублении горных работ// Записки Горного института. 2018. Т. 234. — С. 652—657.

98. Эпштейн С.А. Физико-механические свойства витринитов углей разных генотипов//ГИАБ, 2009. №8, с. 58-69.

99. Эпштейн С.А., Барабанова О.В., Минаев В.И., Вебер Ж., Широчин Д.Л. Влияние обработки углей диметилформамидом на их термическую деструкцию и упругопластические свойства// Химия твердого топлива, 2007, №4, с. 22-28.

100. Эпштейн С.А., Монгуш М.А., Нестерова В.Г. Методы прогноза склонности углей к окислению и самовозгоранию//ГИАБ, 2008, №12, с.211-214.

101. Romanchenko, S.B., Gendler, S.G., Timchenko, A.N., & Kosterenko, V.N. (2017). Eksperimentalnyie i teoreticheskiie issledovaniia vzryvoopasnykh rudnichnykh aerosolei [Experimental and theoretical studies of explosive mine aerosols]. GIAB special edition, 5-1, 181-190 [in Russian].

102. Slastunov S.V., Yutyaev E.P., Mazanik E.V., Sadov A.P., Ponizov A.P. Ensuring methane safety of mines based on deep degassing of coal seams in their preparation for intensive development. Ugol'. 2019. no. 7. pp. 42—47. [In Russ]

103. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах. Серия публикаций еэпо энергетике, № 47. Второе издание, декабрь 2016. Издание Организации Объединенных Наций, 2016 год. — 132с.

104. Йен Грей и Джефф Вуд, Сигра Лтд. Внезапные выбросы в угольных шахтах. Последовательный подход для повышения эффективности эксплуатации. Outbursts in UG Coal Mines — A Coherent Approach for Improved Management 2013.

105. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/09001-rel3.pdf>.

106. Özgen C. Karacan, Felicia A.Ruiz, Michael Cotè, Sally Phipps. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. International Journal of Coal Geology. Volume 86, Issues 2–3, 1 May 2011, Pages 121–156

107. Izzet Karakurt, GokhanAydin, KerimAydiner. Mine ventilation air methane as a sustainable energy source. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 2, February 2011, Pages 1042–1049
108. Сластунов С.В., Коликов К.С., Каркашадзе Г.Г., Ермак Г.П. Извлечение и использование шахтного метана – основа рациональной разработки угольных месторождений. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 5. – С. 235–239
109. Сластунов С., Мазаник Е., Лупий М. Метанобезопасность разработки угольных пластов на основе их дегазации. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2016, 365 с.
110. Пучков Л.А., Сластунов С.В. Освоение углегазовых месторождений: основные технологических решения. Газовая промышленность. – 2010. – №7. – С.26–29.
111. Отчет угольной компании «Винакомин» об использовании угля в народном хозяйстве СРВ. Ханой, 2017, 168с.
112. Решение № 595/QĐ –ВСТ. Министерство Промышленности и Торговли Вьетнам. – 2018.
113. Van Thinh Nguyen, Waldemar Mijał, Vu Chi Dang, and Thi Tuyet Mai Nguyen. Methane Content Estimation in DuongHuy Coal Mine. E3S Web of Conferences 35, 01005 (2018).
114. Стандарт Вьетнама QCVN 01:2011/ ВСТ/ -2011.
115. Фам Дик Тханг, Виткалов В.Г., Фам Нгок Хюнь. Стратегия развития угольной промышленности и возможность применения механизированной технологии добычи угля в Куангнинском угольном бассейне Вьетнама. Горный информационно-аналитический бюллетень. -2018. -№8.– С. 65–70
116. Копытов А.И. Современные методы добычи метана из угольных пластов / А.И. Копытов, М.Д. Войтов, С.М. Тагиев // Вестник КузГТУ, 2016. № 2. С. 35-40.

117. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Презент Г.М. Перспективы промышленного извлечения угольного метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Изд-во МГГУ, 2002. № 6. С. 6-10
118. Adachi J., Siebrits E., Peirce A., Desroches J. Computer simulation of hydraulic fractures // Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences, 44, 2007, pp. 739–757.
119. Салимов О.В. Совершенствование методов проектирования и анализа результатов гидравлического разрыва пластов. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук, Бугульма. 2009. –С. 28с.
120. K.T. Raterman, H.E. Farrell, O.S. Mora, A.L. Janssen, G.A. Gomez, ConocoPhillips, URTeC 2017: 2670034 «Sampling a Stimulated Rock Volume: An Eagle Ford Example».
121. K.T. Raterman, Y.Liu, L.Warren, ConocoPhillips, URTeC 2019: 263 «Analysis of a Drained Rock Volume: An Eagle Ford Example».
122. Ames, B.C., and Bungler, A. 2015. Role of Turbulent Flow in Generating Short Hydraulic Fractures With High Net Pressure in Slickwater Treatments. Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, 3-5 February. SPE-173373- MS. <http://dx.doi.org/10.2118/173373-MS>
123. Решение № 595/QD –ВСТ. Министерство Промышленности и Торговли Вьетнам. – 2018.
124. Van Thinh Nguyen, Waldemar Mijał, Vu Chi Dang, and Thi Tuyet Mai Nguyen. Methane Content Estimation in DuongHuy Coal Mine. E3S Web of Conferences 35, 01005 (2018).
125. Стандарт Вьетнама QCVN 01:2011/ ВСТ/ -2011.
126. Фам Дик Тханг, Виткалов В.Г., Фам Нгок Хюнь. Стратегия развития угольной промышленности и возможность применения механизированной технологии добычи угля в Куангнинском угольном бассейне Вьетнама. Горный информационно-аналитический бюллетень.-№8. -2018. – С. 65-70.

127. Фан Туан Ань, Фам Дик Тханг, Коликов К.С. Оценка метаноопасности и необходимости дегазации на шахтах Куангниньского угольного бассейна СРВ// Безопасность и экология горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5 (СВ 10). – С. 20-25.

128. Фам Дик Тханг, Фан Туан Ань, Коликов К.С. Зависимость метаноносности и относительной метанообильности угольных пластов на шахте Мао Хе от глубины их залегания// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6-1. – С. 26–37.

129. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Макеевка – Донбасс, 1989.

130. Стефлюк Ю.М. Обоснование выбора технологии пластовой дегазации выбросоопасных угольных пластов для обеспечения их безопасной и интенсивной отработки. Дисс. .... канд. техн. наук, -М.: МГГУ, 2012. – 208 с.

131. Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах. М.: Недра, 1977.

132. Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Оценка эффективности дегазации подрабатываемых смежных угольных пластов с помощью математического моделирования.//Эффективные способы управления газовыделением в угольных шахтах. Тр. Вост. НИИ. 1981. Т.20. С. 11-16.

133. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Сб. научн. трудов по материалам симпозиума "Неделя горняка-2009". М. Изд.МГГУ, 2009г. С. 151-159.

134. Черных В.А., Черных В.В. Физические основы неклассической теории фильтрации нефти и газа. Учебное пособие. СПб. Санкт-Петербургский государственный горный институт. 2005. 58с.

135. Palmer, I.D. and Mansoori, J. "How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model", SPE Res. Eval. and Eng., p 539, Dec 1998.

136. SPE/DOE 13858 “Fracturing Without Proppant” U.S. Department of Energy by T.R. Harper,\* J.T. Hagan, and J.P. Martins, British Petroleum Co.

137. Лама Р.Д. Безопасные пороговые значения газоносности против выбросов при разработке пластов Були. – Межд. Симпозиум по управлению и контролю высоких эмиссий газа и выбросов в подземных угольных шахтах. – Австралия, С. 175-189, 1995.

138. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Программа расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой угольной шахты по газовому фактору/ Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614769 дата регистрации 23 июня 2015г.

139. Экономидес М., Нолте К. Повышение продуктивности нефтегазовых коллекторов. — М.– Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2011.

140. Коликов К.С. Повышение безопасности разработки угольных месторождений и комплексное освоение их ресурсов на основе аблаговременного извлечения метана. Дисс. ....докт. техн. наук. М.: МГГУ. 2002 г.