

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

На правах рукописи

Пащенко Павел Николаевич

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СОРБЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ДЛЯ ПРОГНОЗА ГАЗООБИЛЬНОСТИ
ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук,
Винников В.А.

Москва, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1 Современное состояние исследований в области определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств углепородного массива и прогноза газообильности выемочных участков угольных шахт.	10
1.1 Мировые тенденции в области подземной разработки угольных месторождений	12
1.2 Современное состояние теоретических подходов к описанию процессов массопереноса метана в угольном пласте и отбитом угле	16
1.3 Методы прогноза газообильности угольного пласта.....	22
1.4 Обзор и анализ существующих способов и средств определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта и отбитого угля	27
1.4.1 Анализ существующих способов определения проницаемости угольного пласта.....	27
1.4.2 Анализ существующих способов определения параметров сорбции Ленгмюра для отбитого угля	31
1.4.3 Существующие способы определения пластового давления метана.....	36
Выводы по главе и постановка задач исследований	37
2 Совершенствование аппаратного обеспечения для определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях.....	39
2.1 Описание экспериментальной установки.....	39
2.2 Обоснование параметров установки.....	43
2.3 Результаты определения сорбционных свойств отбитого угля в лабораторных условиях	44
Выводы по главе	51
3 Разработка способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в натурных условиях	52

3.1 Описание экспериментального оборудования и методики определения пластового давления в условиях шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс»	52
3.1.1 Совершенствование существующей методики определения пластового давления. Обоснование способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки	57
3.1.2 Обоснование эффективных параметров экспериментальной скважины для проведения испытаний при помощи гидровоздействия на пласт	60
3.2 Результаты определения пластового давления метана в шахтных условиях, полученные с применением усовершенствованного способа	62
3.3 Результаты экспериментов по определению сорбционных свойств и проницаемости угольного пласта в шахтных условиях (до и после гидровоздействия)	69
Выводы по главе	78
4 Прогноз газообильности и предельно-допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору на основе разработанного способа определения параметров массопереноса метана	79
4.1 Обоснование методики прогноза газообильности очистного забоя, а также её совершенствование с учётом определённых ранее свойств угольного пласта	79
4.2 Влияние предельной сорбционной ёмкости на газообильность забоя и производительность отработки угля	95
4.3 Сравнение результатов прогноза газообильности, полученных при использовании в расчётах параметров сорбции Ленгмюра, определённых по результатам лабораторных и натурных испытаний.	98
Выводы по главе	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104

Приложение А	118
Приложение Б	132
Приложение В.....	150
Приложение Г	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Повышение глубины разработки угольных месторождений сопровождается возрастанием газовыделения в выработанное пространство, и проблема борьбы с газом приобретает всё большее значение. Применение современных добычных комплексов позволяет интенсифицировать добычные работы, но высокие темпы разработки высокогазоносных угольных пластов могут обострить проблему борьбы с газом и проветриванием горных выработок. В таких условиях для повышения производительности труда и обеспечения безопасности необходим прогноз газообильности. Такой прогноз предполагает наличие значений пластового давления метана и параметров сорбции Ленгмюра. При этом, параметры сорбции определяются в настоящее время в лабораторных условиях на основе анализа кернов, извлекаемых из массива. Однако, сорбционные параметры, определенные на образцах, недостаточно достоверно отражают реальные значения этих параметров в угольном массиве, поскольку образцы угля, извлечённые из массива, не соответствуют состоянию массива угля, к тому же на результаты определения искомых свойств оказывает влияние масштабный фактор и нарушенность образцов. Что касается пластового давления, то прямое измерение этого параметра в закрытой пластовой скважине осложняется длительным временем достижения установившегося значения, что не позволяет сотрудникам шахты оперативно получать информацию о пластовом давлении с целью своевременного контроля производственных ситуаций.

Поэтому разработка новых способов, позволяющих повысить достоверность и оперативность определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта непосредственно в массиве угля является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволяет повысить достоверность прогноза газовыделения в горные выработки и очистной забой.

Работа выполнялась в течение 2014-2018 г.г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Исследование и разработка способов предварительного и оперативного прогноза газообильности горных выработок в условиях интенсивной отработки угольных пластов» (соглашение о предоставлении субсидии №14.575.21.0025 от 23.06.2014), а также в рамках хоздоговорной тематики с АО «СУЭК-Кузбасс».

Целью работы является теоретическое и экспериментальное обоснование нового подхода к определению сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта с использованием результатов измерений параметров газовыделения непосредственно в массиве и разработка на этой основе способа, позволяющего повысить достоверность и оперативность определения указанных свойств.

Основная идея работы состоит в использовании решения нестационарной задачи массопереноса для определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта по полученным непосредственно в массиве экспериментальным данным о пластовом давлении и временной зависимости дебита метана.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Проницаемость не разгруженного от горного давления угольного пласта и параметры сорбции Ленгмюра определяются из решения задачи массопереноса метана путем сопоставления результатов компьютерного моделирования этого процесса с экспериментальными кривыми изменения дебита метана во времени его истечения из пластовых скважин.

2. Оценка истинного пластового давления метана в угольном пласте находится как среднее значение верхнего (P_v) и нижнего (P_n) пределов пластового давления, первый из которых определяют путём измерения установившегося давления рабочей жидкости в экспериментальной скважине после гидроразрыва или гидрорасчленения пласта, а второй – по измеренному

значению давления газа в закрытой скважине после истечения из неё рабочей жидкости.

3. Измерение пластового давления с использованием гидровоздействия на пласт и получение временной зависимости дебита метана непосредственно в угольном пласте обеспечивает повышение достоверности и оперативности определения сорбционно-кинетических свойств угольного пласта.

Методология и методы исследования:

анализ и обобщение научно-технической информации; компьютерное моделирование процесса массопереноса метана в углепородном массиве; лабораторный эксперимент на образцах угля; натурные эксперименты в шахтных условиях по определению дебита метана и определению пластового давления.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием при проведении исследований апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов и программ компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных, а также средств измерений с высокими метрологическими характеристиками;

- удовлетворительной сходимостью полученных с помощью предложенного способа результатов расчётов прогнозных значений газообильности очистного забоя с фактическими данными газообильности на примере шахты им. С. М. Кирова АО «СУЭК–Кузбасс» (расхождение не более 8-12%).

- положительными результатами апробации методики определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки в условиях действующей шахты Кузбасса;

- удовлетворительными результатами сопоставления данных, рассчитанных при помощи апробированного программного комплекса Comsol Multiphysics на основе теоретической модели процесса массопереноса метана,

с экспериментальными данными, полученными непосредственно в натурных условиях.

Научная новизна работы заключается:

- в обосновании нового подхода к определению сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта с использованием измеренных непосредственно в массиве значений пластового давления и временной зависимости дебита метана из решения задачи процесса массопереноса;

- в обосновании возможности определения оценки истинного значения пластового давления по измеренным в массиве значениям верхнего и нижнего пределов пластового давления;

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложено использовать решение задачи массопереноса метана в угольном пласте для определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного массива при помощи полученных в шахтных условиях экспериментальных данных о пластовом давлении и временной зависимости дебита метана;

- разработан способ определения пластового давления метана и сорбционных характеристик угольного пласта в исходном и увлажнённом состояниях в зоне гидравлической обработки в шахтных условиях, повышающий достоверность и оперативность определения искомых параметров;

- разработана «Методика определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях»;

- разработана «Методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки».

Реализация выводов и рекомендаций работы

- разработанный способ определения пластового давления и сорбционных параметров угольного пласта реализован на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК–Кузбасс».

- разработанные методики определения параметров массопереноса метана по результатам шахтных и лабораторных экспериментов приняты к использованию АО «СУЭК–Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (2016–2018 гг.), на научных семинарах и заседаниях кафедр физических процессов горного производства и геоконтроля, безопасности и экологии горного производства (2017–2018 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, и получен 1 патент РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 12 таблиц, 27 рисунков, список литературы из 116 наименований.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Винникову В.А., а также профессорам д.т.н. Сластуну С.В. и Коликову К.С. за помощь в выполнении научных исследований, поддержку, ценные замечания и научно-методические консультации. Особая благодарность проф., д.т.н. Каркашадзе Г.Г., который был первым руководителем и идейным вдохновителем этой работы.

1 Современное состояние исследований в области определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств углепородного массива и прогноза газообильности выемочных участков угольных шахт.

Указом Президента РФ от 07.07.2011 № 899 утверждён список приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечень критических технологий РФ, который включает в себя в частности «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» в рамках которой и представлена данная диссертационная работа.

В настоящее время уголь считается одним из наиболее надёжных и экономически рациональных невозобновляемых первичных энергетических источников, мировые ресурсы которого в несколько раз больше ресурсов нефти и газа [1]. Сложно недооценить значимость угля для мировой экономики на текущем этапе её развития. Уголь является первым горючим полезным ископаемым, обнаруженным человеком и по сей день остается самым масштабным энергетическим сырьем, которое добывают и потребляют в более чем 50 странах мира, на всех континентах и во всех регионах Земли (исключение составляет лишь Антарктида, где открыты угольные месторождения, однако их разработка пока запрещена согласно международным соглашениям). Стоит отметить, что сланцевая нефть и газ не могут составить конкуренцию углю, т.к. в настоящее время добыча сланцевых углеводородов в РФ экономически нецелесообразна.

На настоящем этапе развития нашей цивилизации экономика всего мира и общество в целом для своего устойчивого развития и жизнеобеспечения непрерывно потребляют всё возрастающие объёмы ископаемого угля в основном для обеспечения увеличивающейся потребности в энергоресурсах. Как первичный энергоноситель уголь востребован, а это стимулирует его

добычу и потребление. Разработка угольных пластов подземным способом за последние несколько десятилетий неуклонно снижается и одной из основных причин тому является ограничение производительности угледобычи в связи с газовым фактором безопасности горных работ. Газоносность угольных пластов Кузбасса при глубине порядка 200 м находится в пределах 5-10 м³/т, а с возрастанием глубины до 500-700 м доходит до 25-30 м³/т. В связи с тем, что с возрастанием глубины разработки газопроницаемость угольных пластов стремительно снижается, стоит отметить, что эффективность технологий заблаговременной дегазации также ожидаемо снизится [2].

Мировая практика подземной разработки угольных пластов стремительно и уверенно развивается в направлении роста нагрузок на очистные забои. Основным сдерживающим фактором роста нагрузок является метан, выделяющийся в горные выработки. Поэтому перспектива роста производительности добычи невозможна без существенного увеличения эффективности дегазационной подготовки выемочных участков и, как следствие, снижения газообильности горных выработок. Эффективность пластовой дегазации существенно снижается с увеличением глубины разработки пластов вследствие увеличения горного давления. А это, в свою очередь, негативно сказывается на газовой обстановке выемочного участка с точки зрения безопасности по газовому фактору.

В изучение физических процессов и проблем угольного метана при подземной разработке угольных пластов большой вклад внесли ведущие советские и российские учёные: академик Скочинский А.А. – основатель научной школы, Айруни А.Т., Алексеев А.Д., Бобин В.А., Бурчаков А.С., Васючков Ю.Ф., Забурдяев В.С., Иванов Б.М., Каледина Н.О., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Королёва В.Н., Лидин Г.Д., Малинникова О.Н., Ножкин Н.В., Петросян А.Э., Пучков Л.А., Рубан А.Д., Сластунов С.В., Устинов Н.И., Ушаков К.З., Фейт Г.Н., Ходот В.В., Христианович С.А., Чернов О.И., Эттингер И.Л., Ярунин С.А. и другие.

В связи с изложенным весьма важными являются исследования, направленные на совершенствование технологий дегазационной подготовки углей к выемке, интенсификацию дегазации угольных пластов, совершенствование методов прогноза газообильности очистного забоя и методик определения коллекторских свойств угольных пластов для уточнения предельно допустимых нагрузок на очистной забой по фактору метанобезопасности.

1.1 Мировые тенденции в области подземной разработки угольных месторождений

На момент начала 2017 г. в России функционировало 59 шахт и 119 разрезов, объём добычи угля составил около 386 млн т, из которых подземным способом было добыто около 105 млн т. При этом поставки угля за рубеж составили 165 млн тонн.

На конец 2016 г. Россия располагала доказанными запасами угля в 160,4 млрд т, что составляет 14,1% от общего количества угля в мире [3].

Международное Энергетическое Агентство (International Energy Agency) прогнозирует, что уголь на 95% сможет обеспечить дополнительные глобальные энергетические потребности до 2020г. Во всём мире потребление угля возрастает быстрее, по сравнению со всеми прочими первичными энергоносителями.

Например, в Китае, почти все вновь строящиеся электростанции технологически ориентированы на использование угля.

В США добыча угля в 2016 г. приблизилась к 0,73 млрд т. В Китае – самом крупном в мире производителе угля – добыча в 2016 г. превысила 3,3 млрд т. Добыча в Индии составила более 800 млн т угля за 2016 г. Долгосрочные прогнозы показывают, что Индия и Китай к 2030 г. обеспечат более 60% мировой потребности в угле [1].

Производительность современных очистных комбайнов, в том числе и отечественных, составляет более 30 т/мин. Обеспечить такую высокую

нагрузку на очистной забой без применения мероприятий по дегазации, которые позволят значительно снизить природную газоносность угольного пласта, не представляется возможным.

Некоторые шахты Кузбасса по уровню применяемого горно-шахтного оборудования соответствуют шахтам США или Австралии, но нагрузки на очистные забои на шахтах Кузбасса в разы ниже, чем на австралийских и американских шахтах. На примере таких высокоиндустриальных угледобывающих стран, как США, Австралия, Германия и Китай стоит отметить, что в качестве нижнего порога рентабельной добычи принято значение минимум в 1 млн т угля в год из очистного забоя при разработке технологическими системами длинных лав. При этом, учитывая новое строительство и модернизацию шахт, технологическая норма производительности длиннолавных систем составляет порядка 3-5 млн т в год из очистного забоя. На одной из шахт Китая в 2011 г. был установлен мировой рекорд по годовой добыче угля из одной лавы - более 14 млн т.

В настоящее время на некоторых шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (пример – ш. Котинская) планируемые нагрузки составляют 20-25 тыс. т/сут и более, а прогнозируемая газообильность из разрабатываемого пласта может достичь 4-5 м³/т. Обеспечить такую нагрузку без существенного снижения газообильности выработок и разрабатываемого пласта не представляется возможным.

В период реструктуризации технологии добычи угля на российских шахтах совершенствовались за счет применения высокопроизводительного оборудования в подготовительных и очистных забоях. В результате были разработаны более совершенные технологические схемы разработки [4], включающие схемы подготовки и разработки месторождений угля с применением отечественного и зарубежного оборудования.

Предположительно, угольная отрасль в ближайшей перспективе будет развиваться по следующим основным направлениям:

1) количество высокопроизводительного современного оборудования для производства горных работ будет увеличиваться;

2) будут внедряться системы мониторинга вероятности гео- и газодинамических явлений, а также системы автоматизации управления технологическими процессами на базе современных компьютерных технологий.

Примером второго направления является не имеющая аналогов в России система сейсмического мониторинга, разработанная в 2016 г. учеными из Уральского государственного горного университета и Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова, способная прогнозировать опасные геодинамические явления в шахтах с точностью прогноза более 70% [5]. Первичные преобразователи системы устанавливаются непосредственно в зоне ведения добычных или проходческих работ в шахте и фиксируют возникающие в массиве сейсмические сигналы, компьютерная обработка которых обеспечивает выявление очагов аномальных напряжений, которые могут вызвать ЧП.

Первое направление потребует больших капитальных затрат, которые компенсируются увеличенными нагрузками на очистные забои. Производители зарубежной техники гарантируют соответствие заявленных технологических показателей реальным возможностям. Например, очистной комбайн «Cat EL3000» компании «Caterpillar» способен стабильно отрабатывать угольный пласт мощностью до 5,5 м с очень высокой производительностью – более 5000 т/час. Очевидно, что при такой производительности работ будет обеспечена высокая рентабельность угледобычи. При этом в таких условиях весомым сдерживающим фактором будет являться опасность очистных работ по факторам горно-геологического характера и важной задачей будет обеспечение метанобезопасности при разработке газоносных угольных пластов [6].

При втором направлении требуется постоянный контроль за состоянием углепородного массива, учитывая различные горно-геологические условия на

каждом добычном участке [7]. На базе научных исследований специалистам и учёным предстоит разработать и утвердить современные нормативные документы, на которых должна основываться автоматизация технологических процессов.

По ходу совершенствования технологий угледобычи численность сотрудников угольных предприятий должна плавно уменьшиться в минимум на порядок и приблизиться к показателям зарубежных аналогичных шахт США и Австралии. При этом следует ожидать, что уменьшение количества шахтеров позволит снизить показатели травматизма.

Тем не менее, проблема опасности, связанная с повышением нагрузок на очистной забой при разработке газоносных угольных пластов, остается самой серьезной [8, 9]. Во многих горно-геологических и горнотехнических условиях обязательной к применению является пластовая дегазация (заблаговременная, предварительная или текущая), однако она не всегда применяется в достаточно полных необходимых объёмах по причине высоких материальных затрат на её осуществление.

Современный опыт работ очистных забоев в России и за рубежом показывает, что в забоях с нагрузками более 2000 т/сут в основном работают современные механизированные очистные комплексы. Среди них отечественные: КМ–138, КМ–142, КМ–144, КМ–700, КМТ и зарубежного производства, например, немецкие – DBT, польские - Fazos, Pioma, Glinik, JOY – производства США; ZMJ – производства Китая.

Применяя высокопроизводительную технику, следует с особым вниманием отнестись к соблюдению и поддержанию газового режима в очистных забоях в пределах нормы. Поэтому разработка более надёжных способов прогноза газообильности позволит интенсивно и безопасно отработать угольный массив. Для этих целей следует производить как можно более точные расчёты газообильности очистного забоя, поскольку возможности высокопроизводительной техники мирового уровня ограничиваются только требованиями безопасности по газовому фактору.

1.2 Современное состояние теоретических подходов к описанию процессов массопереноса метана в угольном пласте и отбитом угле

Для решения задач, связанных с проблемами газовыделения в угольных шахтах, дегазацией и добычей метана из газоносных пластов и пород в зонах влияния очистных выработок, необходимо знать характер движения метана в соответствующих областях.

На сегодняшний день известно, что угольный пласт содержит газообразный метан, который находится в свободном состоянии под давлением в трещинах и порах, адсорбированный метан и твердый, связанный с углеродом метан в виде твёрдого углегазового раствора. Закон Дарси описывает фильтрацию газа в трещиновато-пористой среде и устанавливает пропорциональную зависимость удельного массопереноса газа от градиента давления. Газ принято считать идеальным при давлениях меньше 10 МПа. В рассматриваемом процессе массопереноса это условие выполняется, поэтому в модели использовано уравнение состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона. При фильтрации газа существенного изменения температуры не происходит. В реальности тепловой эффект проявляется на этапе десорбции метана из угля (температура снижается) и при вязком трении в режиме фильтрации (температура повышается). При этом вариация температуры не превышает 2-3 К и тепловые потоки в структуре угля перераспределяются равномерно. Такая вариация температуры лишь незначительно изменяет вязкость газа и не оказывает существенного влияния на кинетику фильтрации, поэтому в модели температура принята за константу (изотермический процесс). Уравнение Ленгмюра описывает процессы сорбции метана с учётом его перехода из молекулярно-связанного состояния в свободный газ по всему объёму в каналах проницаемости. Константы сорбции Ленгмюра для углей определяют в лабораторных условиях путём испытаний кернов.

Указанные выше законы входят в единое дифференциальное уравнение фильтрации газа в угольном пласте, которое учитывает закон сохранения массы, закон Дарси, уравнение Ленгмюра и в общем случае имеет вид [10-16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\Pi \rho + (1 - \Pi) \frac{abP}{1+bP} \right] - \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} P \right) = 0 \quad (1.1)$$

где t – время, с;

Π – эффективная пористость;

ρ – плотность метана, кг/м³;

a, b – параметры сорбции Ленгмюра;

P – давление метана в пласте, Па;

k – газопроницаемость угля, м²;

μ – динамическая вязкость газа, Па·с.

В настоящий момент уравнение (1.1) является основополагающим при решении задач массопереноса в неоднородном и слоистом углепородном массиве.

В угле имеется система пор (трещин, каналов), сообщающихся с внешней поверхностью образца (куска, гранулы). Вся эта система называется фильтрационным объемом, и в этой системе метан находится в газообразном состоянии. Метан попадает в уголь в результате природных геологических процессов образования угля. Фрагменты (блоки) угольного вещества как бы омываются фильтрационным объемом [17].

Согласно [18, 19] процесс метанопереноса осуществляется различными механизмами ввиду наличия различных классификаций видов газопереноса. При различных размерах пор – от микропор размером менее $3 \cdot 10^{-7}$ см и до видимых пор (более $2 \cdot 10^{-2}$ см) классифицируют соответственно: абсорбцию, адсорбцию, кнудсеновскую диффузию, капиллярную конденсацию, газовую диффузию, медленную и интенсивную фильтрацию [19, 20]. Кинетика выхода метана через поверхности обнажения зависит от глубины и изменяется в пределах $2 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$ см/с [18, 19]. Источники [20, 21] отмечают, что при перепадах давления газа до 1,0 МПа справедливо использовать закон Дарси, а основным механизмом метанопереноса в призабойной зоне пласта является фильтрация. Аналитический обзор исторического развития исследований процессов массопереноса метана и его выделения из пластов отражён в [19],

согласно которому выделение газа из обнаженной поверхности угольного пласта первым рассчитал [22] и экспериментально нашёл Г.Д. Лидин в виде [23]:

$$q = \frac{q_0}{\sqrt{t}}, \quad (1.2)$$

где q , q_0 – текущее и начальное газовыделение, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; t – безразмерное время, прошедшее с момента обнажения поверхности.

Основные уравнения движения газов в пористых средах получил Л.С. Лейбензон, согласно которому, для неизменной пористой среды в отсутствии массовых сил, уравнение фильтрации газа запишется как [24]:

$$m \left(\frac{d\rho}{dp} \right) \frac{dp}{dt} = \text{div} \left(\frac{K\rho}{\mu} \nabla p \right), \quad (1.3)$$

где p – давление газа; ρ , μ – его плотность и вязкость; m , K – пористость и проницаемость среды.

Согласно [19, 25] разновидности режимов современной теории фильтрации трактуются не в терминах «ламинарный» и «турбулентный», а различаются по соблюдению закона Дарси или другого вида соотношений, называемых «обобщенный закон Дарси». Согласно [19] уравнение движения метана в угольных пластах впервые получил Р.М. Кричевский [22, 26]. Им же было получено уравнение движения метана в угольном пласте с учетом процессов сорбции (десорбции) в виде [101]:

$$\frac{dp}{dt} = N \frac{d^2 p}{dx^2}, \quad N = N(p) = \frac{\lambda}{\delta} \left[M + \frac{ab}{(1+bp)^2} \right]^{-1} \quad (1.4)$$

где λ – коэффициент газопроницаемости угля; δ – удельный вес метана; M – пористость угля; a , b – константы сорбции Ленгмюра. Для расчёта дебита метана из свежеебнаженного угольного пласта в горную выработку из приближенного решения (1.4) получена формула (1.2). В [26] уравнение (1.4) было изменено для изотермически сжимаемого газа применительно к процессу внезапного выброса угля и газа. Отмечалась неоднородная,

зональная структура угольного пласта (наличие областей с различной газопроницаемостью).

Работы Р.М. Кричевского в дальнейшем развивали в своих трудах С.А. Христианович и П.Я. Полубаринова-Кочина [27], Ю.А. Линьков и А.Т. Айруни [21], С.В. Кузнецов и Р.Н. Кригман [28] и другие.

В [19, 29] указано, что известны математические модели, в которых вместо уравнения Р.М. Кричевского используется уравнение «эффективной» диффузии метана в пласте с учетом изотермы сорбции по Генри. Для пластов, залегающих на сравнительно небольших глубинах (пластовое давление метана не превышает 1 МПа), либо для частично дегазированных пластов, метаноперенос описывается уравнением диффузии:

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = D_e \nabla^2 a, \quad (1.5)$$

где a – газонасыщенность угля; D_e – эффективный коэффициент диффузии метана в нём (описывающий суммарно различные конкретные механизмы его переноса).

Вековую миграцию метана изучали: А.А. Скочинский, В.В. Ходот, Л.Н. Быков, А.Э. Петросян, И.М. Печук, Г.Д. Лидин, А.Т. Айруни и другие [19].

Источник [19] отмечает, что газодинамические явления на всех этапах их протекания сопровождаются процессами метанопереноса в примыкающих к поверхности обнажения угольного пласта зонах. В [30] приводилась модель диффузии метана, предложенная на основе анализа газодинамической стадии внезапного выброса. Для предварительного расчета давления газа и газоемкости выбросоопасного угольного пласта в окрестности горной выработки И.А. Рыженко предложена математическая модель метанопереноса в трещиновато-пористой среде [31]. Он представлял пласт как совокупность сорбционных частиц – блоков, разделенных трещинами. Метаноперенос в блоках описывается уравнением диффузии:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \text{div}(D \nabla a), \quad (1.6)$$

где a – сорбционная метаноемкость угля; D – коэффициент кнудсеновской диффузии. Фильтрация метана в трещинах:

$$\frac{273}{T} \left(\frac{m}{z} P_1 \right) = \operatorname{div} \left[\left(\frac{273 K P_1}{T \mu z} + D_\Gamma \right) \overline{\nabla P_1} \right] - \frac{\partial \bar{a}}{\partial t}, \quad (1.7)$$

где P_1 – давление метана в фильтрационном (трещинном) объеме; m – трещинная пористость; z – коэффициент сжимаемости метана; K – трещинная проницаемость; μ – вязкость метана; D_Γ – коэффициент диффузии метана в газовой фазе; $\bar{a}$ – усредненная по сорбционному блоку метаноемкость угля. В связи с анализом устойчивости краевой части газонасыщенного пласта (предельно-напряженная область), модель неустановившейся фильтрации метана в трещиновато-пористой среде предложена в [32].

Согласно [10, 33] неоднородная трещиновато-пористая слоистая анизотропная среда, фильтрационные и коллекторные свойства которой характеризуются пористостью и проницаемостью является наиболее общей моделью среды, отвечающей шахтным условиям. Течение метана относительно подвижной системы координат, связанной с очистным забоем, можно считать установившимся и плоским при длительном движении этого забоя с некоторой постоянной скоростью. При этом, дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее фильтрацию метана, имеет вид:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + q = 0 \quad (1.8)$$

где $p(x,y)$ – давление метана, k_x, k_y – коэффициенты проницаемости горного массива, q – источники газа.

Согласно [11, 33] десорбцию метана из угольных пластов и газоносных песчаников можно представить как действие равномерно распределенных источников метана. Причем мощность этих источников $q = q(p,t)$ на единицу объема угля или песчаника можно определить как [10, 33]:

$$q = \frac{\partial}{\partial t} (q_{\text{своб}} + q_{\text{сорб}}), \quad (1.9)$$

где $q_{своб}(t, p, x, y)$ – количество свободного газа в единице объема углепородного массива, $q_{сорб}(t, p, x, y)$ – количество сорбированного газа в этом же объеме. С учетом выражения (1.9) уравнение (1.8) переписывается в следующем виде:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = - \frac{\partial}{\partial t} (q_{своб} + q_{сорб}). \quad (1.10)$$

Источник [33] отмечает, что подобную задачу с соответствующими краевыми условиями решали многие авторы. Одномерную нестационарную задачу фильтрации в угольном пласте решили Кузнецов С.В. и Трофимов В.А. [34]; Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. и Карев В.П. [11, 35]; Садохин В.П., Жирнова Т.С., Кудряшова В.Д. [36] и другие. Плоскую задачу нестационарного движения метановоздушной смеси в зоне выработанного пространства решили Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. [37] методом крупных частиц; плоскую задачу неустановившейся фильтрации метана в слоистом массиве – Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. [38] при помощи метода конечных разностей.

Согласно [39] по системе открытых каналов массоперенос метана реализуется путем фильтрации, а по системе блоков – путём диффузии. При этом градиент давления газа – движущая сила процесса. Так как процесс фильтрации считается безынерционным, то для его описания используется известное уравнение Дарси, которое для одномерного случая записывается в виде:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k}{\mu} \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right], \quad (1.11)$$

где Q — количество молекул метана, содержащееся в единице объема пласта, k — коэффициент проницаемости, μ — динамическая вязкость метана.

В случае нарушения равновесия пласта (например, в результате отбойки угля или бурения скважины), начинается процесс массопереноса метана, его десорбция и истечение в область пониженных давлений, т.е. в сторону горной выработки. Особенностью явления истечения метана из угольного пласта

является наложение двух процессов массопереноса [32, 39, 40]: 1) фильтрация газа через систему открытых трещин, каналов и пор; 2) диффузия метана из твёрдого раствора (блоков) в фильтрационный объём.

Фильтрация является ведущим процессом. По мере фильтрации давление газа в фильтрационном объёме снижается, что создаёт предпосылку возникновения термодинамической силы для десорбции метана из блоков в фильтрационный объём посредством диффузии [39].

1.3 Методы прогноза газообильности угольного пласта

Современная подземная разработка газоносных угольных пластов является высокопроизводительной и требует строгого соблюдения правил безопасности по газовому фактору.

Для того, чтобы обеспечить достоверный прогноз газообильности горных выработок при высокоинтенсивной отработке угольных пластов, необходимо иметь данные о коллекторских свойствах угольного пласта, включая газоносность, пластовое давление метана, параметры сорбции Ленгмюра и газопроницаемость. Газоносность угольного пласта является базовой характеристикой, используемой для прогноза газообильности при производстве очистных работ. Широко используемый метод определения газоносности основан на измерении количества газа, содержащегося в отобранной в пласте пробе угля [41].

Пластовое давление метана, газопроницаемость пласта и константы сорбции Ленгмюра также являются параметрами, влияющими на притоки метана в горные выработки и очистной забой.

Для угольной отрасли России при постоянном углублении подземных горных работ проблема угольного метана является особо важной и в первую очередь необходимо обеспечить безопасность горных работ и повышать экономическую эффективность функционирования угольных шахт [42]. Нагрузки на некоторых шахтах Кузбасса (пример – ш. Котинская) уже в настоящее время возросли до 20 - 30 тыс. т/сут, при этом производительность

добычи на выемочных участках ряда шахт ограничена по газовому фактору [43].

Существующее в настоящее время нормативное руководство по проектированию вентиляции угольных шахт, а также действующая методика прогноза газообильности [44, 45] опираются на подходы к проектированию вентиляции угольных шахт, а также основываются на ряде эмпирических зависимостей, которые справедливы лишь для узкого диапазона нагрузок на очистные забои (до 4 тыс. т/сут) и основываются на промышленном опыте подземной разработки угольных пластов различных угольных бассейнов (в основном в Донецкого), полученного в 70-80-х годах предыдущего столетия, сопоставляя проектное решение с лавой-аналогом. Угольная промышленность России на её современном уровне развития характеризуется повышением производительности труда за счет использования в очистных забоях высокопроизводительных комбайнов, стабильно обеспечивающих высокие нагрузки на очистной забой – 10000 т/сут (пример шахта им. С.М. Кирова, АО СУЭК-Кузбасс) и достигающие 30000 т/сут и более. В таких условиях упомянутые нормативные инструкции не соответствуют современному этапу развития угольной промышленности. Метаноприток в очистной забой зависит от глубины разработки, физико-механических свойств углепородного массива, его пористости и газопроницаемости, а также от распределения пластового давления метана, горного давления, сорбционных параметров разрабатываемого угольного пласта и др. В связи с этим действующие нормативные документы по расчету газообильности очистного забоя отражают реальные условия с существенной ошибкой, а практика использования рекомендаций в проектных решениях на основе инструкций со старыми эмпирическими коэффициентами без их надежного научного обоснования может привести к непредсказуемым негативным последствиям. Учитывая необходимость обеспечения безопасности по газовому фактору при высоких нагрузках на очистной забой, задача повышения достоверности прогноза газообильности очистных забоев является весьма значимой.

Оперативный прогноз газообильности необходим для оптимального планирования текущих добычных работ в пределах выемочного столба. В России пока не удастся реализовать массовый оперативный прогноз метаноотдачи угля в очистном забое шахт для того, чтобы повысить безопасность горных работ, поэтому значительно важная задача - научно обосновать и разработать новые технические решения, способы и устройства для оперативной и надёжной оценки сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угля очистных забоев угольных шахт с дальнейшим использованием полученных значений в расчётах газообильности.

Также важной задачей является предварительный прогноз газообильности, требуемый при проектировании отработки очередного выемочного столба или нового шахтного поля. При этом информация о газообильности очистного забоя в процессе работы очистного комбайна является ключевой для принятия решения об оптимальной интенсивности добычных работ.

Уровень развития теории массопереноса метана в угольных пластах и породных массивах совместно с достижениями компьютерных технологий расчетов позволяет решить поставленную практическую задачу и предложить производству более точную методику прогноза газообильности очистного забоя при условиях безопасной и интенсивной отработки угольного пласта.

При современных глубинах разработки показатель газоносности угольных пластов может достигать $40 \text{ м}^3/\text{т}$ [46], при этом известно немало случаев, когда весомый вклад в газовый баланс вносят вмещающие породы с газоносностью, достигающей $4\text{-}6 \text{ м}^3/\text{т}$. Современная высокопроизводительная горная техника, используемая в очистных забоях, позволяет обеспечить нагрузки более 10 тыс. т/сут. В таких условиях газообильность добычного участка может достигать $100 \text{ м}^3/\text{мин}$ и даже более [47]. Эффективное управление газовыделением – одна из основных проблем добычи угля.

Около 25-30% от общего объема газовыделения выемочного участка устраняется средствами вентиляции, остальной объем - средствами дегазации

[48]. Стоит отметить, что подход к контролю и управлению системами вентиляции и дегазации до сих пор существенно различаются. Если состояние вентиляционной системы контролируется постоянно, то система дегазации, при помощи которой удаляется до 75% всего газа из шахтных выработок, контролируется время от времени. Магистраль газопроводов проверяется эпизодически, дебит и концентрация метана в газопроводах замеряются в основном в узловых местах с помощью ручных измерительных приборов. Практически не осуществляется контроль над утечками газа в газопроводах, практически не контролируются скважины с низкой концентрацией метана и его дебитом и не производится их своевременное отключение. В силу того, что отсутствует автоматизированный контроль системы дегазации, невозможно дать адекватную оценку газовой обстановке и своевременно реагировать на её изменения, а это, в свою очередь, оказывает негативное влияние на общий уровень метанобезопасности. Методика расчета систем дегазации несовершенна, аналогичное можно сказать и о способах определения газообильности горных выработок [48].

Необходимо совершенствовать всю систему прогнозирования и контроля газообильности горных выработок. Для того, чтобы информационно обеспечить выполнение задач по прогнозу газообильности забоя и определять максимально допустимую нагрузку на очистной забой по газовому фактору, необходимо знать значительное количество параметров, характеризующих состояние массива угля и вмещающих пород, а также их коллекторские свойства. Чтобы получить такую информацию, как правило, требуются специальные исследования, однако многие из этих параметров можно определить методом решения обратной задачи. Очень важно в таком случае обеспечить стабильный и равномерный темп ведения горных работ. В первую очередь это касается подготовительных работ, т.к. в этом случае анализ выделения газа из подготовительных выработок позволяет установить четкое распределение газоносности угольного пласта в пределах подготавливаемого к выемке участка.

Известен «Способ прогноза газообильности выемочных участков угольных шахт, включающий определение прогнозных значений их относительной газообильности по геологоразведочным данным о стратиграфии месторождения, газоносности угольных пластов и вмещающих пород и по результатам мониторинга рудничной атмосферы аналогичных выемочных участков или при отработке части действующего участка...» [49]. К недостаткам данного способа можно отнести низкую достоверность прогноза, т.к. при расчётах используются эмпирические коэффициенты, определённые по результатам отработки лавы-аналога.

Что касается упомянутого ранее способа определения метанообильности очистных забоев, регламентированного Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, то согласно этому способу метанообильность очистного забоя определяется метановыделением из:

- «- обнаженной поверхности разрабатываемого угольного пласта;
- отбитого угля, транспортируемого по очистному забою и по участковой конвейерной выработке или ее части, по которой проходит вентиляционная струя, поступающая в очистной забой;
- стенок горной выработки, по которой вентиляционная струя поступает в очистной забой» [45].

При этом «Абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта для проектируемых выемочных участков строящихся шахт и не отрабатываемых ранее угольных пластов реконструируемых шахт рассчитываются на основе данных природной газоносности разрабатываемого пласта, установленной в ходе проведения геологоразведочных работ (X , $\text{м}^3/\text{т}$). При проектировании дегазации разрабатываемого или сближенных пластов угля, природная газоносность данных пластов должна корректироваться с учетом принятого коэффициента дегазации. Для действующих шахт метанообильность очистного забоя рассчитывается на основе природной газоносности пластов, установленной по данным фактического абсолютного

метановыделения в очистные выработки (X_{ϕ} , м³/т) в зависимости от фактической добычи угля A_{ϕ} (т/сут)» [45]. Однако данный способ не подходит для регулярного и оперативного прогноза газообильности действующих выемочных участков с целью корректировки производительности добычи угля, т.к. данный способ основан на эмпирических зависимостях и предполагает сопоставление природной газоносности разрабатываемого угольного пласта действующей шахты по фактическим значениям метановыделения лав-аналогов, что оказывает негативное влияние на достоверность результатов прогноза.

1.4 Обзор и анализ существующих способов и средств определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта и отбитого угля

1.4.1 Анализ существующих способов определения проницаемости угольного пласта

Знание характеристик фильтрационных свойств угольных пластов и вмещающих пород позволяет решить многие важные задачи, например, спрогнозировать приток воды или газа в горные выработки.

Проницаемость является важным параметром, характеризующим проводимость коллектора. В природе не существует абсолютно непроницаемых тел [50].

Для оценки проницаемости горных пород обычно используется линейный закон фильтрации Дарси, согласно которому скорость фильтрации жидкости в пористой среде пропорциональна градиенту давления и обратно пропорциональна динамической вязкости [51, 52]:

$$v = \frac{Q}{F} = k \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{L}, \quad (1.13)$$

где v – скорость линейной фильтрации;

Q – объёмный расход жидкости в единицу времени;

μ – динамическая вязкость жидкости;

F – площадь фильтрации;

Δp – перепад давления;

L – длина пути фильтрации;

k – проницаемость, м².

В этом уравнении способность породы пропускать газы и жидкости характеризуется коэффициентом пропорциональности k , который называют проницаемостью [51, 52]:

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta p F}, \quad (1.14)$$

При определении проницаемости пород по газу в формулу (1.13) следует подставлять расход газа в условиях образца:

$$k = \frac{\bar{Q}_r \mu_r L}{\Delta p F}, \quad (1.15)$$

где $\bar{Q}_r$ – объёмный расход газа, приведённый к среднему давлению $\bar{p}$ в образце. Необходимость использования среднего расхода газа в этом случае объясняется непостоянством его объёмного расхода при уменьшении давления по длине образца [51, 52].

Значения проницаемости угольных пластов и вмещающих пород изменяются в очень широких пределах. Проницаемость углей, измеренная специалистами Австралии, например, изменяется на шесть порядков и составляет от нескольких микродарси до нескольких Дарси. Этот диапазон существенным образом связан с частотой, взаимосвязанностью и открытостью сети кливажей. Отмечается, что проницаемость меняется пространственно и вместе с действующими напряжениями [53]. В случае снижения проницаемости, условия фильтрации флюидов из угольного пласта ухудшаются [54, 55].

Исследования содержания метана в угле и процессов его массопереноса дают физическую основу для того, чтобы обосновать допустимую нагрузку на очистные забои по фактору газа и усовершенствовать методы воздействия на угольный массив с целью повышения эффективности дегазации [8].

Известны методы определения проницаемости:

1) по результатам исследования кернов в лабораториях (в т.ч. профильный метод с использованием полноразмерного керна при условиях максимально приближенным к пластовым) [56-58];

2) гидродинамические методы (по результатам исследований скважин на притоки жидкости) [59, 60];

3) геофизические методы (например, гидродинамический каротаж – по анализу динамики притоков жидкости) [61, 62];

4) с помощью аналогии (на основании использования данных о схожих пластах).

Наиболее полная и достоверная информация получается при проведении полевых методов исследования, которые включают в себя геофизические, гидродинамические, отбор керна и другие методы исследования скважин.

Абсолютная проницаемость пород, как правило, определяется при пропускании через него воздуха или газа, т.к. в процессе перемещения жидкостей по породе, проницаемость будет зависеть от физико-химических свойств жидкостей.

Определение газопроницаемости углей осложнено процессами сорбции-десорбции при протекании газа через угольное вещество, т.к. уголь, в отличие от других пористых коллекторов природного газа, обладает свойствами сорбционного взаимодействия с газами. Газопроницаемость угля определяется в основном проницаемостью экзогенных и эндогенных трещин, микро- и макропор, имеет обратную зависимость от величины внешней нагрузки и степени метаморфизма угля. Также газопроницаемость угля в природных условиях залегания зависит от газоносности угля и его влажности, от макроструктуры угля и горного давления. Величина проницаемости неразгруженного от горного давления угольного пласта не является постоянной, а изменяется по мере газоистощения массива, т.к. в процессе усадки по мере десорбции газа изменяется напряженно-деформированное состояние угля [63]. При увеличении продолжительности дегазации неразгруженного угольного массива его газопроницаемость увеличивается, а

зона повышенной проницаемости растёт вместе с зоной газоистощения. Причем, чем выше природная газоносность пласта и чем больше этот пласт отдал газа, тем больше повысится его газопроницаемость при прочих равных условиях [64].

С увеличением равномерного всестороннего горного давления происходит схлопывание внутренних трещин в угле, что вызывает уменьшение проницаемости [65].

Объективно оценить проницаемость угля в лабораторных условиях невозможно в силу большого разброса значений этого параметра (до трех порядков), а также из-за существенного изменения свойств керна при его извлечении [66]. Определению природной газопроницаемости угольного пласта посвящена монография [67].

В натурных условиях достоверно оценить проницаемость угольных пластов возможно при помощи активного воздействия на последние [68]. Ещё одним способом определить фильтрационные свойства угольного пласта в полевых условиях является слаг-тест, суть которого состоит в том, чтобы заполнить скважину водой, при гидростатическом уровне не выше устья скважины, и регистрировать динамику восстановления этого уровня при фильтрации воды через систему естественных трещин и пор в массиве [69].

Существует метод определения газопроницаемости угольных пластов, разработанный в ИПКОН РАН, основанный на определении динамики давления газа в угольном пласте при одномерном плоско-параллельном или осесимметричном его движении [20, 70, 71].

Также известен способ определения газопроницаемости угля, описанный в [72]. При этом способе выбуривают образцы горной породы с одинаковыми формой и размерами, помещают их в кернадержатель, через который прокачивают исследуемый раствор ПАВ под высоким давлением. По измеренным объемам профильтрованной жидкости и времени фильтрации определяют коэффициент проницаемости.

Способы лабораторного определения абсолютной проницаемости пород-коллекторов с применяемым оборудованием достаточно полно описаны в [50]. Для этого используются различные приборы, однако принципиальные схемы их устройства по большей части одинаковы. Упрощенное устройство для измерения проницаемости при этом обычно состоит из кернодержателя, позволяющего фильтровать жидкость или газ через пористую среду, устройства для измерения давления у входа и выхода из керна, расходомеров и приспособлений, которые создают и поддерживают постоянный расход газа или жидкости через образец породы. Различие приборов состоит в том, что одни предназначены для того, чтобы измерять проницаемость при большом давлении, другие – при малом, третьи – в вакууме.

При определении значений проницаемости по результатам гидродинамических исследований опираются на законы фильтрации. Результаты решений обратных гидродинамических задач позволяют разрабатывать технологию исследования скважин при установившихся и неуставившихся фильтрационных режимах [69, 73].

1.4.2 Анализ существующих способов определения параметров сорбции Ленгмюра для отбитого угля

Параметры сорбции угольного пласта входят в изотерму сорбции Ленгмюра, которая описывается уравнением:

$$Q = \frac{abP}{1+bP}, \quad (1.16)$$

где Q – массовое содержание метана в единице объёма угля, кг/м³;

a – предельная сорбционная метаноёмкость угля (объём Ленгмюра), кг/м³;

b – коэффициент сорбции, 1/Па;

P – пластовое давление метана, Па.

Основными экспериментальными методами измерения величины сорбции газов углём являются объёмный метод и весовой [74, 75]. Также

существуют расчётные и полурасчётные методы определения сорбционной метаноёмкости угля в лабораторных условиях и построения изотермы Ленгмюра [74, 76].

При объёмном методе определения сорбционной газоёмкости измеренный объём газа выпускается в сорбционный сосуд, где находится уголь при заданной температуре. Равновесное состояние в системе газ-уголь фиксируется по достижению постоянства давления при постоянном объёме газа или объёма газа при постоянном давлении. После достижения равновесия вычисляется количество газа, оставшегося в свободном пространстве прибора при давлении и температуре, соответствующих равновесному состоянию системы.

В весовом методе определения сорбционной газоёмкости применяют пружинные весы Мак-Бэна и Бакра [74], которые имеют спиральную пружину из тонкого кварца с подвешенной к ней легкой чашечкой с углём. Сорбированное количество газа определяют по увеличению длины пружины, предварительно откалиброванной по известным нагрузкам.

Для изучения сорбционной газоёмкости углей зарубежные исследователи второй половины XX в. применяли приборы, принцип действия которых схож с принципом прибора А. Титова [74]. В этом приборе есть все основные элементы, применённые в различных вариациях и с различными добавлениями зарубежными исследователями. Повторяющимися элементами приборов являются: газовая бюретка с уравнительной склянкой, генератор или резервуар с газом, манометр для фиксации постоянства давления в системе, вакууметр для измерения вакуума при дегазации угля, система для очистки и осушки газов и сорбционная ампула с исследуемым углём.

В современных условиях наиболее достоверно параметры Ленгмюра определяются в лабораторных условиях по методике насыщения измельченного угля метаном. На примере лабораторной установки ЗАО «Метан Кузбасса» (г. Ленинск-Кузнецкий) проводится изотермическое определение сорбционных свойств углей - максимальной метаноёмкости

углей и параметра давления (объём и давление Ленгмюра) при термобарических условиях, свойственных глубинам залегания угольных пластов [77]. На основании полученных измерений строятся изотермы Ленгмюра. Искомые параметры используются для оценки ресурсов и подсчёта запасов метана в угольных пластах, моделирования объёмов извлечения метана при заблаговременной дегазации шахт, промысловой добычи метана из угольных пластов и др. Объём и давление Ленгмюра являются важными параметрами для экономической оценки месторождений метана угольных пластов.

Данный способ хорошо подходит для оценки параметров сорбции отбитого угля в качестве фундаментальных исследований, но не подходит для оперативного и регулярного получения информации работникам угольных шахт для оперативного контроля ситуаций на производстве.

Также представляет интерес для сравнения установка по определению максимальной метаноёмкости угля, разработанная совместно Институтом катализа им. Г.К. Бореского СО РАН (г. Новосибирск) и ОАО «ЗСИЦентр» (г. Новокузнецк) [78]. Данная установка позволяет проводить исследования максимальной газоемкости углей при пластовой температуре и давлении до 80 бар. К недостаткам данной установки можно отнести малый объём угля, необходимый для проведения эксперимента, т.к. по мнению автора данной работы масса угля в 10 грамм является недостаточной для качественной оценки сорбционных свойств угля.

В лабораторных условиях не представляет сложности определение максимальной сорбционной ёмкости Ленгмюра (параметр a в формуле 1.16). С этой целью в герметичный сосуд закачивают метан под давлением, позволив метану полностью заполнить сорбционный объём проб угля. Другой параметр - константу давления Ленгмюра определяют путем измерения кинетики выделения метана из пробы угля с известным гранулометрическим составом. Для этого используют методику решения обратной задачи на основе фундаментального уравнения массопереноса метана.

Наиболее надежным путем определения констант Ленгмюра является использование методик, позволяющих получить полную экспериментальную зависимость типа газоносности от давления метана, на основе которой определяют неизвестные параметры, входящие в уравнение (1.16). Однако, к сожалению, константы Ленгмюра не входят в перечень обязательных для определения физических свойств угля, и поэтому шахтные лаборатории, как правило, не располагают необходимым оборудованием.

Анализируя существующие способы определения параметров сорбции Ленгмюра, используемые в лабораториях, можно утверждать, что в современных условиях определение этих параметров связано лишь с прикладными исследованиями, а лабораторное оборудование и методики исследований не отличаются своей простотой. Технические отделы шахт нуждаются в регулярном и оперативном получении значений параметров сорбции для оперативного прогноза газообильности перед очередной рабочей сменой и корректировок нагрузок на очистные забои шахт. Поэтому шахтные лаборатории нуждаются в более простом и сравнительно недорогом оборудовании, которое возможно изготовить силами предприятия и определять искомые параметры в местной шахтной лаборатории. Однако, лабораторные методы исследования свойств массива по образцам не обеспечивают необходимой достоверности определения этих свойств. Это связано с тем, что образцы не могут отражать свойства целого массива в естественных условиях его залегания, к тому же на достоверность результатов исследования оказывает влияние масштабный фактор.

По данным шахтной лаборатории шахты «Казахстанская» параметры сорбции Ленгмюра для угля следующие:

- предельная сорбционная метаноёмкость a - $24,84 \text{ м}^3/\text{т}$;
- константа давления b - $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$.

Для углей Кузбасса, в частности для шахты им. С.М. Кирова, параметры Ленгмюра таковы [79]:

$$a = 30,0 \text{ м}^3/\text{т}; b = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}.$$

По данным института угля Chongqing для угольной шахты Sihe в Китае, усредненные параметры Ленгмюра следующие [80]:

$$a=40 \text{ м}^3/\text{т}; b=1.6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}.$$

Для образца угля бассейна «Huntly» в Новой Зеландии параметры Ленгмюра определены как [81]:

$$a=31,86 \text{ м}^3/\text{т}; b=3.63 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}.$$

При этом источник [82] гласит, что максимальное газосодержание по изотерме Ленгмюра зависит от зольности, влажности и температуры угля, при том, что параметр давления Ленгмюра колеблется менее значительно. Пример – для австралийского антрацита при температуре образца угля в 26°C максимальная метаноёмкость составляет 30,14 (м³/т), константа давления Ленгмюра – $4,681 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$. При температуре угля в 44°C параметр давления почти не изменился и составил $4,682 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$, а сорбционная ёмкость составила 26,88 м³/т.

На основе анализа литературных источников, ожидаемый диапазон параметров Ленгмюра для разных угольных бассейнов мира следующий: $a = 12 \dots 98 \text{ м}^3/\text{т}; b = (0,15 \dots 3,6) \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$.

Влажный уголь имеет значительно меньшую максимальную сорбционную метаноёмкость, чем сухой уголь. Однако величина снижения метаноёмкости зависит от марки угля. При этом всем углям свойственна влажность, при которой дальнейшее увлажнение не меняет сорбционную метаноёмкость [83].

По данным общей газоёмкости угля (суммы свободного и сорбированного газа) и пластового давления газа определяют газоносность угольного пласта. Знание газоносности пласта позволяет спрогнозировать газообильность горных выработок.

1.4.3 Существующие способы определения пластового давления метана

Давление метана является наиболее важным параметром, определяющим кинетику притоков метана в горные выработки. Существует два пути определения давления метана в угольном пласте:

- расчётный путь, с использованием данных о фактической газоносности пласта и полученных в лабораторных условиях значений констант сорбции Ленгмюра;

- на основе результатов прямого шахтного измерения давления метана в закрытой пластовой скважине, или в скважине, пробуренной в угольный массив через породную пробку [84].

Наиболее точным является прямой метод определения давления газа в угольном пласте, заключающийся в непосредственном замере давления метана с помощью манометра в «газовой камере», которая представляет собой часть замерной скважины и располагается в пределах исследуемого пласта или породы.

Однако при прямом замере давления метана в низкопроницаемых пластах требуется достаточно длительный период времени для нарастания давления до природной величины [64, 20, 79]. Кроме того, некачественная герметизация пластовых скважин осложняет определение истинного пластового давления, поэтому существенную роль в точном измерении давления внутри скважин играет их качественная герметизация, позволяющая исключить утечки метана из полости скважины в горные выработки.

Замеры пластового давления метана в угольных пластах основных угольных бассейнов СНГ при различных глубинах замеров (H) и при различных глубинах зоны газового выветривания (H_0) показали, что гидростатическая зависимость роста пластового давления газа с глубиной или зависимость вида $P=0,01 (H-H_0)$ МПа может быть использована лишь для весьма ориентировочных расчётов, т.к. на величину газового давления P

влияет множество факторов, среди которых степень метаморфизма и микроструктура угля [64].

В связи с изложенным, для надёжного прогноза газообильности выработок в условиях конкретной шахты необходимо разработать точный и оперативный способ измерения пластового давления метана в угольных пластах.

Выводы по главе и постановка задач исследований

1) Существующие методы определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта и отбитого угля во многом не удовлетворяют требованиям практики. Основными методами исследования сорбционных свойств углей являются лабораторные, предполагающие извлечение образцов угля из массива, с вытекающими отсюда недостатками – нарушением образцов угля, влиянием масштабного фактора и др., а натурных способов определения искомых свойств практически не существует. Необходимо совершенствовать традиционные (лабораторные) способы определения сорбционных свойств углей, а также разрабатывать новые (натурные) способы определения этих свойств.

2) Необходимо совершенствование методов прогноза газообильности горных выработок. Скорости подвигания очистных забоев постоянно повышаются, что существенно снижает объективность использования средств оценки факторов метанообильности, основанных на опыте предыдущего ведения горных работ (методы аналогов). Необходим переход на качественно новый уровень прогнозирования газовой обстановки как на стадии проектирования, так и на стадии ведения горных работ. В то же время, даже самые достоверные знания геомеханики и кинетики газа угольных пластов должны быть адаптированы для конкретных горнотехнологических условий.

3) Необходимо разрабатывать более достоверные методы определения коллекторских свойств разрабатываемых угольных пластов для уточнения предельно допустимых нагрузок на забои шахт, для повышения точности

прогнозов газообильности в горные выработки и обоснования параметров систем дегазации.

Задачи исследований:

1. Усовершенствовать аппаратное обеспечение определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях.
2. Разработать способ определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угля в натурных условиях.
3. Провести апробацию способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в натурных условиях.
4. Разработать методику определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки.
5. Произвести расчёт газообильности очистного забоя и величины максимальной допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору, используя результаты определения сорбционно-кинетических свойств угля, полученных лабораторным способом и в натурных условиях.

2 Совершенствование аппаратного обеспечения для определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях

2.1 Описание экспериментальной установки

Многочисленные научные исследования свидетельствуют о том, что систематическое изучение и контроль свойств угля является необходимым условием обеспечения эффективности мероприятий по повышению безопасности труда в угольных шахтах.

Так, например, способность угля удерживать в себе газ определяет величину и интенсивность притока газа в горные выработки, способность угля с различной скоростью отдавать газ влияет на склонность пласта к внезапным выбросам угля и газа и т. д.

Если по мере продвижения горных работ осуществлять систематический отбор образцов угля и проводить специальные исследования этих образцов в лаборатории, то получаемые при этом характеристики угля в виде количественных показателей различных его свойств могут значительно помочь в выборе наилучших методов ведения горных работ с точки зрения их безопасности или в проведении мероприятий по предупреждению внезапных выбросов угля и газа и др.

Угольные шахты, как правило, не располагают собственными техническими средствами для оперативного определения физико-химических свойств угля и используют устаревшие данные при расчётах газообильности лавы. Если систематически подвергать образцы угля лабораторным исследованиям с целью определения их свойств, то можно повысить безопасность ведения горных работ путём уточнения расчёта газообильности очистного забоя при отработке газоносного угольного пласта на основании полученных данных.

В первой главе данной диссертационной работы приведён обзор существующих методов определения параметров сорбции Ленгмюра для угля. Однако каждый из них для своей реализации требует наличия сложных конструктивных элементов, которые невозможно изготовить самостоятельно средствами шахтного персонала и точных измерительных приборов, требующих регулярной поверки, для проведения исследований.

Поэтому, автором предложено иное оборудование для проведения эксперимента по определению сорбционных характеристик угля и построении изотермы Ленгмюра, позволяющее шахтной лаборатории оценивать константы Ленгмюра в первом приближении. Разработка предлагаемого лабораторного оборудования носит прикладной характер и служит в данной работе в качестве ориентира для дальнейшего сравнения результатов определения сорбционных свойств, полученных на основе шахтных испытаний.

Как известно, процесс сорбции метана при постоянной температуре описывается уравнением сорбции Ленгмюра (1.16), которое достаточно хорошо известно. Оно содержит две константы a , b . По своей химической сущности, уравнение Ленгмюра – это уравнение монослойной адсорбции на однородной поверхности в отсутствие сил притяжения между молекулами адсорбата [85].

Максимальная сорбционная ёмкость угля (параметр a в уравнении 1.16) оказывает значительное влияние на возможные метановыделения из угольного пласта в горные выработки [86].

Для определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях автором настоящей работы предложена конструкция установки, принцип работы которой описан ниже. Для проведения эксперимента применяется:

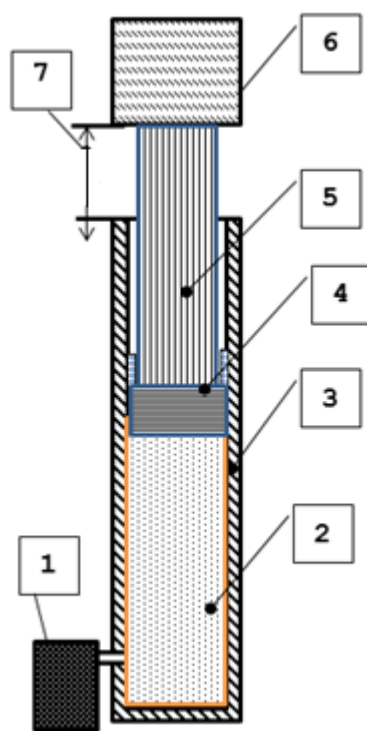
1. Герметичный цилиндр со штоком, для проектирования которого необходимо учитывать следующие параметры:

- длину хода штока, мм;
- диаметр гильзы (цилиндра), мм;

- рабочее давление, МПа.
- 2. Герметичный стакан.
- 3. Баллон с метаном.
- 4. Проба угля.
- 5. Вес (нагрузка).

Суть эксперимента состоит в том, чтобы насытить пробу угля метаном до определённой газоносности и построить кривую зависимости массы сорбированного метана от давления в цилиндре. На кинетику процесса сорбции метана влияют такие параметры как температура, размер угольной фракции, его влажность и др. [55, 87-92, 93].

Схема предлагаемого оборудования представлены на рисунке 2.1. Принцип действия оборудования следующий: проба угля помещается в герметичный стакан 1, пространство 2 цилиндра заполняется метаном, затем подсоединяется герметичный стакан с углём к пневмоцилиндру и сверху прикладывается нагрузка на шток 6. Находясь под нагрузкой, шток будет опускаться вниз, создавая давление на поршень 4, который, в свою очередь, будет сжимать газ в цилиндре и тем самым будет создавать необходимое для исследования давление газа. Ход штока 7 необходимо измерять на каждом этапе его опускания.



1 - герметичный стакан с измельчённым углём; 2 - метан; 3- стальная колба;
4 - поршень; 5 - шток передаточный; 6 - груз (нагрузка); 7 – величина хода штока.

Рисунок 2.1 – Схема оборудования для проведения эксперимента

Результаты, полученные во время проведения эксперимента, заносятся в таблицу в соответствии с Методикой, представленной в приложении А данной диссертационной работы.

На основании полученных данных строится изотерма сорбции Ленгмюра с искомыми параметрами сорбции.

Главными преимуществами предлагаемой автором установки для определения параметров сорбции угля перед современными аналогами являются простота и надежность технической реализации. При этом не потребуется применять дорогостоящее или уникальное специальное оборудования, точных измерительных приборов, требующих регулярной поверки, электроэнергии.

2.2 Обоснование параметров установки

Пусть установка на рис. 2.1 содержит пневмоцилиндр диаметром $d=30$ мм и высотой $h=2,0$ м, а также цилиндрический стакан с углём диаметром $d=40$ мм.

Уравнение состояния газа:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (2.1)$$

Объем цилиндра:

$$V_0 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi(0,03)^2}{4} \cdot 2,0 = 0,001414 \text{ м}^3 \approx 1,4 \text{ л}. \quad (2.2)$$

при высоте угольной массы в 30 мм уголь будет объемом:

$$V_{\text{уг}} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h_{\text{уг}} = \frac{\pi(0,03)^2}{4} \cdot 0,03 = 2,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \approx 0,02 \text{ л}. \quad (2.3)$$

Масса угля около 50 – 60г. Такая масса угля при газоносности 20 м³/т при высоком давлении может поглотить метана:

20 л/кг·0,06кг = 1,2 л CH₄ (т.е. 85% от всей массы метана в колбе).

Если сжать газ в этой колбе в 20 раз, то абсолютное давление метана составит $P_{\text{max}}=20\text{бар}$.

При этом вес груза, создавшего такое давление, должен быть равен

$$mg = P_{\text{max}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 20 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi(0,03)^2}{4} = 1,41 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,41 \text{ кН}. \quad (2.4)$$

Такую нагрузку можно создать статической массой в 141 кг.

Уравнение сорбции Ленгмюра:

$$V_m = \frac{ab(P-P_{\text{at}})}{1+a(P-P_{\text{at}})}, \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{т}. \quad (2.5)$$

Масса сорбированного метана из колбы:

$$\Delta m_{\text{CH}_4} = \rho_{\text{CH}_4} \cdot V_m \cdot m_c = \mu \frac{P}{RT} \cdot \frac{ab(P-P_{\text{at}})}{1+a(P-P_{\text{at}})} \cdot m_c, \text{ кг}. \quad (2.6)$$

Масса оставшегося в колбе метана

$$\Delta m = m_0 - \Delta m_{\text{CH}_4}, \text{ кг}. \quad (2.7)$$

m_0 - начальная масса метана в колбе объемом V_0

$$m_0 = \mu \frac{P_{\text{at}} V_0}{RT} \quad (2.8)$$

Давление, создаваемое этим метаном при уменьшении объема на величину ΔV :

$$P = \frac{\Delta m}{\mu(V_0 - \Delta V)} RT = \frac{\mu \frac{P_{at} V_0}{RT} - \mu \frac{P}{RT} \cdot \frac{ab(P - P_{at})}{1 + a(P - P_{at})} \cdot m_c}{\mu(V_0 - \Delta V)} RT \quad (2.9)$$

$$P = P_{at} \frac{V_0}{V_0 - \Delta V} - P \cdot \frac{a(P - P_{at})}{1 + a(P - P_{at})} \cdot \frac{b \cdot m_c}{V_0 - \Delta V} \quad (2.10)$$

Из решения этого уравнения относительно P находится давление метана в цилиндре с учетом сорбции.

$$P = \frac{1}{2} (-F + \sqrt{F^2 - 4D}) \quad (2.11)$$

где

$$F = \frac{1 - a \cdot A}{a \cdot (1 + B)} - P_{at}; \quad D = A \cdot \frac{a \cdot P_{at} - 1}{a \cdot (1 + B)}$$

$$A = P_{at} \frac{V_0}{V_0 - \Delta V}; \quad B = \frac{b \cdot m_c}{V_0 - \Delta V}$$

На основании расчётов при вариации геометрических параметров пневмоцилиндра было установлено, что оптимальная высота пневмоцилиндра для проведения эксперимента должны быть 2000 мм, а диаметр 30 мм. При большем значении диаметра цилиндра придётся прикладывать большую массу груза на шток для создания необходимого давления в цилиндре, что осложняет лабораторный эксперимент, а при меньшем диаметре цилиндра будет недостаточно внутреннего объёма метана для той массы угля, которая находится в герметичном стакане. Пример построения изотермы Ленгмюра и вычисления констант сорбции представлен в «Методике определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях» в приложении А данной работы.

2.3 Результаты определения сорбционных свойств отбитого угля в лабораторных условиях

Согласно схеме, представленной на рисунке 2.1 в 2017 г. была изготовлена лабораторная установка для определения параметров сорбции угля, фотография которого представлена на рисунке 2.2.



1 – груз; 2 – манометр; 3 – герметичный стакан; 4 – гибкий шланг высокого давления; 5 – пневмоцилиндр; 6 – каркас

Рисунок 2.2 – Лабораторная установка для определения параметров сорбции

Конструкция установки представляет собой герметичный пневмоцилиндр 5 высотой 2м и диаметром 30мм по внутренней стенке, который установлен в специальный удерживающий его стационарный каркас 6, выполненный из металла. На поддоне располагается стакан 3, соединяемый гибким шлангом 4 высокого давления с цилиндром. На крышке стакана

предусмотрен манометр 2. Стакан служит для размещения в нём пробы угля (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Измельчённая проба угля

Перед началом эксперимента пробу угля измельчили и выдержали в течении 10 часов при комнатной температуре. Затем навеску угля массой 50 г поместили в стакан, крышку которого герметично закрутили. Затем пневмоцилиндр наполнили чистым метаном. Для этого от стакана отсоединяется гибкий шланг, и через этот шланг метан поступает в цилиндр из ёмкости с метаном при постепенном вытягивании штока. После наполнения цилиндра метаном при достижении штоком максимально вытянутого положения шланг снова прикручивается к стакану. Шток под собственным весом опускается в цилиндр создавая в нем небольшое давление. Следующим шагом является прикладывание груза на площадку штока. После приложения нагрузки, углю требуется некоторое время, чтобы сорбировать метан при текущем давлении. На основе наблюдений за давлением метана в цилиндре согласно манометру, вычисляют массу сорбированного метана. Таким

образом, поэтапно увеличивая нагрузку на шток, строят кривую Ленгмюра, на основании которой вычисляют константы сорбции.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента для образца угля пласта «Болдыревский» шахты им. С.М. Кирова

Этап	Нагрузка на основание штока, кг	Ход поршня, мм	Дополн. ход поршня после выдержки, мм	Давление газа, бар	Масса сорбированного метана, г	Объем сорбированного метана в пересчете на тонну угля, м ³
1	20	1440,5	0	3 (2,5)	0,17	4,6
2	60	2000	0	9 (6,8)	0,37	10,8

Стоит отметить, что выдержка угля под давлением на первом этапе проводилась в течение 8 часов, на втором этапе нагружения уголь оставался под давлением в течение 14 часов.

Из результатов эксперимента имеем две точки:

1) $q_1=4,6 \text{ м}^3/\text{т}$; $P_1=3 \text{ бар}$.

2) $q_2=10,8 \text{ м}^3/\text{т}$; $P_2=9 \text{ бар}$.

Тогда из уравнения Ленгмюра (1.16) вычислим параметры a и b , соответствующие этому уравнению:

$$b = \frac{1 - \frac{P_2 \cdot q_1}{P_1 \cdot q_2}}{P_2 \cdot \left(\frac{q_1}{q_2} - 1\right)} = 5,376 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$$

$$a = q_1 \cdot \frac{1 + a \cdot P_1}{a \cdot P_1} = 33,12 \text{ м}^3/\text{т}$$

При этом изотерма Ленгмюра показана на рисунке 2.4.

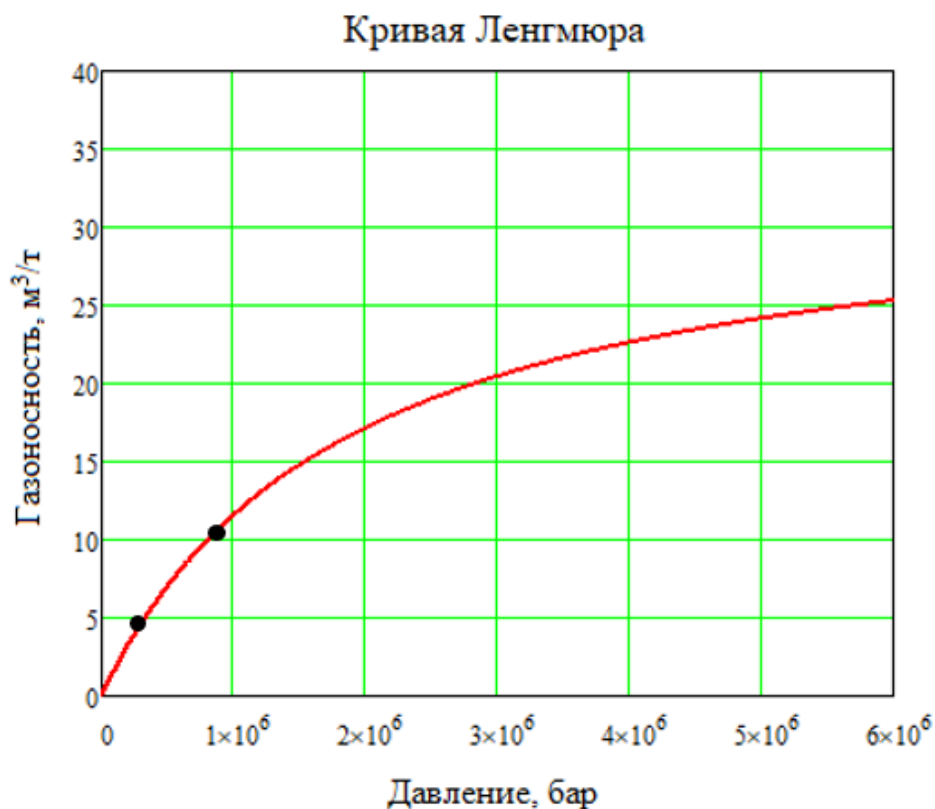


Рисунок 2.4 – Изотерма Ленгмюра, построенная по экспериментальным данным

Подводя итоги, можно утверждать, что разработанная установка для определения параметров сорбции в лабораторных условиях имеет весьма хорошие перспективы для её использования в регулярных испытаниях угольных образцов, т.к. данные могут быть получены оперативно и регулярно. В последующем, данные о параметрах сорбции могут быть использованы для расчётов при прогнозах газообильности очистного забоя, а также для оценки эффективности пластовой дегазации.

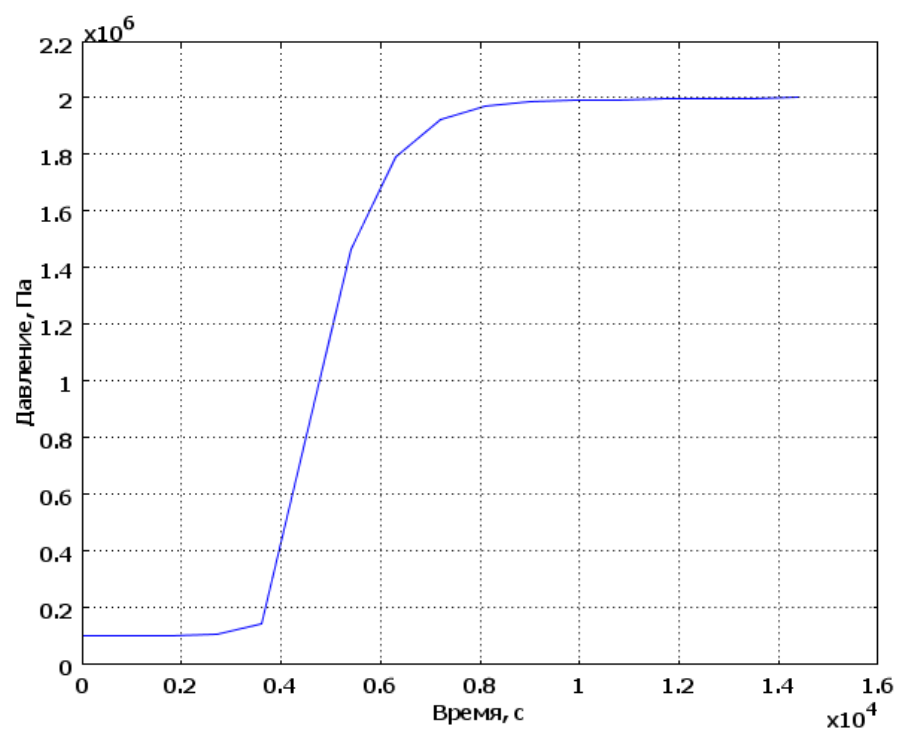
Разработанная лабораторная установка имеет перспективы по оценке газопроницаемости угля определённого гранулометрического состава. На основе анализа скорости опускания поршня в цилиндр и скорости сорбции метана угольными частицами появляется возможность установить зависимость проницаемости частиц угля равного размера от их условного радиуса.

Для определения газопроницаемости угля потребуется решить теоретическую задачу массопереноса на ЭВМ, используя программный комплекс Comsol Multiphysics.

В качестве примера, демонстрирующего возможности моделирования процессов массопереноса в программной среде Comsol Multiphysics при решении задачи необходимо создать модель сферической частицы угля условным диаметром D с различными параметрами сорбции, и смоделировать процесс дегазации (либо насыщения метаном) этих частиц. Для модели задаются необходимые физико-химические свойства угля. Искомая характеристика находится путём подбора значения.

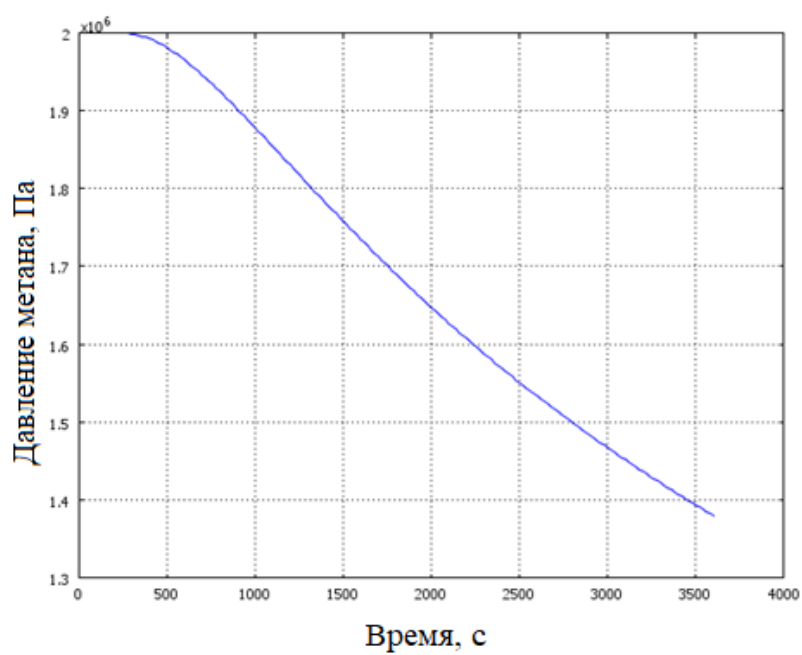
В качестве основополагающего дифференциального уравнения при моделировании массопереноса метана в угольных частицах, использовано уравнение (1.1).

На рисунках 2.5 – 2.6 представлены результаты определения проницаемости сферических частиц угля при их различном размере и параметрах сорбции. В одном случае (рис. 2.5) была определена газопроницаемость угольной частицы при насыщении её метаном до давления 20 бар за время, равное 3 часам. Во втором случае (рис. 2.6) показан результат определения газопроницаемости частицы при известном времени её дегазации (в модели принималось значение времени 1 час) с 20 бар до 14 бар.



$$D = 5\text{мм}; b = 0.5 \cdot 10^{-6} [1/\text{Па}]; a = 24 \text{ м}^3/\text{т}; k = 0.008 \cdot 10^{-18} [\text{м}^2]$$

Рисунок 2.5 – График насыщения метаном сферической частицы угля



$$D = 10\text{мм}; b = 0.207 \cdot 10^{-6} [1/\text{Па}]; a = 55,8 \text{ м}^3/\text{т}; k = 0.12 \cdot 10^{-19} [\text{м}^2]$$

Рисунок 2.6 – График дегазации сферической частицы угля

Выводы по главе

1) Обоснованы параметры лабораторной установки, обеспечивающей оперативность определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях.

2) Разработана установка, позволяющая определять константы сорбции Ленгмюра на образцах угля в лабораторных условиях.

3) С использованием лабораторной установки определены параметры сорбции образца угля пласта «Болдыревский» шахты им. С.М. Кирова, при этом $a = 33,12 \text{ м}^3\text{т}$; $b = 5,376 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$.

4) Выполнено компьютерное моделирование процессов дегазации и насыщения метаном угольной частицы, позволившее на основе решения задачи массопереноса определить газопроницаемость сферической частицы угля.

5) На основе совершенствования аппаратного обеспечения разработана методика определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях.

3 Разработка способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в натуральных условиях

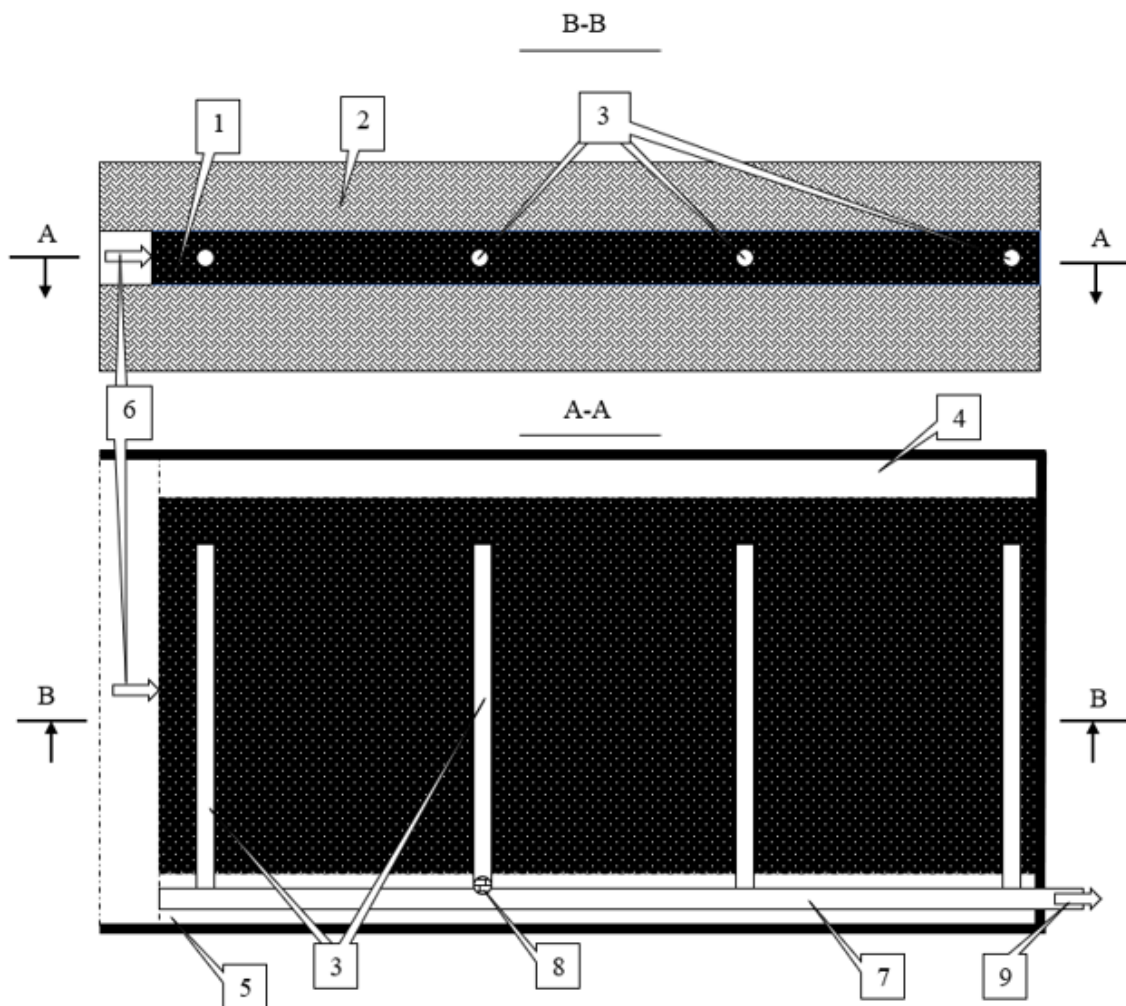
3.1 Описание экспериментального оборудования и методики определения пластового давления в условиях шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс»

Для того, чтобы обеспечить достоверный прогноз газообильности горных выработок при интенсивной отработке угольных пластов необходимо иметь данные о свойствах и состоянии угольного массива, таких как газоносность, пластовое давление метана, газопроницаемость и параметры сорбции Ленгмюра. Базовой характеристикой угольного пласта, используемой для прогноза газообильности при производстве очистных работ, является газоносность. Широко используемый метод определения газоносности основан на измерении количества газа, содержащегося в отобранной в пласте пробе угля [41].

Пластовое давление метана, газопроницаемость пласта и константы сорбции Ленгмюра также являются параметрами, влияющими на притоки метана в горные выработки и очистной забой. Прямой метод экспериментального определения пластового давления метана, используемый на шахте С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», заключается в измерениях максимального давления газа непосредственно в плотно закрытых дегазационных скважинах длиной более 100 м, пробуренных из вентиляционного или конвейерного штреков. При этом на протяжении всего наблюдения за нарастанием давления строят кривую восстановления давления (КВД).

В случае неудовлетворительной герметизации устья дегазационной скважины реализуют альтернативный способ измерения пластового давления в скважине, пробуренной в пласт из квершлага через монолитную породу.

Рисунок 3.1 показывает принципиальную схему проведения шахтных испытаний при столбовой системе разработки. Угольный массив 1 расположен между вмещающими породами 2. В массиве угля пробуривают дегазационные скважины 3. По обе стороны угольного пласта располагаются вентиляционный штрек 4 и откаточный штрек 5. Скважины 3 подключаются к магистральному газопроводу 7 для каптажа метано-воздушной смеси (МВС). Экспериментальную скважину 3 оснащают измерительными приборами 8, включающие манометр, ротаметр, а также запорной арматурой (не отображено на рисунке). МВС из магистрального газопровода 7 извлекают на поверхность вакуум-насосной станцией (ВНС).



1 – угольный массив; 2 – вмещающие породы; 3 – пластовые скважины; 4 – вентиляционный штрек; 5- откаточный штрек; 6 – направление движения лавы; 7 – магистральный газопровод; 8 – аппаратура для измерения пластового давления, 9 – направление потока

Рисунок 3.1 – Схема проведения испытаний

Рисунок 3.2 – Скважина, оборудованная измерительной аппаратурой

54

осуществляется в соответствии с рисунком 6. Скважина бурится на предусмотренную проектом глубину, а устье скважины, начальный диаметр которого составляет 76 мм, разбуривают на глубину 6 м до диаметра 93-132 мм. В качестве составных обсадных труб используют допущенные к применению стеклопластиковые трубы. Составные трубы крепятся между собой при помощи резиновых соединительных манжет длиной 200мм. Манжеты крепят непосредственно при установке обсадной трубы в скважину. Уплотнительная резиновая манжета устанавливается на расстоянии в 10 мм от конца обсадной трубы. Вторая устьевая резиновая манжета является уплотнителем для надёжной герметизации скважины и устанавливается на небольшом расстоянии от устьевой части обсадной трубы. В устьевой резиновой манжете, предусмотрены два отверстия, каждое имеет диаметр 5 мм. В эти отверстия помещают трубки, через которые осуществляют подачу герметизирующего компонента, который представляет собой полиуретановую однокомпонентную смолу «Carbofoam P» фирмы «MINOVA». Обсадную трубу вместе с уплотнительными манжетами вводят в скважину. Трубка, которая служит для подачи герметизирующего компонента, соединяется через рукав с ручным насосом, посредством которого производится подача полиуретанового клея «Carbofoam P» в затрубное пространство. Одновременно с этим через другую трубку осуществляют подачу воды. Вода вступает в реакцию со смолой и спустя 5 минут в затрубном пространстве полиуретановая смола «Carbofoam P» в смеси с водой по физико-механическим свойствам становится газонепроницаемой средой. В последующем, на устьевые части обсадных труб дегазационных скважин накручивают гофрированные трубки, при помощи которых все скважины подключаются к дегазационному трубопроводу.

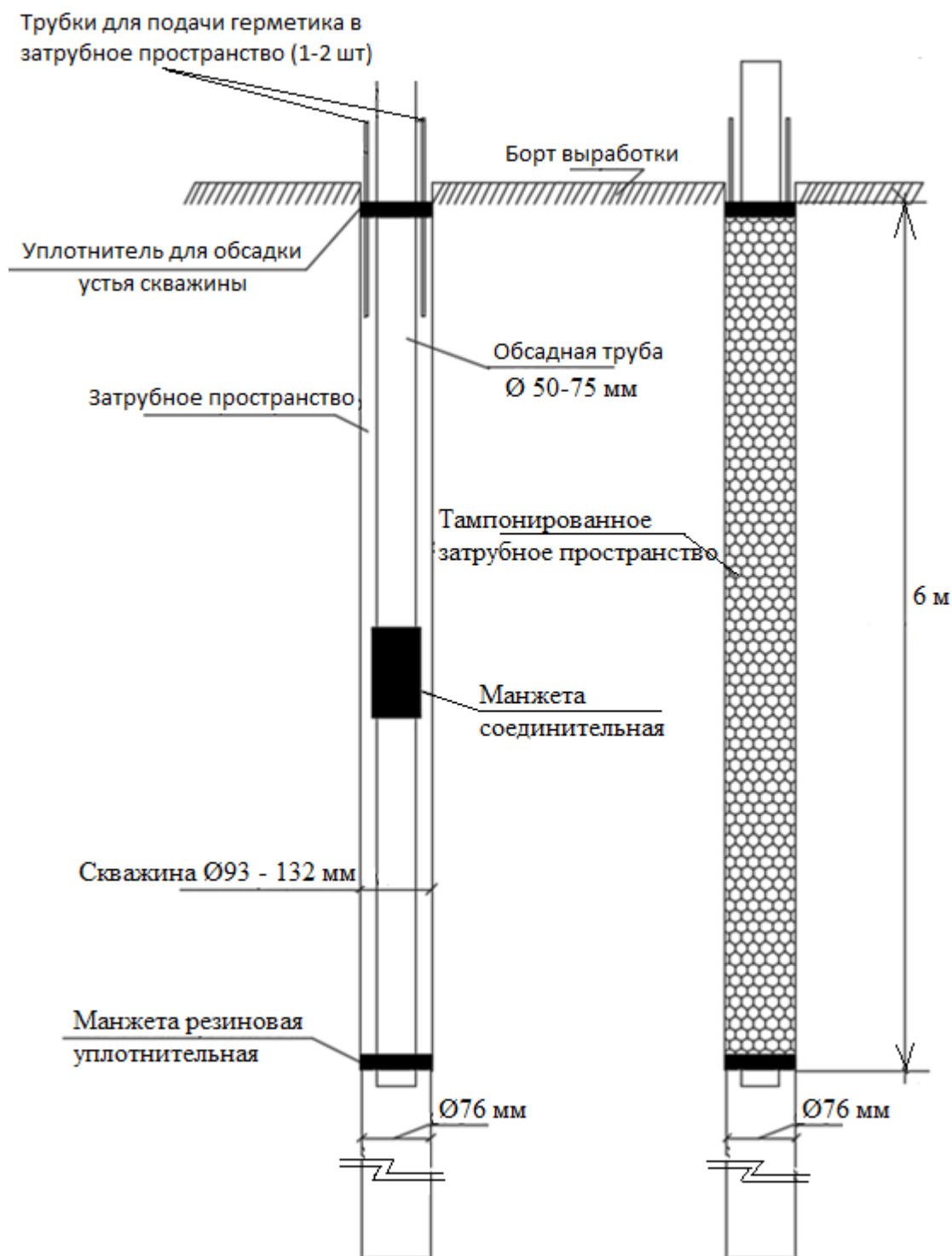


Рисунок 3.3 – Базовая схема герметизации устьевой части дегазационных скважин в условиях шахты им. С.М. Кирова

Применение базовой технологии герметизации позволяет извлекать метан из пластовых дегазационных скважин и измерять пластовое давление метана. Однако, как показывает практика, случаи неудовлетворительной

герметизации случаются довольно часто, что обусловлено высокой трещиноватостью угольного пласта в зоне вблизи штрека, достигающей до 20 м. В этом случае необходимо увеличить глубину расположения обсадных труб в скважине, сохраняя те же технологические приемы, которые отражены на рисунке 3.3.

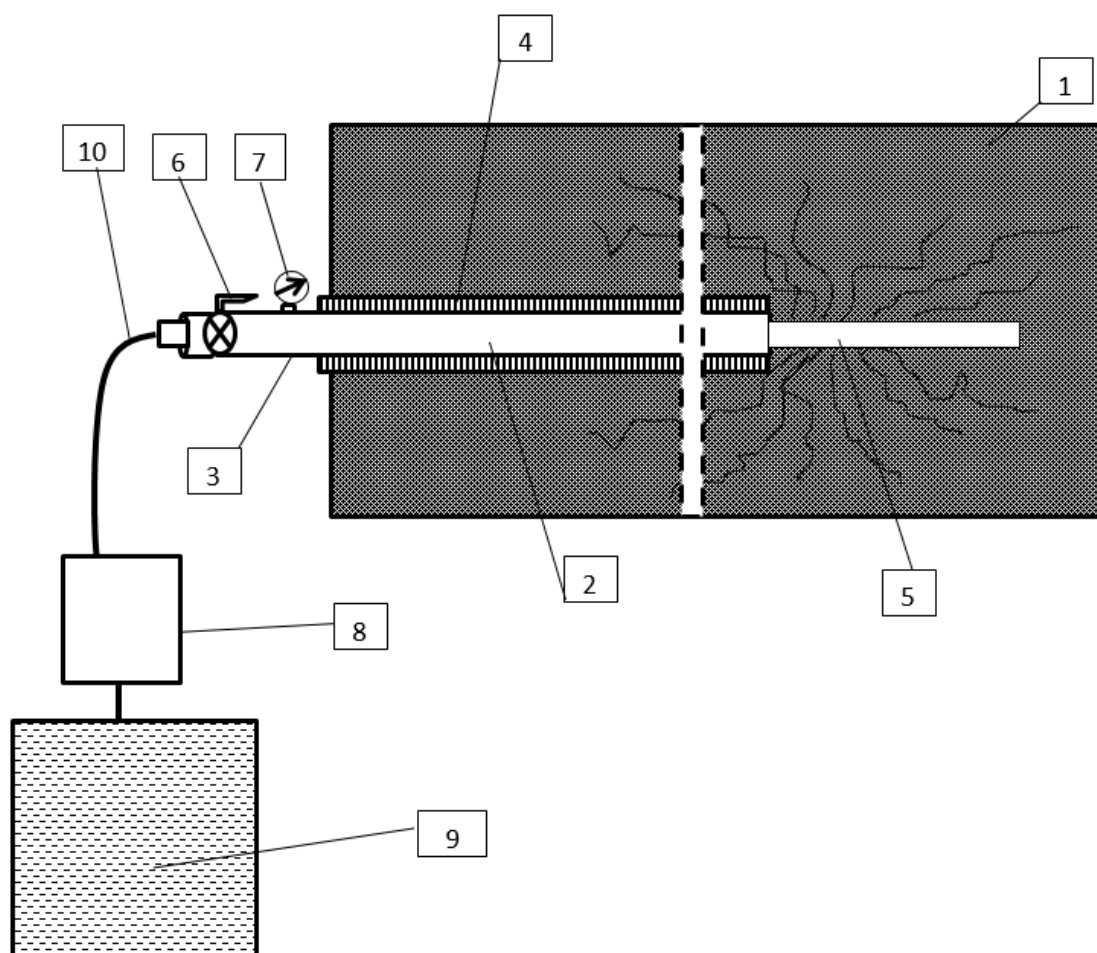
Альтернативным вариантом измерения пластового давления метана является бурение скважины в угольный пласт из горной выработки, пройденной по породе [95]. В этом случае исключается проблема высокой трещиноватости породы вокруг устья дегазационной скважины и, следовательно, измерение дебита возможно при длине устьевой герметизации до 6 м, по аналогии с рисунком 3.3.

3.1.1 Совершенствование существующей методики определения пластового давления. Обоснование способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки

Недостатком базового и альтернативного вариантов методики является низкая оперативность измерений, что обусловлено малым темпом нарастания давления метана в скважине до максимального значения, соответствующего пластовому давлению метана. Этот недостаток особенно проявляется в неразгруженных от горного давления низкопроницаемых угольных пластах, где длительность достижения максимального давления метана составляет более месяца. Задержка в получении достоверных данных о пластовом давлении метана и параметрах сорбции угольного пласта не позволяет принимать оперативные технические решения, направленные на оптимизацию очистных работ, что в конечном результате понижает их безопасность. Кроме того, известный способ не позволяет получать информацию о параметрах сорбции угольного пласта во влажном состоянии, что особенно актуально при реализации технологий с гидравлической обработкой угольного пласта для обеспечения безопасности очистных работ.

В связи с этим, научным коллективом НИТУ «МИСиС» (Каркашадзе Г.Г., Сластунов С.В., Пащенко П.Н. и др.) в 2016 г. был усовершенствован существующий вариант измерения пластового давления и запатентован [96] новый способ определения пластового давления. Техническим результатом изобретения является повышение достоверности и оперативности определения пластового давления метана, а также сорбционных и фильтрационных параметров угольного пласта в исходном и влажном состояниях.

Изобретение поясняется рисунком 3.4, где показана схема обустройства скважины и применяемое технологическое оборудование.



1 – угольный пласт, 2 – скважина, 3 – обсадная труба, 4 – герметик, 5 – разбуренный участок, 6 – кран, 7 – манометр, 8 – насос, 9 – резервуар с водой, 10 – гидравлический рукав

Рисунок 3.4 – Схема проведения эксперимента по определению пластового давления метана

В соответствии со схемой в газоносный угольный пласт 1 бурят скважину 2, производят обсадку устья этой скважины обсадной трубой 3, а пространство между стенками скважины 2 и обсадной трубы 3 герметизируют клеем 4. После застывания клея 4 скважину разбуривают на длину 5 через обсадную трубу 3. Устьевую часть скважины 2 оборудуют краном 6 и манометром 7. Для нагнетания жидкости используют насос 8, потребляющий воду из емкости 9. Подачу воды в пласт осуществляют через рукава высокого давления 10.

Способ реализуют следующим образом. После бурения скважины 2, установки обсадной трубы 3, герметизации клеем 4 пространства между стенками скважины и обсадной трубой и бурения участка скважины 5 из нее истекает метан, измерение дебита которого в течение времени осуществляют ротаметром (на рисунке не показан) из обсадной трубы 3. После стабилизации дебита метана во времени обсадную трубу 3 присоединяют через рукав 10 к насосу 8 с емкостью 9. Далее в скважину 5 через обсадную трубу 3 нагнетают воду под давлением 15...20 МПа, которая по исходным и вновь образованным каналам проницаемости распространяется через полость скважины 5 в угольный пласт 1. При этом формируется гидравлическая связь нагнетаемой воды с метаном в угольном пласте 1. Затем устье скважины с обсадной трубой 3 закрывают краном 6. При этом с течением времени вода под остаточным давлением распространяется вглубь пласта 1, что фиксируется в виде понижения давления воды на манометре 7. Минимальное установившееся значение давления на манометре 7 соответствует искомой величине верхнего предела (P_v) пластового давления метана в угольном пласте 1. После этого устье скважины открывают краном 6 и избыточная свободная вода самоистечением выходит из угольного пласта 1. Капиллярная и поровая вода остается в угольном пласте 1, сохраняя его влажность, характерную для процесса гидрообработки. На заключительной стадии реализации способа аналогичным путем с помощью ротаметра (на рисунке не показан) фиксируют изменение дебита метана из скважины в течение времени.

По второму варианту реализации способа после истечения воды устье скважины закрывают краном 6 и манометром 7 измеряют в ней установившееся пластовое давление метана. В этом случае реализуется режим нарастания давления метана от атмосферного до максимального, что соответствует искомой величине нижнего предела (P_n) пластового давления метана в угольном массиве 1. Истинное пластовое давление метана определяют в диапазоне между величинами верхнего и нижнего пределов пластового давления.

3.1.2 Обоснование эффективных параметров экспериментальной скважины для проведения испытаний при помощи гидровоздействия на пласт

Сущность подземного гидроразрыва через пластовые скважины заключается в бурении скважин гидроразрыва непосредственно по угольному пласту из подготовительных выработок и обработке угольного пласта через дополнительно разбуренный необсаженный участок скважины расчетной длиной от 2 до 150 м.

Для осуществления гидроразрыва буровым станком производят бурение скважины на необходимую глубину буровой коронкой диаметром 130 мм при полной длине скважин – 37÷150 м. Длина участка герметизации скважины длиной 36 м принимается исходя из того, чтобы не допустить прорыв рабочей жидкости из скважины в выработку. Герметизацию пространства между обсадной трубой и стенками скважины предлагается осуществлять апробированным шахтным двухкомпонентным герметиком – «Шахтиклеем».

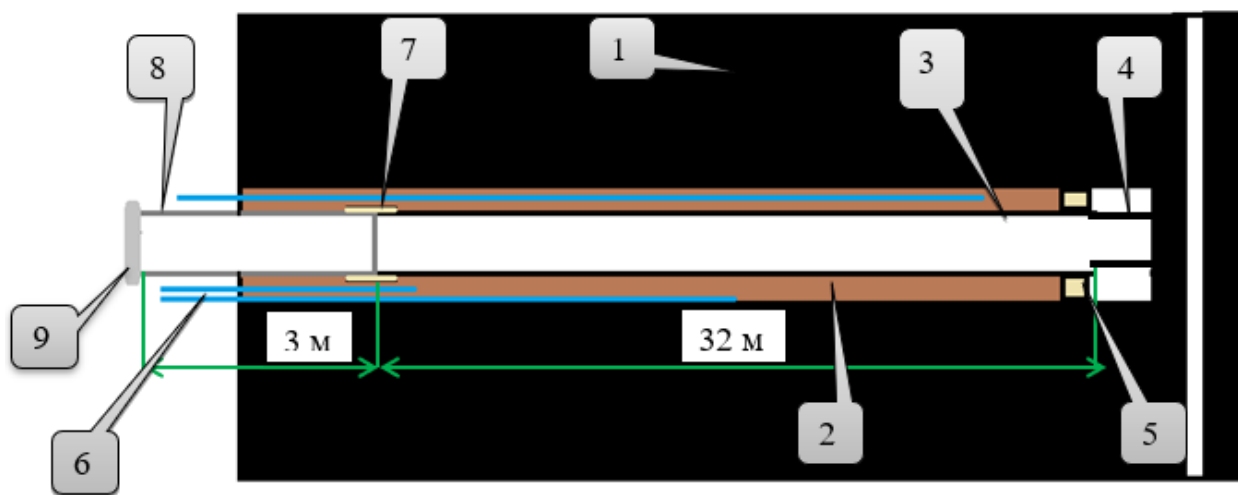
При гидроразрыве угольного пласта очень важной задачей является обеспечение высокой степени герметичности устья скважины, т.к. этот фактор является определяющим в отношении эффективности проводимого гидровоздействия на пласт. В соответствии с этим, герметизация устьевой части скважин должна выдерживать давление до 25 МПа.

Известна технология герметизации скважин при реализации гидравлических ударов с использованием металлических цельнотянутых труб

и цементного раствора в затрубном пространстве. Технология апробирована в Карагандинском угольном бассейне на 6 шахтах [97]. Возможность применения такой технологии предусмотрена «Технологической частью проекта по предварительной дегазации пласта «Болдыревский» на поле шахты им. Кирова на выемочном участке 24-58 при реализации гидроразрыва пласта из подземных скважин».

Поэтому обсадку скважин для проведения гидроразрыва предлагается осуществлять с применением цельнотянутых металлических труб диаметром 70 мм при толщине стенки в 5 мм. Трубки для подачи клея-герметика в затрубное пространство скважины устанавливают в двух-трех местах (например, в скважине на глубине - 30 м, в середине - 17 м и в устьевой части - 5 м). Герметизирующие компоненты «Шахтикля» (смола и вода) нагнетают через трубки диаметром 15-20 мм. Для подачи двух компонентов клея в затрубное пространство используют пневматический насос.

На рисунке 3.5 отражена принципиальная схема обустройства скважины, служащей для проведения гидроразрыва пласта.



1 - угольный пласт; 2 - затрубное пространство; 3 - цельная стеклопластиковая обсадная труба ($d=75$ мм; $l=32$ м); 4 - необсаженный участок скважины длиной $2\div 150$ м; 5- манжета ($d=95$ мм.); 6- трубки для подачи герметика ($d=15-20$ мм); 7 – муфта, соединяющая обсадные трубы; 8 - обсадная труба; 9- переходник для соединения с рукавом высокого давления

Рисунок 3.5 - Схема герметизации скважины гидроразрыва

При таком способе герметизации затрубного пространства скважины гидроразрыва происходит частичная инъекция «Шахтикля» в трещиноватое пространство вокруг скважины, что способствует качеству герметизации.

После затвердевания герметика «Шахтикля» производят повторное бурение скважины через обсадную трубу на глубину 37...150 м. При этом предполагается использование буровой коронки меньшего диаметра.

3.2 Результаты определения пластового давления метана в шахтных условиях, полученные с применением усовершенствованного способа

Величина газопроницаемости угольного пласта, пластовое давление метана, а также параметры сорбции Ленгмюра оказывают значительное влияние на газообильность горных выработок. Особенно важно иметь в распоряжении достоверные данные об этих параметрах, поскольку это необходимо для оптимального планирования работ по обеспечению высоких нагрузок на очистной забой на выемочном участке и для решения практических задач, связанных с дегазацией угольных пластов при их подземной разработке или промысловой добыче метана.

Практическая реализация усовершенствованного способа определения пластового давления, описанного в п. 3.1 настоящей работы была проведена в 2016 г. на угольном пласте «Болдыревский» (шахта им. С. М. Кирова), который разрабатывается по столбовой системе разработки. Из вентиляционного штрека лавы 24-58 пробурили скважину длиной 36 м. Глубина заложения – 440 м. Обсадка скважины произведена стальными трубами диаметром 70 мм при толщине стенки – 5 мм. Пространство между скважиной и обсадной трубой заполнили путем нагнетания шахтного двухкомпонентного герметика «Шахтиклей». После герметизации, скважину разбурили на дополнительную длину 3 м буровой коронкой диаметром 50 мм. Затем, скважину обустроили в соответствии с рисунком 3.4.

Далее в скважину произвели нагнетание воды под предельным давлением 14 МПа. Скважину закрыли и выдержали под давлением в течение 4 суток. Результаты измерений давления воды представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Давление воды в скважине

№ п/п	Время после закрытия скважины, час	Давление воды в скважине, МПа
1	0	14
2	24	8,8
3	48	5,2
4	72	3,2
5	90	3,2

Затем открыли кран и осуществили самопроизвольный слив воды из скважины. После слива воды скважину закрыли краном и манометром измеряли нарастание давления метана в скважине, вплоть до величины нижнего предела пластового давления. Результаты измерений представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Давление метана в скважине

№ п/п	Время после закрытия скважины, час	Давление метана в скважине, МПа
1	0	0,1
2	24	2,5
3	48	3,0
4	72	3,1

Таким образом, истинное пластовое давление метана лежит в диапазоне между верхним и нижним пределами и составляет 3,1...3,2 МПа.

Представляет интерес сравнить результаты описанного выше эксперимента с результатами определения пластового давления, полученными в результате эксперимента в 2015 г. [79, 98]. Испытания также выполнялись на

шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Испытательная скважины была пробурена в вентиляционной печи 24-58 пласта Болдыревского. Длина скважины 36 м, диаметр 132 мм.

На рисунке 3.6 представлены результаты измерений, из которых следует, что значение пластового давления метана в угольном пласте на участке бурения данной скважины составляет 32 бар.

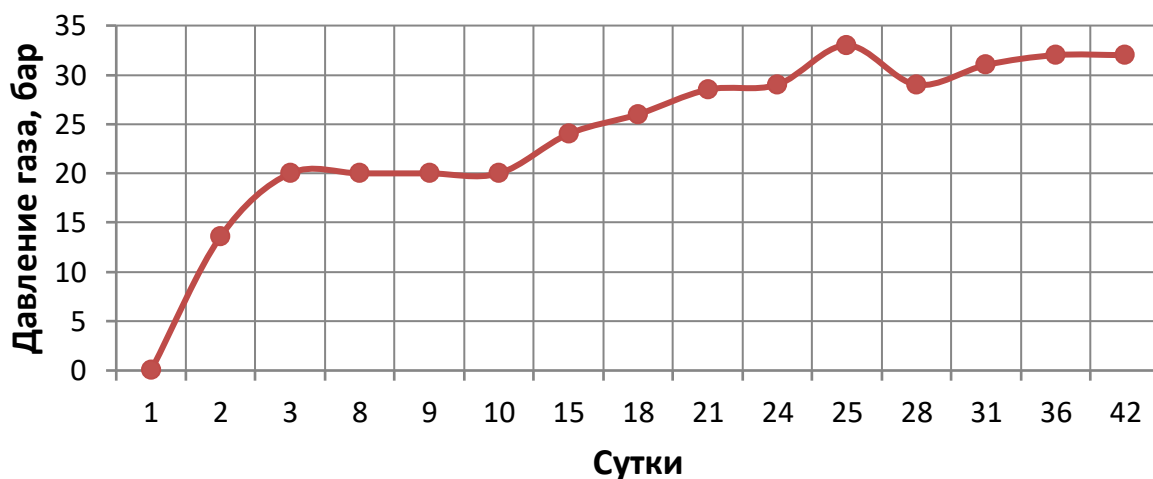


Рисунок 3.6 – Кривая нарастания давления в короткой скважине

В таблице (3.3) представлены параметры скважин и результаты гидровоздействия на угольный пласт через экспериментальные скважины, которые были пробурены в пласт из вентиляционного штрека выемочного участка 24-58 пласта «Болдыревский» шахты им. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Значительный интерес представляют результаты замеров установившегося давления жидкости после гидроразрыва пласта (ГРП). Расстояние между скважинами – 70 м. Выкопировка из плана горных работ с указанием мест заложения скважин приведена на рисунке 3.9.

Таблица 3.3 – Параметры скважин и результаты гидровоздействия через экспериментальные скважины

Сква- жина ГРП	Глубина заложе- ния, м	Длина сква- жины, м	Длина раз- буренного участка после гермети- зации, м	Началь- ный дебит газа, л/мин	Концентра- ция ме- тана, %	Объём за- качан- ной жид- кости, м ³	Установивше- еся давление жидкости по- сле ГРП
----------------------	------------------------------	------------------------------	--	---	----------------------------------	---	---

1	444	36	2	25	16,7	5,4	Не измерялось
2	442	36	2	8,5	96,4	15	Не измерялось
3	438	36	3	3,5	64	20	32
4	416	36	7	0	-	15	32
5	407	36	5	10	81	10	0
6	394	36	3	20	70	15,6	0

Видно, что в скважинах №№ 5,6 значение давления жидкости после ГРП падало до нуля, что объясняется разрастанием трещин гидроразрыва во время гидровоздействия до плоскостей выработок либо до пластовых скважин, пробуренных в зоне воздействия ГРП. Во время гидроразрыва или гидрорасчленения угольного пласта через эти скважины фиксировался капез и неинтенсивные выделения эмульсии из кровли выработки в местах заложения анкеров для крепления монорельсовой балки, либо наблюдались водопроявления в бортах выработки в нескольких метрах от скважин ГРП, что свидетельствует о гидравлической связи разбуренного необсаженного участка экспериментальной скважины с выработкой.

На рисунках 3.7 и 3.8 представлены графики падения давления жидкости в скважинах 5 и 3 соответственно.

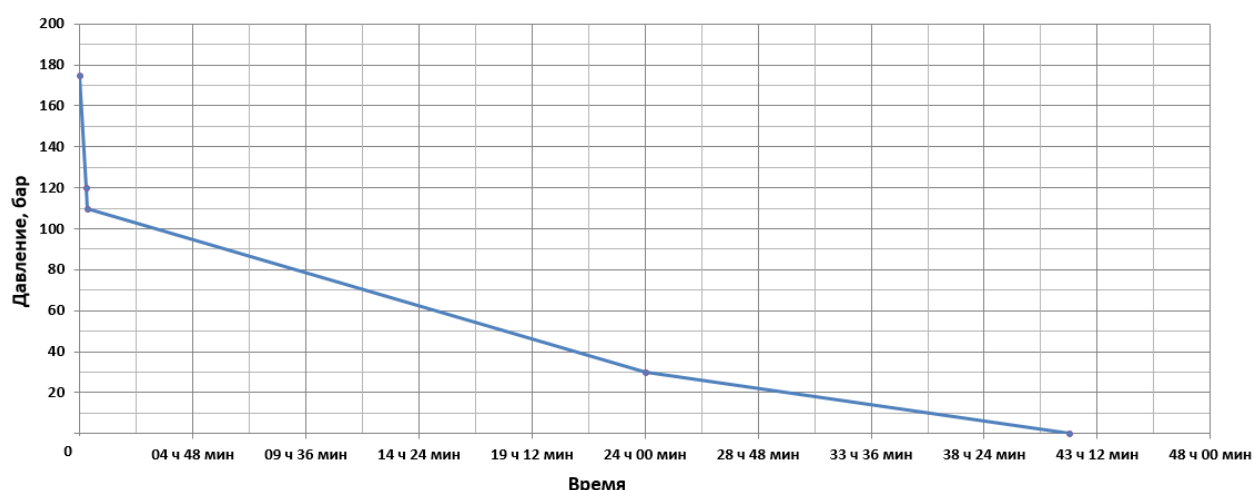


Рисунок 3.7 – Падение давления во времени после ГРП при выдержке рабочей жидкости в скважине 5

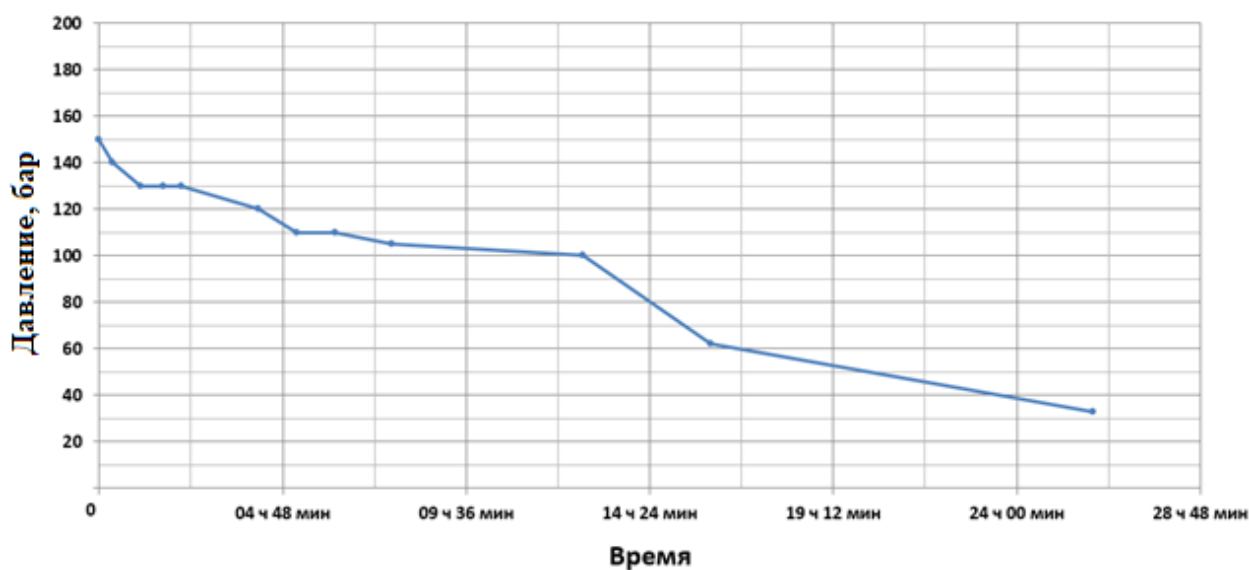


Рисунок 3.8 – Падение давления во времени после ГРП при выдержке рабочей жидкости в скважине 3

Анализируя приведённые результаты, можно утверждать, что данные о пластовом давлении можно оперативно получить основываясь на установившемся давлении жидкости после гидрообработки пласта (верхний предел пластового давления), однако всё же полагаться стоит именно на установившееся давление газа после истечения жидкости, т.к. на практике в некоторых случаях при гидрообработке возникает гидравлическая связь скважины с выработкой и давление жидкости падает до нуля. В случае надёжной герметизации скважин гидроразрыва, достаточной удалённости необсаженного участка от борта выработки и отсутствия гидравлической связи с выработкой либо с пластовыми дегазационными скважинами (в случае их заложения в зоне воздействия ГРП) после проведения гидроразрыва угольного пласта, значение верхнего предела пластового давления можно получить спустя 1-1,5 суток, что является весьма важным фактором, т.к. значения получены достаточно оперативно.

Подводя итоги, можно констатировать, что пластовое давление метана в неразгруженном от горного давления угольном пласте «Болдыревский» на участке бурения скважины №3 при глубине 440м составляет 31,5 бар.

Рисунок 3.9 – Выкопировка из плана горных работ

3.3 Результаты экспериментов по определению сорбционных свойств и проницаемости угольного пласта в шахтных условиях (до и после гидровоздействия)

Существуют известные апробированные лабораторные методики, служащие для определения параметров сорбции Ленгмюра, которые предусматривают насыщение метаном образца угля и построение зависимости массы сорбированного метана от давления. Ниже представлен альтернативный способ определения констант Ленгмюра. Среди достоинств данного способа отмечается возможность оперативного получения данных о параметрах сорбции при выполнении шахтных испытаний непосредственно на масштабном объекте – в угольном пласте при его естественных условиях залегания.

Учитывая потребность более достоверного прогнозирования опасных проявлений угольного метана, необходимо иметь в распоряжении оперативные прямые и косвенные методики определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта, основанных на использовании современных подходов к решению задач массопереноса метана.

Анализ уравнения (1.1) говорит нам о наличии четырёх неизвестных параметрах, которые необходимо определить: пластовом давлении метана (P), газопроницаемости угольного пласта в прискважинной зоне (k) и двух констант (a, b), входящих в изотерму сорбции Ленгмюра в соответствии с уравнением (1.16). Значения остальных параметров, входящих в уравнение (1.1), указаны в справочной литературе, а коэффициент пористости определяется в лаборатории по известным методикам, либо принимается исходя из данных геологоразведки.

Главная идея заключается в последовательном измерении дебита метана из открытой экспериментальной скважины в течение времени и последующем измерением давления метана в той же скважине, после перекрытия её устья [79, 96]. Искомые параметры находят путём решения задачи массопереноса

при обработке экспериментальных данных и сопоставлении результатов шахтных измерений с теоретической моделью процесса массопереноса метана в экспериментальную скважину. Методика предусматривает определение четырёх неизвестных параметров: пластового давления метана, коэффициента газопроницаемости угольного пласта вокруг дегазационной скважины и двух констант сорбции Ленгмюра, входящих в уравнение (1.16).

Основополагающим дифференциальным уравнением массопереноса метана в угольном пласте является уравнение (1.1), которое и используется для решения задачи. Данное уравнение не имеет точного аналитического решения, поэтому для практических целей следует использовать средства компьютерного моделирования методом конечных элементов. В качестве рабочего инструмента использовано достаточно апробированное и известное программное обеспечение «COMSOL Multiphysics», позволяющее получить результаты при заданных краевых условиях.

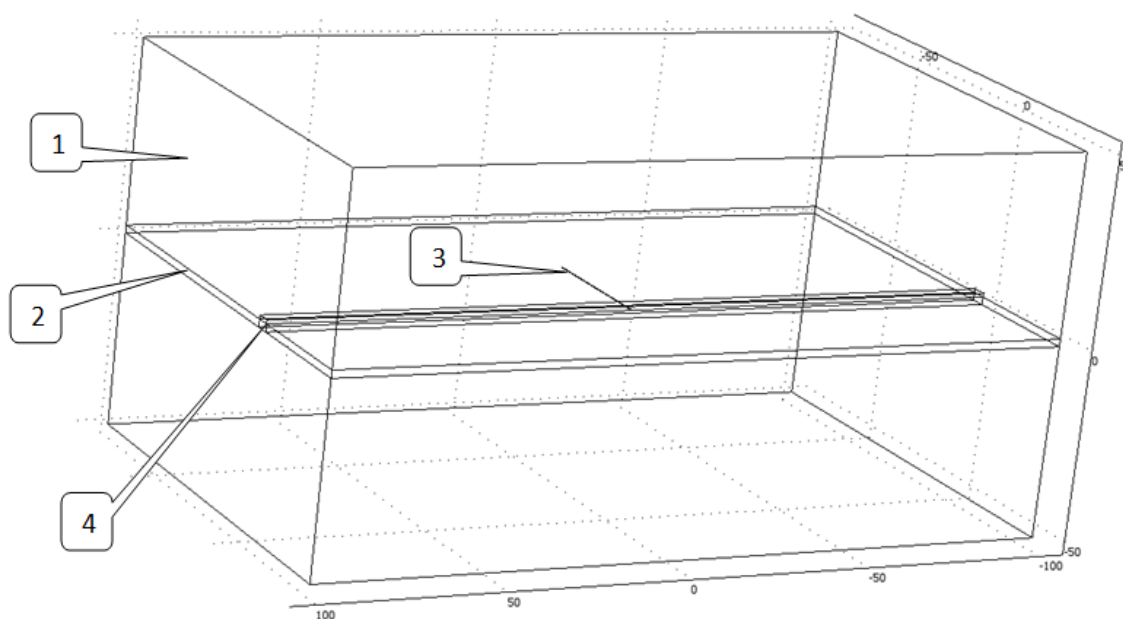
Согласно способу сначала следует определить пластовое давление метана. Его достоверное значение будет соответствовать установившемуся режиму нарастания давления газа в закрытой дегазационной скважине. В установившемся режиме решение уравнения (1.1) очевидно не зависит ни от газопроницаемости угля, ни от параметров сорбции Ленгмюра, поэтому значение установившегося давления газа в скважине представляет собой истинное пластовое давление метана в угольном пласте и определяется однозначно.

Что касается оставшихся двух констант сорбции Ленгмюра и коэффициента газопроницаемости угля, то они определяются из решения задачи массопереноса метана путём подбора значений вышеперечисленных параметров и сопоставления графика зависимости дебита метана во времени его истечения, полученного путём экспериментальных измерений с теоретической зависимостью, полученной численным методом.

Определение констант Ленгмюра по данной методике позволяет получить достоверную информацию об искомых параметрах, поскольку

рассчитанные коэффициенты отражают реальный процесс дегазации на всех стадиях сорбции или десорбции метана в угольном пласте.

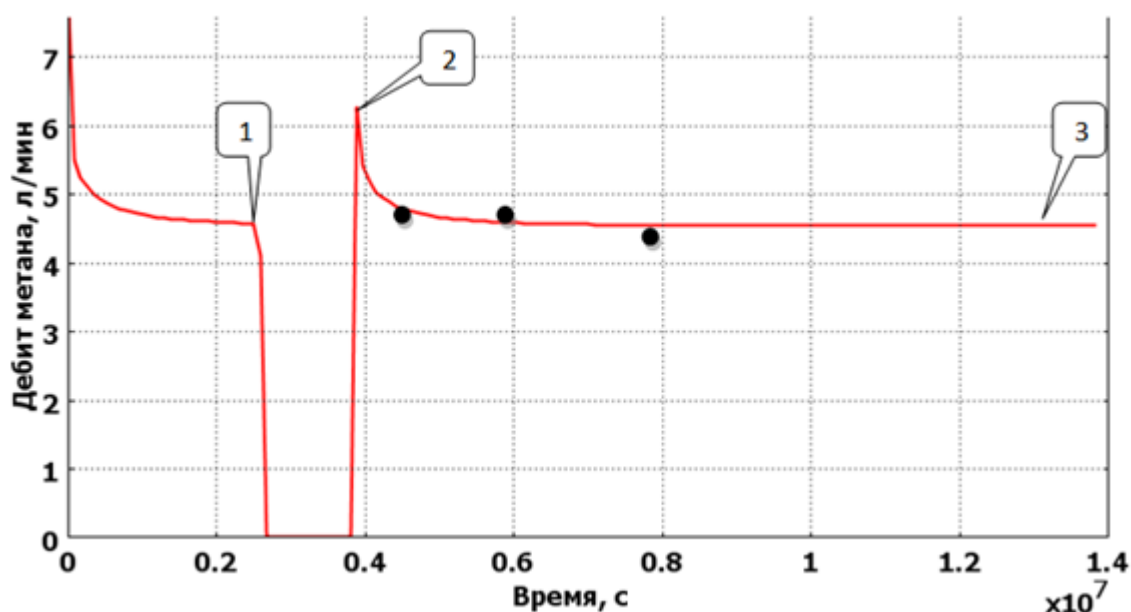
Шахтный способ определения параметров сорбции выполнен в соответствии с представленной технологической схемой, которая реализована на практике и описана также в компьютерном варианте средствами программного обеспечения «COMSOL Multiphysics». На рисунке 3.10 представлен объект моделирования в виде короткой скважины, пробуренной в угольный пласт из вентиляционного штрека.



1 – вмещающие породы; 2 – угольный пласт; 3 – экспериментальная скважина; 4 – выработка (вентиляционный штрек)

Рисунок 3.10 – Модель короткой скважины в угольном пласте

Фильтрационные характеристики угольного пласта определены путём сопоставления экспериментальных данных с теоретической зависимостью, представленной на рисунке 3.11. Теоретическая зависимость устанавливалась путём вариации проницаемости пласта, параметров сорбции Ленгмюра и фиксированном пластовом давлении метана при компьютерном моделировании.



1 – дебит в момент закрытия скважины; 2 – дебит после открытия скважины; 3 – установившийся дебит метана

Рисунок 3.11 – Теоретическая зависимость и экспериментальные точки

Установлено, что совпадение результатов компьютерного моделирования и результатов эксперимента с погрешностью не более 5% имеет место при следующих параметрах:

- пластовое давление метана 32 бар;
- коэффициент проницаемости угольного пласта в зоне гидравлической обработки $7,7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ (7,7 мкД);
- параметры сорбции Ленгмюра угольного пласта: $a = 30,0 \text{ м}^3/\text{т}$; $b = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$.

Представленный методический прием определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в шахтных условиях дополняет лабораторные методики и имеет перспективу использования при моделировании задач пластовой дегазации. При этом вычисленный коэффициент проницаемости угольного пласта не следует принимать в качестве характеристики его коллекторских свойств, поскольку

гидравлическая обработка угольного пласта нарушает его природную целостность.

Второй вариант определения сорбционных параметров угольного пласта.

В результате реализации второго варианта отмечается возможность определения сорбционных параметров угольного пласта в исходном и влажном состояниях.

Согласно второму варианту, скважину обустривают в соответствии с рисунком 3.4. Комплекс мероприятий включает бурение пластовой скважины, герметизацию ее устья, измерение давления и дебита метана на стадиях закрытия и открытия скважины, верификацию сорбционных параметров в теоретической модели массопереноса метана с данными измерений давления и дебита метана. После достижения установившегося дебита метана в скважину нагнетают воду под давлением 10...15 МПа, закрывают устье скважины в течение времени стабилизации давлений воды и метана, затем после истечения воды из скважины измеряют текущий дебит метана, при этом по данным измерений дебита метана до и после гидрообработки верифицируют сорбционные параметры угольного пласта в исходном и влажном состояниях. Вместе с прямым определением пластового давления метана, полученных данных достаточно для определения параметров сорбции угольного пласта в исходном и влажном состояниях. В основе методики верификации параметров сорбции лежит дифференциальное уравнение (1.1) в частных производных массопереноса метана в угольном пласте, отражающее закон сохранения массы, закон фильтрации Дарси и уравнение сорбции Ленгмюра.

Методика верификации параметров сорбции Ленгмюра базируется на решении уравнения (1.1) при помощи программного комплекса «Comsol Muliphysics» с учетом краевых условий в виде начального распределения давления метана в угольном пласте и граничных условий в виде давления

метана на полости скважины и в пласте – на удалении от скважины. Последовательность верификации заключается в первоочередном вычислении коэффициента проницаемости угольного пласта вокруг скважины по результатам измерений установившегося дебита метана. Характерно, что в установившемся режиме фильтрации коэффициент проницаемости угля, в соответствии с уравнением (1.1), зависит от найденного пластового давления метана и не зависит от параметров сорбции и поэтому определяется однозначно. Что касается оставшихся двух параметров сорбции, то их вычисляют по двум или более измеренным значениям дебита метана в различные моменты времени в нестационарном режиме истечения метана из скважины. При этом значения параметров Ленгмюра угольного пласта в исходном состоянии отличаются от этих же параметров пласта во влажном состоянии. Что касается коэффициента проницаемости угля, то эти данные для практики представляют ограниченный интерес, поскольку их значения характеризуют ситуацию с деформациями на локальном участке вокруг скважины и поэтому не несут объективной информации об угольном пласте. При этом достоверная информация о параметрах сорбции Ленгмюра угольного пласта в исходном и влажном состояниях, определённая оперативно, позволяет принимать обоснованные технические решения по снижению метанообильности очистных выработок, что обеспечивает более высокую безопасность очистных работ с высокой производительностью.

Экспериментальные работы проводились в 2016 г. в угольном пласте «Болдыревский» (шахта им. С. М. Кирова), который разрабатывается по столбовой системе разработки. Из вентиляционного штрека лавы 24-58 была пробурена скважина длиной 36 м. Обсадка скважины производилась стальными трубами диаметром 70 мм при толщине стенки – 5 мм. Пространство между скважиной и обсадной трубой заполняли путем нагнетания шахтного двухкомпонентного герметика «Carbofoam» с помощью автоматического насоса. После герметизации скважину разбурили через обсадную трубу на дополнительную длину 3 м буровой коронкой диаметром

50 мм. Затем после обустройства скважины в соответствии с рисунком 1 с помощью пластикового ротаметра фирмы Dwyer выполнялись замеры дебита метана. Результаты замеров представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Дебиты метана в исходном состоянии пласта

№ п/п	Время после бурения дополнительного участка скважины, час	Дебит метана, л/мин
1	1	6
2	4	5
3	12	4,5
4	48	4

Затем произвели гидроразрыв пласта и определили верхний предел пластового давления (по данным таблицы 3.1 принимаем $P_v = 3,2$ МПа). В последующем измеряли дебит метана из скважины после гидрообработки. Результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Дебиты метана после гидрообработки пласта

№ п/п	Время после начала истечения воды, час	Дебит метана, л/мин
1	0,5	90
2	6	50
3	24	45
4	96	40

Далее устье скважины перекрыли и измеряли нарастание давления газа. По результатам замеров давления газа установили нижний предел пластового давления (по данным таблицы 3.2 принимает $P_n = 3,1$ МПа).

Полученных данных из шахтного эксперимента достаточно для верификации сорбционных параметров угольного пласта в исходном и влажном состояниях.

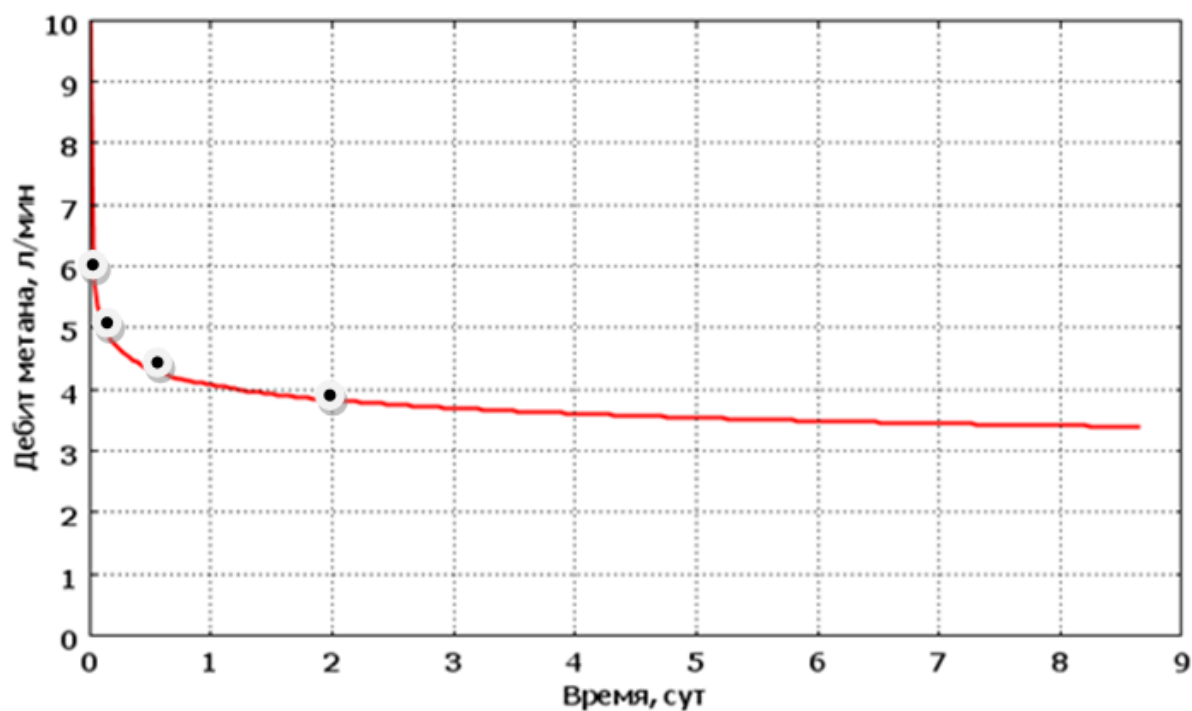


Рисунок 3.12 - Зависимость дебита метана во времени его истечения из экспериментальной скважины в исходном состоянии пласта

На рисунке 3.12 показан результат верификации параметров сорбции по теоретической модели и шахтным измерениям для исходного пласта, по которым получены следующие результаты:

коэффициент проницаемости $k_1=0,04$ мД;

сорбционная ёмкость угля $a= 30,5$ м³/т;

параметр изотермы сорбции Ленгмюра $b=0,26 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹.

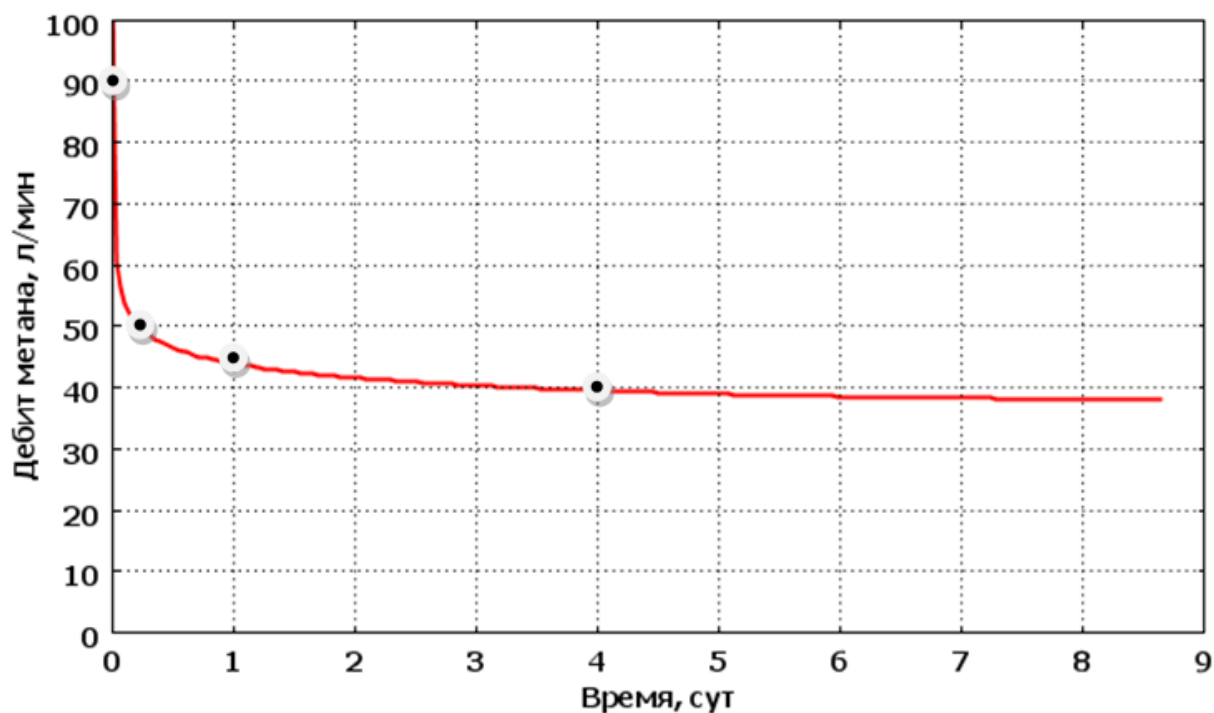


Рисунок 3.13 - Зависимость дебита метана во времени его истечения из экспериментальной скважины после гидроразрыва пласта

На рисунке 3.13 показан аналогичный результат верификации для влажного угля после гидроразрыва пласта:

коэффициент проницаемости $k_1=0,5$ мД;

сорбционная емкость угля $a_1= 24,1$ м³/т;

параметр изотермы сорбции Ленгмюра $b_1=0,19 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹.

Таким образом, в соответствии с представленным способом путем верификации вычисляют параметры сорбции угольного пласта в исходном и влажном состоянии. Достоверность получаемой информации достигается за счет прямых экспериментов на натурном объекте.

Потребителем полученной информации является технический отдел шахты, планирующий безопасную выемку исходного или увлажнённого угля при высокоинтенсивной отработке угольного пласта.

Выводы по главе

1) Обосновано экспериментальное оборудование для определения пластового давления в шахтных условиях. Оборудование апробировано в условиях шахты им. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

2) Предложен, обоснован и апробирован способ определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Полученные результаты могут быть использованы при планировании безопасной выемки исходного или увлажнённого угля при высоких темпах отработки выемочного участка шахты.

3) По результатам шахтных экспериментов по определению пластового давления метана в шахтных условиях установлено, что истинное значение пластового давления метана в неразгруженном от горного давления пласте «Болдыревский» ш. им. С.М. Кирова на участке бурения скважины №3 при глубине 440м составляет 31,5 бар.

4) Обоснована и разработана методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки.

5) Установлено, что осуществление гидровоздействия на угольный пласт через пластовую скважину позволяет интенсифицировать определение пластового давления.

6) Значение проницаемости не разгруженного от горного давления угольного пласта, определённое до гидровоздействия, может быть использовано для прогноза объёмов каптируемого дегазационными скважинами метана и последующей оценки коэффициента предварительной дегазации угольного пласта с целью принятия оперативных решений по корректировке нагрузок на очистной забой либо по интенсификации дегазации угольного пласта.

4 Прогноз газообильности и предельно-допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору на основе разработанного способа определения параметров массопереноса метана

4.1 Обоснование методики прогноза газообильности очистного забоя, а также её совершенствование с учётом определённых ранее свойств угольного пласта

На современном этапе развития горных машин при использовании передовой горной техники для разработки угольных пластов подземным способом вполне реалистично достичь нагрузок на очистные забои на уровне 40 тыс. т/сут и более. Экономический показатель рентабельности добычи при таких высоких нагрузках на забой достигает высокого значения. Однако метановый «барьер» является препятствием для использования передовых технологий, и является причиной ограничения нагрузок на очистные забои.

На текущий момент основным документом, регламентирующим величину максимально допустимой нагрузки на очистной забой, является «Руководство...» [44], которое, как отмечалось ранее, в какой-то степени справедливо для нагрузок на забой до 4 тыс. т/сут. На сегодняшний день на шахтах Кузбасса уже на стадии проектирования горных работ планируется добыча угля с нагрузками на забой свыше 5 тыс. т/сут. Чтобы обосновать такие нагрузки, используются данные лав-аналогов, уже отработанных при таких высоких нагрузках. При таком подходе, не учитывая фундаментальные научные достижения в области массопереноса метана, ограничиваются возможности оптимизирования таких технологических параметров системы разработки. Например, сложнее спроектировать и рассчитать схему проветривания, труднее предложить оптимальную технологию дегазации пласта, подобрать нужную длину лавы и пр.

Основанием для предварительного прогноза максимально допустимой нагрузки на очистной забой являются данные по газообильности горных выработок в идентичных условиях на лавах-аналогах. При этом используются геологоразведочные данные, предусматривающие вычисление коэффициента пористости и значений природной газоносности угольного пласта. Определение величины пластового давления метана или значений параметров сорбции Ленгмюра, как правило, вообще не производят. Также отсутствуют данные по газопроницаемости углепородного массива, хотя значения этого параметра являются не особо информативными, потому что эти значения будут зависеть от величины горного давления и от методики проведения измерений. Подытожив, можно сделать вывод о том, что вышеперечисленные факторы приводят к экономическому риску при проектировании угольных шахт.

В связи с изложенным, разработанная учёными НИТУ «МИСиС» и АО «СУЭК-Кузбасс» за последние несколько лет «Методика расчёта допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору» [8, 14, 99-102, 112] основывается на фундаментальных уравнениях массопереноса метана в угольном пласте [116]. Вместо эмпирических коэффициентов в «Методике...» используются базовые физические свойства углепородного массива, а также технологические параметры системы разработки [116]. При таком подходе к прогнозу газообильности и допустимой нагрузки на очистной забой повышается достоверность прогноза, что позволяет руководству угольной шахты обоснованно планировать добычу угля.

Для максимально точного прогноза в известной «Методике расчёта...» были учтены факторы притоков метана из отбиваемого комбайном угля в лаве [103], параметры системы разработки [101], пластовое давление метана [104], газопроницаемость угольного пласта и параметры сорбции Ленгмюра [86, 96, 104], влажность угольного пласта [93], газопроницаемость отбитого угля [105], а также результаты исследований Мазаника Е.В., Лупия М.Г., Иванова Ю.М., Шмата В.Н., Семькина Ю.А. [106-110].

Основополагающим дифференциальным уравнением, лежащим в основе методики расчета метанопритока из всех источников угленородного массива является дифференциальное уравнение в частных производных (1.1).

На рисунке 4.1 изображён выемочный участок, на котором показаны все источники метана. Система разработки – столбовая.

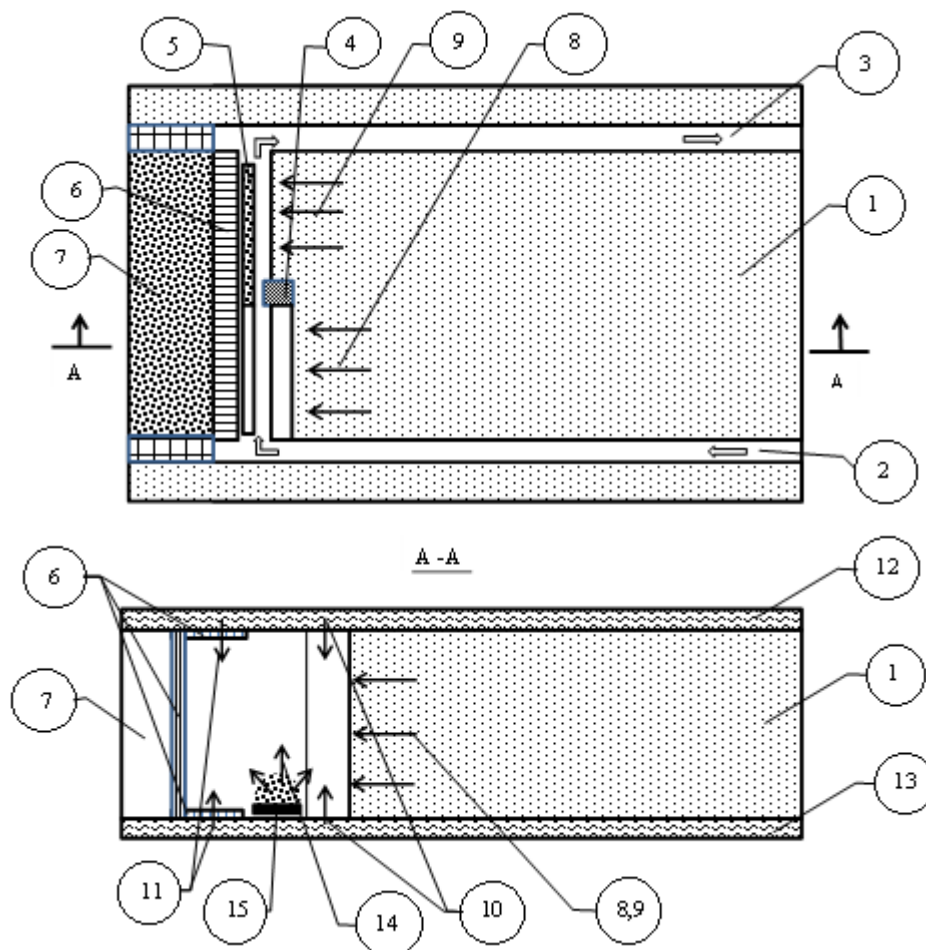


Рисунок 4.1 - Источники притоков метана в очистной забой

Вентиляционный 2 и откаточный 3 штреки расположены по обе стороны угольного пласта 1. При отбойке угля добычной комбайн 4 перемещается в направлении откаточного штрека, в том же направлении по лавному конвейеру 15 транспортируется отбитый от массива уголь 5. Механизированная крепь 6 поддерживает кровлю и изолирует лаву от выработанного пространства 7. Притоки метана в лаву поступают из груди свежесоборанного забоя 8, образующегося в результате перемещения

добычного комбайна; из участка угольного пласта 9 перед комбайном, который был сформирован из предыдущего цикла очистки угля на стадии отработки забоя; из свежеобнажённых мест 10 пород кровли 12 и пород почвы 13, а также из мест контакта 11 механизированной крепи с породами кровли и почвы; из отбитого угля 14 на лавном конвейере 15.

Необходимы следующие исходные данные для выполнения расчетов по методике: проектные данные по системе разработки, физические свойства углепородного массива. Рисунок 4.2 отображает последовательность расчетов. Такой подход обеспечивает исходным физическим свойствам углепородного массива однозначное толкование. Технологические параметры системы разработки и технические данные очистного оборудования берутся из соответствующей технической документации.

Базовые физические свойства углепородного массива определяются в лабораторных условиях. Фундаментальные свойства метана описаны в справочной литературе. Объёмную массу угля, пористость, газоносность угля определяют на основе лабораторных исследований, которые производятся в штатной углехимической лаборатории при угольной шахте. Константы сорбции Ленгмюра рекомендуется определять предложенным способом по данным шахтных замеров истечения метана из скважин. Также определяют гранулометрический состав отбитого угля по данным ситового анализа.

Расчётные значения при оперативном прогнозе максимально допустимых нагрузок на забой являются более достоверными, по сравнению со значениями предварительного прогноза. Необходимость оперативного прогноза возникает при планировании очистных работ, например, на последующий месяц, либо на следующие за сегодняшним днём рабочие смены.

Суточный прогноз выполняется по данным газовой съёмки лавы в текущую ремонтную смену. Необходимо знать скорость вентиляционного потока воздуха концентрацию метана в воздушной струе, перемещаемой вдоль лавы. Как показывают результаты предыдущих исследований по

использованию методики [84, 110, 111], на основе данных газовой съемки в ремонтную смену разработаны методики, по которым можно определить газопроницаемость угля в очистном забое, а также относительный массообмен вентиляционной струи с выработанным пространством через механизированную крепь в лаве.

Накопленные в фундаментальной науке знания позволяют решить задачу прогноза газообильности очистного забоя, опираясь на современные средства компьютерного моделирования и системы мониторинга [112].

В методике прогноза газообильности очистного забоя, используются фундаментальные физические законы массопереноса, записанные в дифференциальных уравнениях в частных производных, которые учитывают:

- закон сохранения массы метана при его фильтрации и уравнение Ленгмюра, которое описывает сорбцию и десорбцию метана в трещинном и поровом пространствах угля;
- зависимость газопроницаемости угля от величины горного давления;
- закон Дарси, описывающий процесс массопереноса под действием градиента давления;
- пластовое давление метана.

Оперативный прогноз газообильности, в отличие от эмпирического, опирается на физические законы, учитывающие свойства и состояние углепородного массива в данный момент времени.

Для выполнения моделирования процесса массопереноса, последующей обработке и анализе данных эксперимента и вычислений необходима современная вычислительная техника.

Рассмотренная методика расчета обеспечивает прогнозирование безопасных предельно допустимых нагрузок на забой по газовому фактору при заданных исходных данных в виде физических свойств угольного массива и технологических параметров используемой системы разработки. При использовании системы разработки длинными столбами по простиранию в границах выемочного участка отметим следующие источники метана:

1. Грудь очистного забоя, вдоль которого перемещается очистной комбайн, который, в свою очередь, непрерывно обнажает поверхность угольного пласта, через которую происходит фильтрация метана из неразгруженного от горного давления участка массива с естественным пластовым давлением к поверхности обнажения из-за градиента давления;

2. Породы кровли и почвы в зоне подпирания их домкратами, а также в свежеобнажённых зонах;

3. Отбитый уголь, транспортируемый лавным конвейером по направлению к откаточному штреку;

4. Выработанное пространство за механизированной крепью.

Реализация методики предусматривает следующие шаги:

1. Лабораторные исследования, согласно которым по стандартным методикам определяют такие свойства угля, как объемная масса, газоносность, зольность, пористость угольного массива и вмещающих пород, параметры сорбции Ленгмюра. Если константы сорбции известны, то можно вычислить в первом приближении пластовое давление метана по изотерме Ленгмюра.

2. Шахтные исследования, предусматривающие определение пластового давления прямым методом [104].

3. Необходимо осуществить газовую съемку лавы в ремонтную смену, в которой предусмотрено измерение скорости вентиляционного потока вдоль лавы, концентрации метана в струе и последующее вычисление на основе этих данных:

3.1. Метанопритоков из выработанного пространства через крепь по методике, описанной в работах [108, 111].

3.2. Газопроницаемости угля в очистном забое согласно методике, описанной в [84, 110].

4. Иметь в распоряжении технологические параметры системы разработки и очистного оборудования для действующих или проектируемых участков, такие как: мощность пласта, ширина «стружки» очистного комбайна, сечение и длину лавы, скорость движения комбайна на холостом

ходу, скорость при перемещении комбайна вдоль лавы при выемке, скорость движения лавного конвейера, коэффициент надежности комбайна, гранулометрический состав отбитого угля, длительность концевых операций комбайна.

Полученных данных достаточно для того, чтобы произвести расчет безопасной, предельно допустимой нагрузки на забой. Необходимо соблюдать требование безопасности, согласно которому концентрация метана в исходящей вентиляционной струе не может превышать 1%.

Газовая съемка лавы в ремонтную смену, методика которой в подробностях описана в работе [113, 107], включена в шахтные исследования. Результаты измерения значений концентрации метана и средней скорости движения вентиляционного потока, перемещаемого вдоль очистного забоя, обеспечивает получение экспериментальных зависимостей, достаточных для расчёта перетоков вентиляционного воздушного потока струи и метана в выработанное пространство через крепь.

Кроме того, используя метод решения теоретической задачи массопереноса на основе уравнения (1.1), определяют газопроницаемость угольного пласта в очистном забое по результатам шахтных измерений истечения метана из коротких скважин [79, 96].

С практической точки зрения большой интерес представляют работы по измерению пластового давления метана в коротких экспериментальных скважинах, пробуренных непосредственно в угольный пласт. Методика проведения работ описана в [104]. Прямой метод определения пластового давления в шахтных условиях является достаточно трудозатратным, поэтому при отсутствии шахтных испытаний пластовое давление метана в первом приближении можно вычислить по изотерме Ленгмюра при известном значении газоносности, полученным в лабораторных условиях.

4.1.1 Предварительный прогноз газообильности

Предварительный прогноз допустимых нагрузок осуществляется в технических службах АО «СУЭК-Кузбасс» на стадии долгосрочного планирования очистных работ.

В случае предварительного прогноза отсутствуют текущие данные по газовым съемкам лавы и результаты заблаговременной или пластовой дегазации. Поэтому предполагается использование результатов работы лавы-аналога.

При проектировании новых выемочных участков на действующих или перспективных угольных шахтах существует необходимость технико-экономической оптимизации технологических параметров системы разработки с целью снижения себестоимости добычи угля. К управляемым факторам относятся:

- длина лавы, от которой зависит объем вспомогательных работ;
- газоносность угольного пласта, подвергаемого дегазации;
- производительность очистного комбайна;
- минимальное поперечное сечение в лаве;
- скорость передвижения конвейера в лаве;
- гранулометрический состав отбитого угля и др.

Конечный результат предварительного прогноза газообильности сводится к определению притоков метана в вентиляционную струю, и создание условий, удовлетворяющих нормам безопасности по газовому фактору. При этом самым ответственным фактором экономической эффективности является обеспечение условий достижения максимальной нагрузки на очистной забой.

4.1.2 Оперативный прогноз газообильности

Оперативный прогноз газообильности забоя и допустимых нагрузок осуществляется в техническом отделе шахты. При оперативном прогнозе нагрузок на очистной забой в пределах очередной рабочей смены следует использовать данные по газовой съемке лавы в предыдущую ремонтную

смену. Оперативное прогнозирование допустимых нагрузок осуществляется персоналом технического отдела шахты по специальной компьютерной программе. При существенном изменении газовой обстановки и горно-геологических условий сотрудники шахты могут регулировать производительность работ по добыче угля на добычном участке в направлении повышения или снижения объёмов добычи.

4.1.3 Расчетная модель

На рисунке 4.1 схематично изображён очистной забой, в котором отражены все источники выделения метана, а именно [16, 107]:

- очистной забой (на основании закона фильтрации, учитывая эффект десорбции метана из угля- Q_1);
- породы кровли и почвы (над крепью и под ней – Q_2 и Q_3 , а также в местах свежего обнажения поверхностей при движении очистного комбайна – Q_{22} и Q_{33});
- отбитый уголь (учитывая весь свободный газ, находившийся под давлением в поровом пространстве) – Q_4 (на рисунке не отображён);

Если допустить, что поток метана из лавы является плоскопараллельным и установить, что при скорости движения комбайна v и его расположении на концевом участке лавы длиной L , суммарный метаноприток в выработку из обнаженной поверхности лавы мощностью m определяется [16, 107]:

$$Q_1(v) = \int_0^L 60 \cdot m \cdot q_1(0, \frac{L-x}{v}) dx, \text{ м}^3/\text{мин} . \quad (4.1)$$

По аналогичным представлениям приведём формулы расчета притока метана из пород кровли Q_2 и почвы Q_3 , которые обнажаются при отбойке угля комбайном [107]:

$$Q_2(v) = \int_0^L 60 \cdot \Delta h \cdot q_2(0, \frac{L-z}{v}) dz ; \quad (4.2)$$

$$Q_3(v) = \int_0^L 60 \cdot \Delta h \cdot q_3(0, \frac{L-z}{v}) dz , \quad (4.3)$$

где Δh – ширина захвата (заходки) комбайна, м;

Метан может поступать в очистной забой также из мест контакта механизированной крепи с породами почвы и кровли. Эти источники практически не отличаются от тех, которые рассчитываются формулами (4.2) и (4.3) с разницей лишь во времени действия этих источников на момент отбойки угля комбайном $(L-y)/v$, временем L/v одного захвата и временем t_{nep} , необходимым на подготовку комбайна к обратному движению [16, 107]. Следовательно, расчетные формулы принимают вид:

$$Q_{22} = \int_0^L 60 \cdot \Delta h \cdot q_2 \left(0, \frac{L-y}{v} + \frac{L}{v} + t_{nep} \right) dy; \quad (4.4)$$

$$Q_{33} = \int_0^L 60 \cdot \Delta h \cdot q_3 \left(0, \frac{L-y}{v} + \frac{L}{v} + t_{nep} \right) dy. \quad (4.5)$$

В модели принимаем истинное пластовое давление равным во всех вышеперечисленных случаях.

Отбитый уголь является еще одним источником выделения метана. Гранулометрический состав известен по результатам ситового анализа фракций угля на выходах из шахты и лавы с учетом размеров приемного окна дробилки в откаточном штреке. Среднее поровое давление метана на отбиваемом комбайном участке угля определяется усреднением давления метана в угольном пласте на ширине Δh захвата комбайна. Усреднённое пластовое давление в момент времени t при прохождении комбайном выемочного участка определяется интегрированием [107]

$$P_{cp}(t) = \frac{\int_0^{\Delta h} P(x,t) dx}{\Delta h}. \quad (4.6)$$

Таким образом, полный метаноприток, поступающий в выработку из всех рассмотренных источников, составляет [107]

$$Q_{\Sigma}(v) = Q_1(v) + Q_2(v) + Q_{22}(v) + Q_3(v) + Q_{33}(v) + Q_4(v). \quad (4.7)$$

Уравнение (4.7) составляет основу предварительного и оперативного прогноза газообильности очистного забоя в условиях интенсивной отработки угольных пластов [16, 110]. Очевидно, что приток метана в сумме со всех его источников будет зависеть от скорости v передвижения комбайна в процессе очистки. Однако предельно допустимая скорость очистного комбайна ограничивается предельной концентрацией метана в исходящей струе, не превышающей 1%. Поэтому, искомая скорость находится путём решения нелинейного уравнения [107]:

$$\Sigma Q(v)_i = Q_{CH_4} \quad (4.8)$$

$Q(v)_i$ – источники метана (забой, кровля, почва и отбитый уголь), м³/с;

Q_{CH_4} – концентрация метана в исходящей вентиляционной струе, учитывая результаты газовой съёмки во время ремонтной смены, м³/мин. При предварительном или оперативном прогнозе газообильности подземных горных выработок, не относящихся к очистному забою, базовое уравнение (1.1) остается в силе.

Суточная производительность добычи при рабочем комбайне, учитывая коэффициент $K_{исп}$ его использования во времени составит [107]

$$A = \frac{K_{исп} \cdot 24 \cdot 3600 \cdot \rho_y \cdot m \cdot \Delta h \cdot v}{1000}, \text{ т/сут.} \quad (4.9)$$

где ρ_y – объемная масса угля, кг/м³;

Δh – ширина заходки комбайна, м;

v – скорость перемещения комбайна в процессе отбойки угля, м/с.

Принимая во внимание, что в соответствии с правилами безопасности предельная скорость воздуха при проветривании очистного забоя должна составлять $V_{\max} = 4$ м/с. Отсюда, если сечение выработки = $S_{оч}$, то предельно допустимый расход воздуха составит [107]

$$Q_{оч \max} = S_{оч} \cdot V_{\max} \quad (4.10)$$

Допустимый метаноприток в воздушную струю составляет

$$Q_{CH_4} = 60 C_{кр} Q_{оч \max} \pm \Delta Q \quad \text{м}^3/\text{мин}, \quad (4.11)$$

где $C_{кр}$ – предельно допустимая концентрация метана в исходящей струе по требованиям правил безопасности, $C_{кр}=0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$;

$\pm\Delta Q$ – приток (или отток) метана из выработанного пространства [107, 111].

Таким образом, подготовлен вычислительный алгоритм для предварительного и оперативного прогнозирования метанообильности выемочного участка и расчета максимально допустимой безопасной нагрузки на забой по фактору метанобезопасности [14, 16, 103, 114]. Предельно допустимая скорость движения комбайна по газовому фактору находится из решения уравнения (4.8), а затем, подставляя это значение в формулу (4.9), вычисляют нагрузку на очистной забой. Последовательность вычислительного алгоритма реализована на ЭВМ в программной оболочке Mathcad. Алгоритм и пример расчетов реализованы на программном обеспечении «MathCad-15» в соответствии с Приложением В.

Вклад данного диссертационного исследования в Методику расчёта нагрузок на очистной забой состоит в том, что автор данной работы уделил повышенное внимание определению параметров массопереноса метана, таких как пластовое давление метана и параметров сорбции Ленгмюра, значения которых используются в расчётах.

Новизна научно-технических предложений, разработанных в диссертации, выделена зелёным цветом на рисунке 4.2.

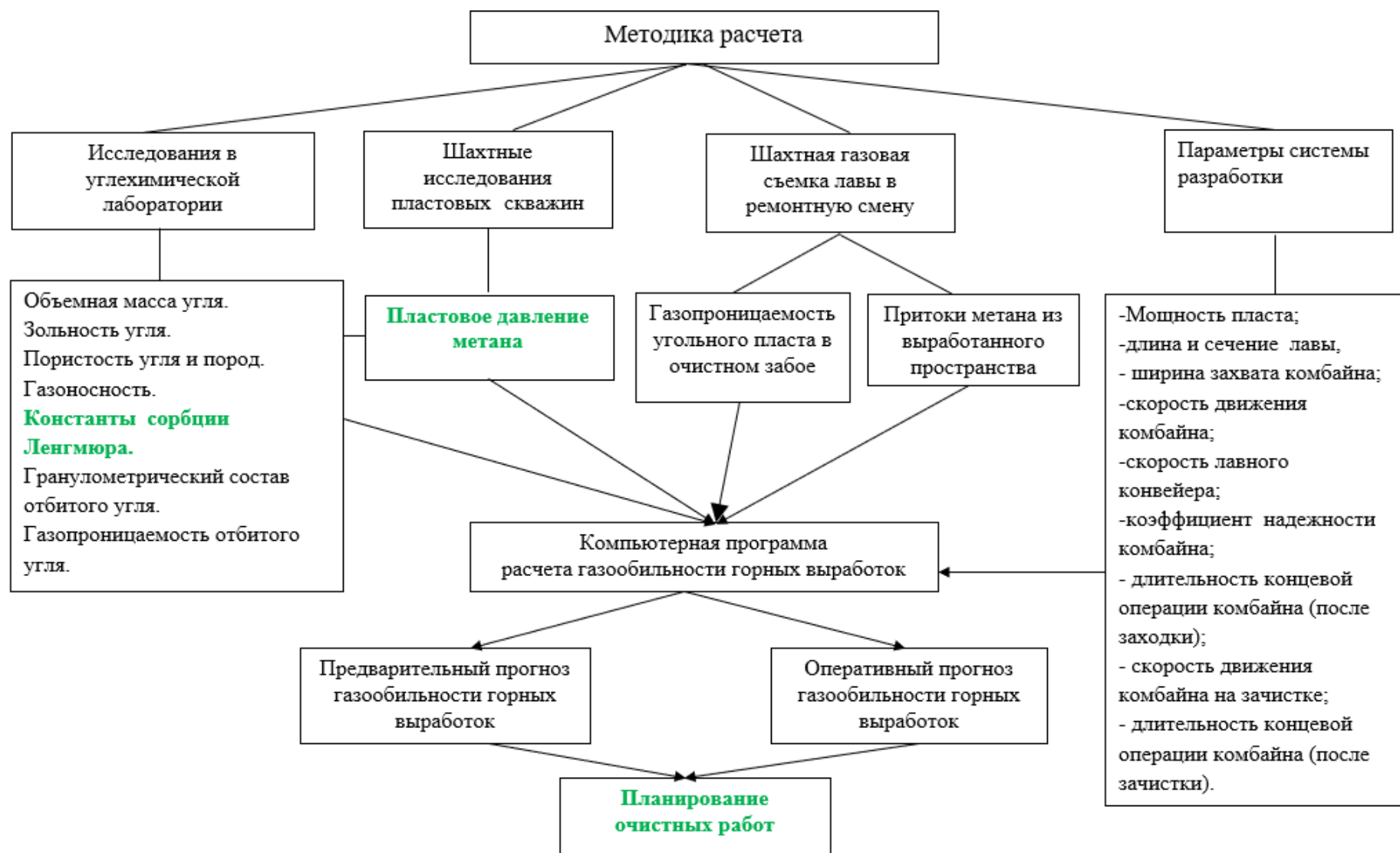


Рисунок 4.2 – Методика расчёта

4.1.4 Пример расчёта

Шахта им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Пласт «Болдыревский», лава 24-58. Для примера реализации продемонстрируем возможности методики прогноза газообильности и нагрузки на очистной забой. В таблицах 4.1, 4.2 и 4.3 отражены исходные данные, которые являются необходимыми для прогноза в рамках конкретных горно-геологических условий.

Таблица 4.1 – Физические свойства угленосного массива

№ п/п	Свойство, параметр		Значения параметров
1	Пористость	Угольный пласт, %	2,0
		Кровля, %	2,0
		Почва, %	2,0
2	Газопроницаемость	Угольный пласт, м ²	0,15·10 ⁻¹⁵
		Кровля, м ²	0,1·10 ⁻¹⁶
		Почва, м ²	0,1·10 ⁻¹⁶
		Отбитые фракции угля, м ²	0,625·10 ⁻²²
3	Константы сорбции изотермы Ленгмюра	параметр изотермы, Па ⁻¹	0,54·10 ⁻⁶
		максимальный объем метана в тонне угля, м ³ /т	33,12
4	Природная газоносность пласта, м ³ /т		20,7
5	Пластовое давление метана по изотерме Ленгмюра, Па		32·10 ⁵
6	Объемная масса угля, кг/м ³		1280
7	Зольность угля, м ³ /м ³		0,27

Таблица 4.2 – Горно-геологические условия

№ п/п	Технологические параметры	Значения
1	Мощность пласта, м	2,23
2	Длина лавы, м	240
3	Минимальное сечение очистной выработки, м ²	6,8
4	Концентрация метана в воздушном потоке в штреке на входе в очистной забой, %	0,05
5	Максимально допустимая концентрация метана в исходящей струе, %	1,0

6	Максимально допустимая скорость вентиляционного потока в лаве, м/с		4,0
7	Режим работы очистного забоя	Количество смен в сутках	4
		Длительность рабочей смены, час	6
		Длительность одной ремонтной смены, час	6
8	Параметры вентиляционного потока по результатам газовой съёмки в ремонтную смену [113]		-
8.1	Фактические перетоки вентиляционной струи через крепь в выработанное пространство, м ³ /м ³		-0.00204
8.2	Массовый отток или приток метана из лавы через крепь в выработанное пространство, кг/мин		- 1.277

Таблица 4.3 – Характеристики механизированного комплекса и комбайна фирмы «Joy»

№ п/п	Технологические параметры	Значения
1	Высота заходки комбайна, равная мощности пласта, м	2,23
2	Ширина заходки комбайна, м	0,8
3	Коэффициент безаварийной работы комбайна в течение рабочей смены (надежность)	0,95
4	Длительность концевой операции комбайна (после производительной заходки – перед операцией зачистки забоя), сек	300
5	Скорость обратного движения комбайна при зачистке перед очередным циклом заходки, м/мин	Равна скорости при заходке
6	Длительность концевой операции комбайна (после зачистки) перед очередным циклом заходки, сек	300
7	Гранулометрический состав угля на лавном конвейере	По результатам шахтных замеров
8	Скорость движения лавного конвейера, м/с	2,4

Расчет выполнен по программе расчёта на ЭВМ [115], при этом пример расчёта представлен в Приложении В, при условиях, отражённых в таблицах 4.1- 4.3.

Основные результаты расчета следующие:

1) Предельно допустимая безопасная производительность добычи составляет 12350 т/сут.

2) Абсолютная газообильность очистного забоя при данной нагрузке составляет 13,5 м³/мин.

Для сравнения результатов расчёта с фактическими производственными данными возьмём участок выемочного столба 24-58 шахты Кирова, который отрабатывался в апреле 2016 года. На рисунке 4.3 представлены показатели добычи, а на рисунке 4.4 представлены данные фактической газообильности при отработке того же участка.

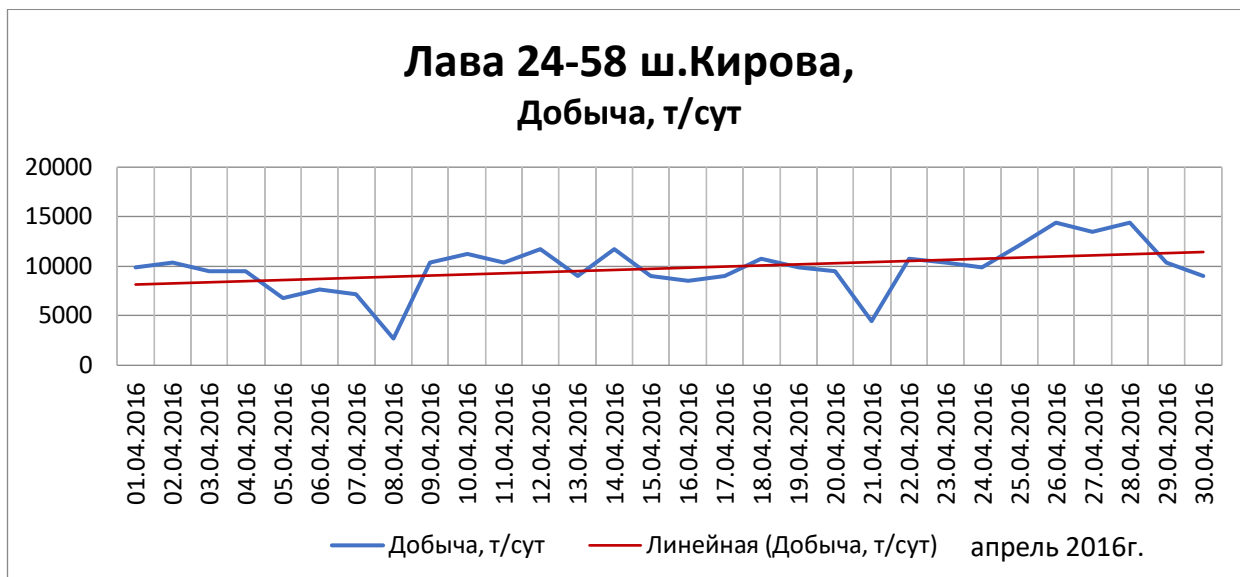


Рисунок 4.3 – Нагрузка на очистной забой

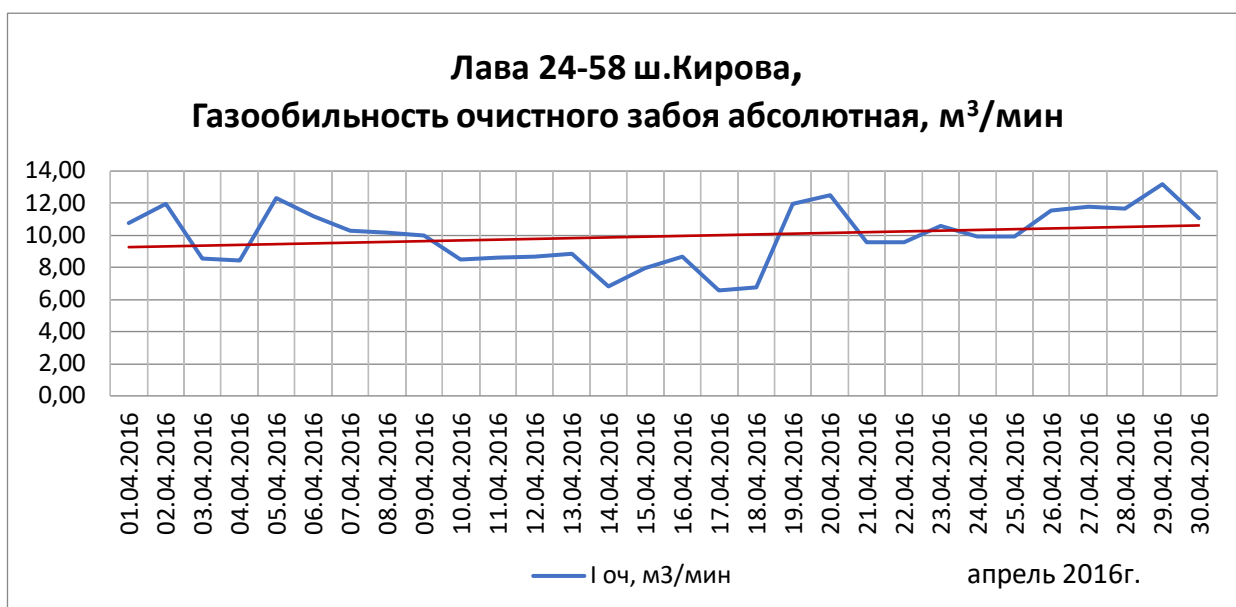


Рисунок 4.4 – Абсолютная газообильность очистного забоя

Стоит отметить, что особенностью программы расчёта [115] является то, что расчётное значение газообильности очистного забоя соответствует значению, при котором значение концентрации метана в исходящей вентиляционной струе будет составлять 1%. Допустимая норма аэрологической безопасности по концентрации метана в исходящей струе - менее 1%. Данные фактической газообильности отмечались при концентрации метана в исходящей струе 0,7% – 0,8%. Поэтому, учитывая некоторый запас нагрузок на забой для обеспечения безопасности горных работ, можно сделать вывод, что результаты расчёта имеют удовлетворительную сходимость с данными отдела ВТБ шахты им. С.М. Кирова в ретроспективе нагрузок на забой лавы 24-58 шахты С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

4.2 Влияние предельной сорбционной ёмкости на газообильность забоя и производительность отработки угля

Расчетная зависимость, показывающая притоки метана из очистного забоя, учитывающая сорбционные свойства угля в породном массиве и описывающая допустимую нагрузку на очистной забой представляет большой практический интерес. Газообильность очистного забоя определяется

притоками метана из следующих источников: обнажённой поверхности угольного пласта, пород кровли, почвы и бортов выработки по которой свежая вентиляционная струя поступает в выемочный участок, а также отбитого угля, транспортируемого лавным конвейером.

Практический интерес представляют исследования, направленные на установление зависимости каждого из вышеперечисленных факторов на величину притоков метана в лаву. В данной случае рассмотрим влияние параметров изотермы сорбции Ленгмюра на поступление метана из очистного забоя в лаву.

Предельная сорбционная ёмкость углей по метану (параметр Ленгмюра a) обычно зависит от давления, температуры угля, его влажности, состава органического материала, минерального содержания и степени метаморфизма угля [90].

Выполним расчет газообильности очистного забоя в середине ремонтной смены (спустя 3 часа после остановки очистного комбайна). Для выполнения расчетов необходимо знать физико-химические свойства угля, метана, а также параметры системы разработки. Ниже приведены основные параметры, используемые для расчета притоков метана. Результаты расчетов показаны на рисунке 1.

Таблица 4.4 – Основные параметры расчета притоков метана из очистного забоя

Параметр	Значение
Пористость угля, %	2
Динамическая вязкость газа, Пасек	$0,0108 \cdot 10^{-3}$
Максимальное газосодержание по изотерме Ленгмюра, $\text{м}^3/\text{т}$	Переменная
Постоянная изотермы сорбции, $1/\text{Па}$	$0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$
Газоносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$	Переменная
Пластовое давление, Па	$33 \cdot 10^5$
Длина очистного забоя, м	240
Длина зоны притоков метана, м	220
Мощность пласта, м	2,23
Проницаемость угля, м^2	$0,07 \cdot 10^{-15}$

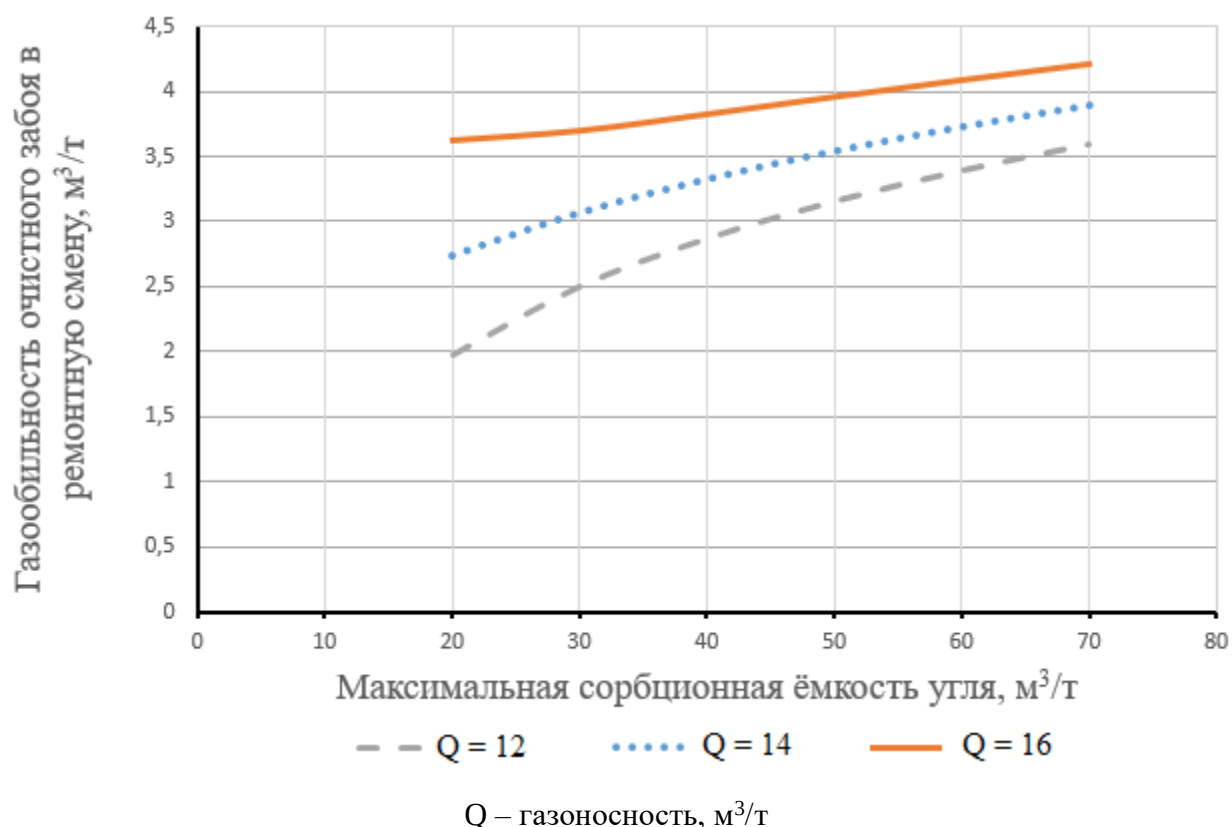


Рисунок 4.5 – Относительная газобильность очистного забоя в зависимости от параметра Ленгмюра a (максимальная сорбционная ёмкость)

На основе программы [115] выполнены также расчеты, отражающие влияние константы Ленгмюра a на максимально допустимую величину нагрузки на очистной забой при прочих равных условиях. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

Таблица 4.5 – Основные параметры расчета

Параметр Ленгмюра b , Па^{-1}	0,207·10 ⁻⁶						
Параметр Ленгмюра a , $\text{м}^3/\text{т}$	20	30	40	50	60	65	70
Газоносность, $\text{м}^3/\text{т}$	14						
Пластовое давление, бар	33						
Нагрузка на очистной забой, т	16000	15000	14290	13760	13340	13160	13000

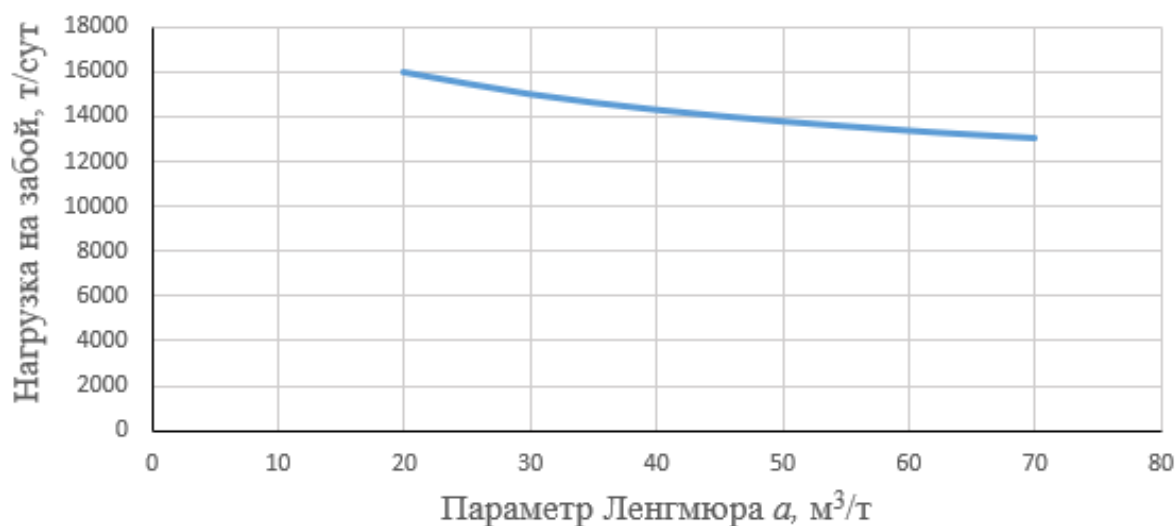


Рисунок 4.6 – Зависимость нагрузки на забой от параметра Ленгмюра a

Как свидетельствуют результаты расчетов, при увеличении максимальной сорбционной ёмкости угля, максимально допустимая производительность отработки будет уменьшаться, что объясняется увеличением содержания газа в угле при определённом пластовом давлении.

Полученные результаты расчётов учитывают исходные производственные данные работы очистного забоя, содержащиеся в проектно-технической документации технического отдела шахты; физические свойства углепородного массива и основные законы массопереноса метана, вследствие чего обеспечивается достоверный прогноз важных производственных показателей — метанообильности очистного забоя и предельно допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору.

4.3 Сравнение результатов прогноза газообильности, полученных при использовании в расчётах параметров сорбции Ленгмюра, определённых по результатам лабораторных и натурных испытаний.

По результатам измерений пластового давления непосредственно в угольном пласте и временной зависимости дебита метана, были получены значения параметров сорбции Ленгмюра для угля в его исходном состоянии и

после гидрообработки. При этом, параметры массопереноса метана, полученные на основе натурных испытаний составляют:

Пластовое давление $P = 32$ бар;

Проницаемость угольного пласта (в исходном состоянии пласта) $k = 0,04$ мД;

Параметры сорбции Ленгмюра:

сорбционная емкость угля a_1 (после гидровоздействия) = $24,1 \text{ м}^3/\text{т}$;

коэффициент сорбции Ленгмюра $b_1 = 0,19 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$.

При таких значениях пластового давления и константах сорбции расчётное значение предельно допустимой безопасной нагрузки на забой составляет 15,86 тыс.т/сут при абсолютной газообильности в $7,9 \text{ м}^3/\text{мин}$. При этом нагрузка на забой на основе применения в расчётах значений параметров сорбции, определённых в лабораторных условиях, составила 12350 т/сут. Представляет интерес сравнить результаты прогнозных расчётных значений с фактическими данными шахты им. С.М. Кирова. На рисунке представлены кривые абсолютной газообильности и фактической нагрузки на забой при отработке участка, находящегося в зоне влияния ГРП.

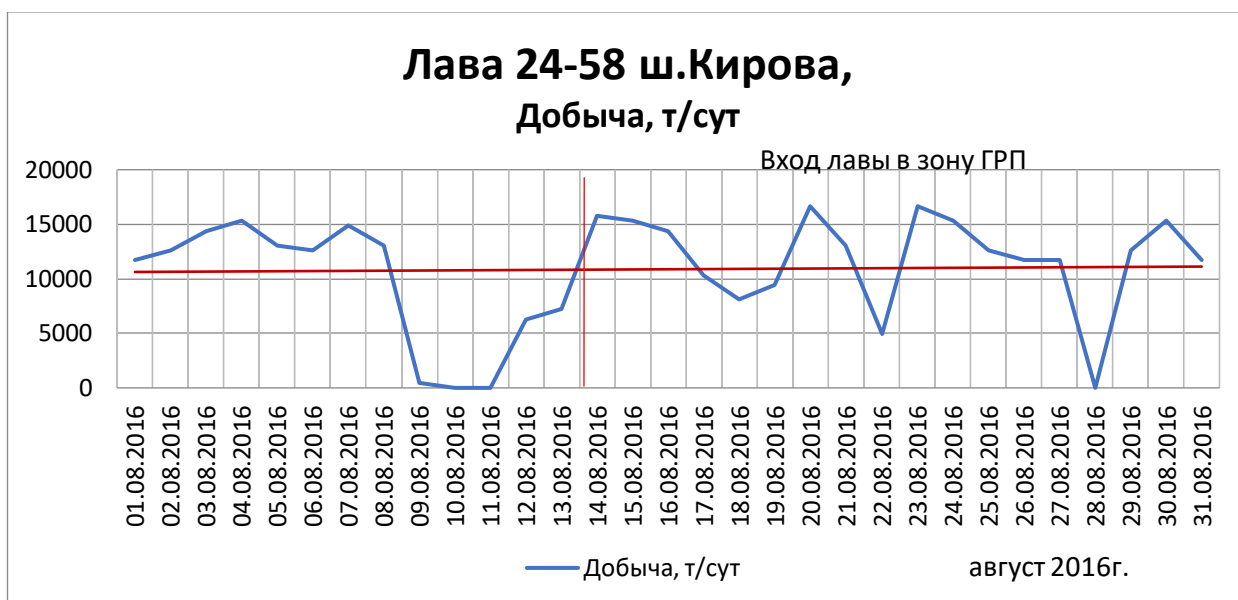


Рисунок 4.7 – Фактические значения нагрузки на забой

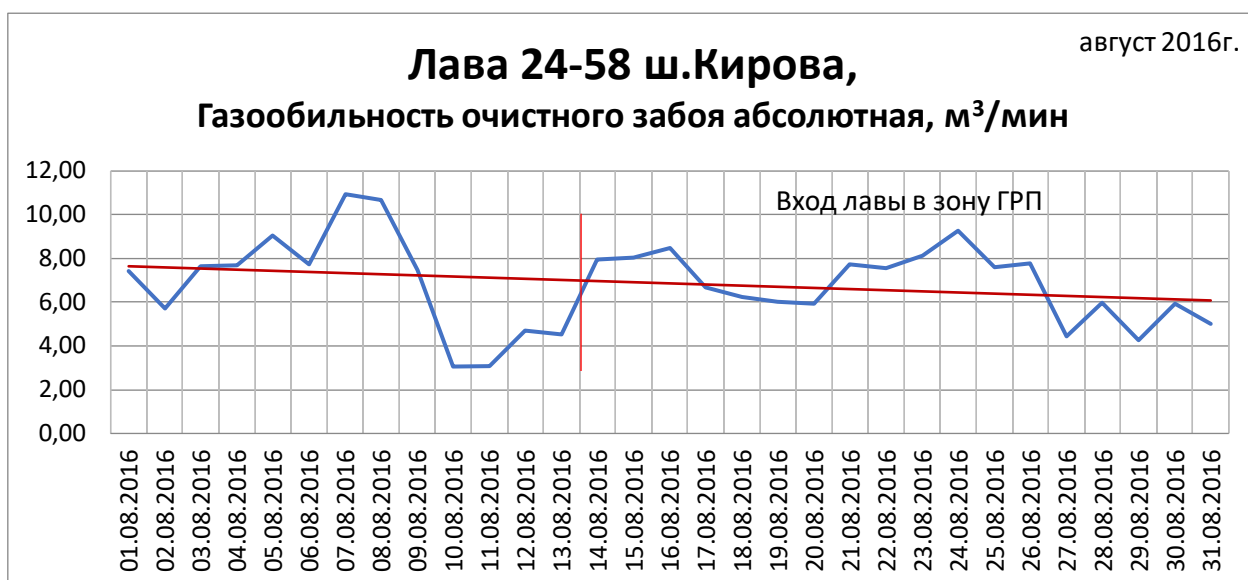


Рисунок 4.8 – Фактические значения абсолютной газообильности

Таблица 4.6 – Результаты прогноза газообильности по Методике расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору

	Лабораторный способ	Натурный способ до ГРП	Натурный способ после ГРП
Параметры сорбции Ленгмюра	$a=33,12 \text{ м}^3/\text{т}$ $b=5,376 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$	$a=30,5 \text{ м}^3/\text{т}$ $b=0,26 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$	$a=24,1 \text{ м}^3/\text{т}$ $b=0,19 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$
Абсолютная газообильность очистного забоя, м³/мин	13,5	13,2	7,9
Нагрузка на очистной забой, т/сут	12350	12680	15860

Исходя из полученных результатов можно утверждать, что при гидровоздействии на пласт определение параметров сорбции Ленгмюра следует осуществлять на основе натуральных испытаний, при этом полученные результаты будут отражать свойства углепородного массива как в исходном, так и во влажном состоянии. На основе полученной информации технический отдел шахты принимает обоснованные решения по планированию и корректировке нагрузок на очистной забой.

Выводы по главе

– Усовершенствована методика расчёта газообильности очистного забоя за счёт использования найденных экспериментальным путём значений пластового давления метана, газопроницаемости угольного пласта и его сорбционных параметров, полученных по результатам натурных испытаний. Результаты расчётов имеют удовлетворительную воспроизводимость с фактическими данными, полученными в результате отработки выемочного участка 24-58 шахты Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

– Выполнены расчёты предельно допустимой нагрузки на очистной забой по фактору газа и газообильности забоя с использованием параметров сорбции Ленгмюра, определённых лабораторным и шахтным путём. Выявлено, что использование в расчётах значений параметров сорбции угля, определённых натурным способом позволяет повысить достоверность прогноза.

– Доказано, что параметр Ленгмюра a (предельная сорбционная метаноёмкость) оказывает значительное влияние на газообильность очистного забоя и производительность отработки угля.

– Установлено, что в случае применения гидрообработки пласта, использование в расчётах значений параметров сорбции угля, определённых на основе натурных испытаний в шахтных условиях, повышается достоверность прогноза газообильности и предельно допустимой нагрузки на забой по газовому фактору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена задача теоретического и экспериментального обоснования и разработки нового способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта на основе результатов измерений параметров газовыделения непосредственно в углепородном массиве, что имеет важное значение для повышения достоверности прогноза газообильности очистного забоя и обеспечения эффективности и безопасности подземной разработки угольных месторождений.

Основные научные результаты и выводы по выполненным в диссертации исследованиям заключаются в следующем:

1. Проведён анализ современного состояния исследований в области определения сорбционных свойств углей. Установлено, что недостатки существующих лабораторных методов определения параметров сорбции Ленгмюра связаны с неизбежным различием структуры, свойств и состояния углепородного массива и извлекаемых из него образцов.

2. Обоснован новый подход к определению сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта, основанный на проведении экспериментальных исследований параметров газовыделения непосредственно в угольном массиве и использовании решения задачи процесса массопереноса метана.

3. Обоснованы оптимальные параметры лабораторной аппаратуры для определения сорбционных свойств образцов угля. Разработанная лабораторная установка реализована и прошла апробацию в угольной лаборатории шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

4. Разработан способ определения пластового давления метана и сорбционных параметров угольного пласта, техническим результатом которого является повышение достоверности и оперативности определения

пластового давления метана и сорбционных параметров угольного пласта в исходном и увлажнённом состояниях. Проведены натурные испытания способа в шахтных условиях, подтвердившие его эффективность при оценке свойств угольного массива.

5. Обоснованы эффективные параметры экспериментальной скважины, служащие для наиболее точного определения верхнего (P_v) и нижнего (P_n) пределов пластового давления.

6. Разработаны «Методика определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях», позволяющая регулярно и оперативно получать искомые параметры, а также «Методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки», описывающая подход к измерению пластового давления метана, определению коэффициента газопроницаемости и сорбционных свойств угольного пласта в его исходном и увлажнённом состояниях. Разработанные методики определения параметров массопереноса метана в лабораторных и натуральных условиях приняты к использованию на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

7. Усовершенствована методика расчёта максимально допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору, учитывающая определяемые непосредственно в угольном массиве параметры сорбции угля, а также уточнённое пластовое давления метана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Воробьёв Б.М. - Уголь мира/ Том 1. Глобальный аспект. М: 2007. – 309 с.
- 2 Родин Р. И., Плаксин М.С. Особенности повышения газопроницаемости угольных пластов. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, 2016. – №1. – С. 42-48.
- 3 BP Statistical Review of World Energy 2017 full report, p. 36 /Интернет-ресурс. Режим доступа: https://www.bp.com/content/dam/bp-country/en_gb/united-kingdom/pdf/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf
- 4 Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Артемьев В.Б., Логинов А.К. Опыт высокопроизводительной работы очистных забоев на метаноносных угольных пластах/ Уголь, 2009. – №10. – С. 3-6.
- 5 Новостной портал Уральского государственного горного университета. [Электронный-ресурс]. URL: <http://pressa.ursmu.ru/4499.html> (дата обращения: 30.05.2016)
- 6 Мельник В.В., Шулятьева Л.И. Обоснование параметров дегазации при отработке пластов высокопроизводительными очистными комплексами. – Горный информационно–аналитический бюллетень, 2010. – №1. – С. 171–176.
- 7 Логинов А.К. Развитие системы управления промышленной безопасности в угольной компании// Горный информационно–аналитический бюллетень, 2007. – №17. – Тематическое приложение «Безопасность угледобычи». – С. 48–58.
- 8 Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Обоснование допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору// М., Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2009», ИД ООО «Роликс», 2009. – С.151–159.

- 9 Puchcov L.A., Slastunov S.V., Karkashadze G.G., Kolilov K.S. Justification of Optimum Permitted Exploration of Working Coal Face Related to Coal Seam Gas Content// 0826 2008 International Coalbed Methane Symposium.
- 10 Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах/ М.: «Недра», 1977. – 248 с.
- 11 Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1988. – №3. – С. 3-23.
- 12 Полубаринова-Кочина П.Я. О неустановившейся фильтрации газа в угольном пласте// Прикладная математика и механика, 1953. – Т. 17. – №6. – С.735-738.
- 13 Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкости и газов в природных пластах/ М.: «Недра», 1984. – 211 с.
- 14 Сластиунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Аналитическая методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2013. – № 6. – С. 53–59.
- 15 Сластиунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В. Методика и результаты измерения пластового давления метана и сорбционных свойств угольного пласта// Газовая промышленность. - спец. вып. Метан угольных пластов, 2012 (672). – С. 48-49.
- 16 Сластиунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ермак Г.П., Никитин С.Г. Прогноз допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору. 2012г. Электронный ресурс. Режим доступа - http://www.rusnauka.com/28_NII_2012/Tecnic/13_117650.doc.htm
- 17 Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Василенко Т. А., Молчанов А. Н., Калугина Н. А. Эмиссия метана из природных угольных нано - и мезоструктур// Геотехническая механика. Вып.87: межвед. сб. науч. Трудов, 2010. – С. 108-113.

- 18 Колмаков В.А. Метановыделение и борьба с ним в шахтах/ М.: «Недра», 1981. – 134 с.
- 19 Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Том I. Анализ парадигмы/ Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 632 с.
- 20 Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах/ М.: Недра, 1981. – 335 с.
- 21 Айруни А.Т. Основы предварительной дегазации угольных пластов на больших глубинах/ М.: Недра, 1970. – 79 с.
- 22 Кричевский Р.М. О выделении метана из угольного массива в подготовительные выработки. // Бюллетень МакНИИ. – Макеевка: № 16, 1947. – С. 22–31.
- 23 Скляр Л.А., Лопатов О.А. Закономерность выделения метана из обнаженных поверхностей пласта в подготовительных выработках// Разработка месторождений полезных ископаемых. – Вып. 10. / Респ. межвед. сб-к. – Киев: Техніка, 1967. – С. 58–62.
- 24 Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде/ М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретич. лит-ры, 1947. – 244 с.
- 25 Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах/ М.: Недра, 1984. – 211 с.
- 26 Кричевский Р.М. О природе внезапных выделений газа с выбросом угля// Бюллетень МакНИИ, 1948. – № 18. – С. 3-8.
- 27 Полубаринова – Кочина П.Я. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. / Колл. монография под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. – М.: Наука, 1969. – 546 с.
- 28 Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения/ М.: Наука, 1978. – 122 с.
- 29 Васючков Ю.Ф. Физико-химические способы дегазации угольных пластов/ М.: Недра, 1986. – 255 с.

- 30 Бобин В.А. Разработка теоретических основ и методик расчета движения угля и газа при внезапных выбросах. Автореф. дисс. к.т.н. – М.: ИПКОН АН СССР, 1980. – 17 с.
- 31 Рыженко И.А. Математическая модель фильтрации метана в угольном пласте вокруг горной выработки. – В кн.: Внезапные выбросы на больших глубинах // Сб-к трудов Института геотехнич. мех. АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1979. – С. 24-33.
- 32 Кухарев Е.В., Андреев С.Ю., Лысенко В.Н. К оценке устойчивости краевой части пласта. – В кн.: Внезапные выбросы на больших глубинах / Сб-к трудов Института геотехнич. мех. АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1979. – С.20-24.
- 33 Круковская В.В. К расчету фильтрации газа в трещиновато-пористой неоднородной среде// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. – Вып. 51. – С. 257-265.
- 34 Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1999. – №5. – С. 13-18.
- 35 Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1988. – №6. – С. 47-55.
- 36 Садохин В.П., Жирнова Т.С., Кудряшова В.Д. Фильтрация метана в подготовительные выработки, проводимые по мощным угольным пластам/ В кн.: Борьба с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах. – Кемерово, 1973. – С. 5-23 (ВостНИИ).
- 37 Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии/ К.: Наук. Думка, 1981. – 284 с.
- 38 Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах/ М.: Недра, 1977. – 248 с.

- 39 Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугина Н.А., Фельдман Э.П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта// Журнал технической физики, 2007. – Т. 77. – вып. 4. – С. 65-74.
- 40 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, 2013. – №1. – С. 21-24.
- 41 Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М.: «Недра», 1977. – С. 13-14.
- 42 Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов/ М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 383 с.
- 43 Трубецкой К.Н., Рубан А.Д, Забурдяев В.С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах// Журнал «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых». Изд-во СО РАН, 2011. – № 4. – С. 76-85.
- 44 Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Макеевка; Донбасс: МакНИИ, 1989. – 319 с.
- 45 Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок, утвержденная приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному. Приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 № 680.
- 46 Фельдман Э.П., Василенко Т.А., Калугина Н.А. Истечение метана из угля в замкнутый резервуар: роль явлений диффузии и фильтрации// Физика и техника высоких давлений, 2006. – Т. 16. – № 2. – С. 99-114.
- 47 Пучков Л. А., Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт// Горный журнал, 2014. – № 5. – С. 12-16.

- 48 Баймухаметов С.К., Полчин А.И., Коликов К.С. Совершенствование управлением газовойделением шахт в Карагандинском бассейне// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Выпуск № S4. – 2008. – С. 337-340.
- 49 Патент РФ №2211334 от 27.08.2003. Способ прогноза газообильности выемочных участков угольных шахт. Авторы: Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Назаров Н.Ю., Рудаков В.А., Потапов П.В. Патентообладатель: Институт угля и углехимии СО РАН.
- 50 Бжицких Т.Г. Определение физических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород// Бжицких Т.Г., Санду С.Ф., Пулькина Н.Э. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 90 с.
- 51 Иванов М.К. Петрофизические методы исследования кернового материала/ Иванов М.К., Калмыков Г.А., Белохин В.С., Корост Д.В., Хамидуллин Р.А. Учебное пособие в 2-х книгах. Кн. 2: Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 113 с.
- 52 Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение/ Издательство «Недра», 1969 г. – 368 с.
- 53 Ian Gray. Mining Gassy Coals// 2012 Coal Operators' Conference The University of Wollongong. pp. 250 – 260.
- 54 Подильчук Ю.Н. К теории деформирования газонасыщенных пористых сред// Прикладная механика, 1976. – №12. – С.42–47.
- 55 Эттингер И.Л. Газоёмкость ископаемых углей/ М., 1966. – 223 с.
- 56 Мусин К.М., Абдуллин Т.Р. Комплексное исследование по профилю полноразмерного керна// Нефтяное хозяйство, 2012. – номер 9. – С. 52-54.
- 57 Nilabjendu Ghosh. Permeability of indian coal/ A report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology In Mining Engineering. Department of Mining Engineering of National Institute of Technology, Rourkela-769008. – 2011. – 47 p.

- 58 C.Özgen Karacan. Reservoir rock properties of coal measure strata of the Lower Monongahela Group, Greene County (Southwestern Pennsylvania), from methane control and production perspectives// International Journal of Coal Geology, 2009. – Mar; 78(1), pp. 47-64.
- 59 Рощин П.В., Коробов Г.Ю. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов/ Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017. – 61 с.
- 60 Ютяев Е.П., Садов А.П., Мешков А.А., Хаутиев А.М., Тайлаков О.В., Уткаев Е.А. Оценка фильтрационных свойств угля в гидродинамических испытаниях дегазационных пластовых скважин// Уголь, 2017. – Номер 11. – С. 24-29.
- 61 Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А. Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов/ М.: «Недра», 1978. – 318 с.
- 62 Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород/ М.: «Недра», 1985. – 310 с.
- 63 Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А. М-Б. Физические уравнения остаточных деформаций в процессе циклической сорбционной усадки угля // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. – №6. – С.23-29.
- 64 Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально прикладные методы решения проблем метана угольных пластов/ М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. – 519 с.
- 65 Nema Siriwardane, Igor Haljasmaa et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods. International Journal of Coal Geology, Volume 77, Issues 1–2 2009, pp. 109–118.
- 66 Назаров Л.А., Назарова Л.А. Определение фильтрационных свойств и напряжений в угольном пласте на основе решения обратной задачи // ФТПРПИ, 2000. – №2. С. 15-22.
- 67 Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения/ М.: Наука, 1978. – 122 с.

- 68 Кузнецов С.В. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения/ М.: Наука, 1978. – 124 с.
- 69 Смыслов А.И. К оценке фильтрационных свойств угольных пластов// ГИАБ №12 (т. 11), 2009. – 293-296 с.
- 70 Айруни А.Т. Основы предварительной дегазации угольных пластов на больших глубинах/ М.: Наука, 1970. – 79 с.
- 71 Лидин Г.Д., Айруни А.Т., Бессонов Ю.Н., Смирнов Н.С. Исследование закономерностей дегазации разрабатываемых, подрабатываемых и надрабатываемых угольных пластов/ М., 1968. – 84 с.
- 72 ГОСТ 26450_2-85 Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
- 73 Тайлаков О.В. Совершенствование метода определения газоносности угля для повышения эффективности дегазации угольных пластов // О.В. Тайлаков, А.Н. Кормин, А.И. Смыслов. Газовая промышленность. - М.: ООО «Газоил пресс», 2012. – № 11 (682). – С. 46-47.
- 74 Эттингер И. Л. Газоёмкость ископаемых углей/ М.: Недра. 1966. – 223 с.
- 75 Lei Zhang. Study of coal sorption characteristics and gas drainage in hard-to-drain seams. Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, 2012. <http://ro.uow.edu.au/theses/3834>
- 76 Эттингер И. Л. Свойства углей, влияющие на безопасность труда в шахтах/ М.: Госгортехиздат, 1961. — 95 с.
- 77 Патент РФ № 2590981 от 10.07.2016. Способ исследования сорбционных свойств углей. Авторы: Натура В. Г., Сиротский Р. Г., Ожогина Т. В. Патентообладатель: ЗАО «Метан Кузбасса».
- 78 Н.В. Журавлева, Р.Р. Потокина, З.Р. Исмагилов. Изучение газоносности углей усинского месторождения печорского угольного бассейна прямым и косвенным методами// ГИАБ №3, 2015. – С. 130-134.

- 79 Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Пащенко П.Н. Результаты определения пластового давления, газопроницаемости и параметров сорбции угольного пласта по результатам шахтных измерений истечения метана из коротких скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016. – № 9. – С. 259-264.
- 80 M. Liu, H. Mitri, J. Wei, W. Xiao and Z. Wen, Evaluation of Outburst Potential at Sihe Coal Mine, China, 11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011, 348-354.
- 81 Peter J. Crosdale, Tim A. Moore, Tennille E. Mares. Influence of moisture content and temperature on methane adsorption isotherm analysis for coals from a low-rank, biogenically-sourced gas reservoir. International Journal of Coal Geology Volume 76, Issues 1–2, 2 October 2008, Pp. 166–174.
- 82 Siahaan, Boni B.S.N., Study of methane gas migration in coal sorption tests, Doctor of Philosophy thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1990. <http://ro.uow.edu.au/theses/866>.
- 83 Day, S, Sakurovs, R, Weir, S, 2008. Supercritical gas sorption on moist coals. International Journal of Coal Geology, 74(3-4), pp. 203-214.
- 84 Каркашадзе Г. Г., Семькин Ю. А., Лупий М. Г. Методика расчета притоков метана из очистного забоя по результатам газовой съемки в ремонтную смену// ГИАБ, 2014. – №7. – С. 206-211.
- 85 Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов/ Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – С.70.
- 86 Пащенко П.Н. О влиянии параметров сорбции Ленгмюра на газообильность очистного забоя и производительность отработки угля// ГИАБ, 2017. – №9. – С. 225-229.
- 87 R. Florentin, N. Aziz, D. Black, L. Nghiem. Sorption Characteristic of Coal, Particle Size, Gas Type and Time. Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2009. – Pp. 208-216.

- 88 Zhang, L., Aziz, N. I., Ren, T., Nemcik, J. and Tu, S. (2014). Influence of coal particle size on coal adsorption and desorption characteristics. Archives of Mining Sciences, 59 (3). Pp. 807-820.
- 89 Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Физический механизм и параметры сорбции метана в угольных пластах. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2009. – Т.11. – Номер 12. – С. 414-420.
- 90 M. Pillalamarry, S. Harpalani, Sh. Liu. Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoirs. International Journal of Coal Geology 86 (2011). – Pp. 342–348.
- 91 Mirosław Wierzbicki. Changes in the sorption/diffusion kinetics of a coal-methane system caused by different temperatures and pressures. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. – Tom 29. – 2013. Zeszyt 4. Pp. 155-168.
- 92 L. Zhang, N. Aziz, T. Ren and Z. Wang, Influence of Temperature on the Gas Content of Coal and Sorption Modelling, 11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011. – Pp. 269-276.
- 93 Пашенков П. Н. Нагрузка на очистной забой по газовому фактору в зависимости от влажности угольного пласта// ГИАБ, 2017. – №1. – С. 396–403.
- 94 Хаутиев А. М.-Б. Обоснование и разработка метода дегазации угольного пласта на основе циклического газодинамического воздействия. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук по спец. 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Москва, НИТУ «МИСиС», 2015 г.
- 95 Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В. // Методика и результаты измерения пластового давления метана и сорбционных свойств угольного пласта. Газовая промышленность. - спец. вып. Метан угольных пластов (672/2012). – С. 48-49.

- 96 Патент РФ на изобретение №2630343 от 07.09.2017. Способ определения пластового давления метана и сорбционных параметров угольного пласта. Авторы: Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Мазаник Е.В., Сластунов С.В., Пащенко П.Н. Патентообладатель: ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС».
- 97 Калиев С.Г. Управление газовой выделением на угольных шахтах/ Калиев С.Г., Преображенская Е.И., Садчиков В.А. и др./М.: «Недра», 1980. – 221 с.
- 98 Мазаник Е.В., Позинзов А.В., Сластунов С.В., Пащенко П.Н. Шахтные исследования усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта в целях его эффективной предварительной дегазации// ГИАБ, 2018. – №1 (Спецвыпуск №3). – С. 16 – 22.
- 99 Каркашадзе Г.Г., Волков М.А., Ермак Г.П. Совершенствование методики расчета нагрузки на очистной забой на основе шахтных измерений пластового давления и параметров массопереноса метана в угольных пластах// ГИАБ 2011, ОВ № 8 «Экология и метанобезопасность». – С. 169-175.
- 100 Волков М.А. Обоснование допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору в условиях шахты «Котинская» ОАО «СУЭК-Кузбасс»/ Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Перспектива развития Прокопьевско-Киселёвского угольного района как составная часть комплексного инновационного плана моногородов». – Прокопьевск: Изд-во филиала ГУ КузГТУ, 2001. – С. 32-35.
- 101 Каркашадзе Г.Г., Ермак Г.П., Ютяев Е.П.. Безопасная отработка газоносных угольных пластов по газовому фактору на основе учета свойств угленосного массива и параметров системы разработки// ГИАБ, 2014. – №5. – С. 152-156.
- 102 Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ютяев Е.П., Семькин Ю.А. Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по результатам газовой съемки в ремонтную смену с учетом физических свойств пласта и технологических параметров системы разработки// Сборник трудов XV международной научно-практической конференции «Энергетическая

безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». Издательство: ФИЦ УУХ СО РАН (Кемерово), 2013. – С. 318-321.

- 103 Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Семькин Ю.А. Методика расчёта притоков метана из отбитого угля в лаве в процессе очистных работ// ГИАБ, 2014. – №7. – С.18-22.
- 104 Пащенко П.Н., Гаврилов В.И. Методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки// ГИАБ, 2018. – №1 (Спецвыпуск №3). – С. 30 – 37.
- 105 Пащенко П.Н. Способ определения параметров изотермы сорбции Ленгмюра и газопроницаемости дисперсных фракций угля// ГИАБ, 2018. – №2. – С.120-128. (DOI: 10.25018/0236-1493-2018-3-0-120-128).
- 106 Мазаник Е.В. Совершенствование технологии дегазации угольных шахт на основе заблаговременной поэтапной скважинной подготовки шахтных полей. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010 г.
- 107 Лупий М.Г. Обоснование технологии комплексной дегазации выемочных участков при высокоинтенсивной разработке газоносных угольных пластов. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010.
- 108 Иванов Ю.М. Управление газодинамическим состоянием массива горных пород для безопасной ресурсосберегающей подземной разработки газоносных угольных пластов. Автореферат дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2012. – 21 с.
- 109 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, МГГУ, 2012. – 23 с.

- 110 Семыкин Ю.А. Повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газовыделения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, НИТУ «МИСиС», 2016. – 148 с.
- 111 Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М., Ермак Г.П. Определение концентрации метана в выработанном пространстве по результатам съемки параметров вентиляционного потока вдоль лавы// ГИАБ – 2014. – № 12. С. 256-262.
- 112 Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Предварительный и оперативный прогноз допустимых нагрузок на очистной забой при интенсивной отработке газоносных угольных пластов// Уголь. – 2015. – № 3. – С. 30-35.
- 113 Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М., Ермак Г.П. Определение концентрации метана в выработанном пространстве по результатам съемки параметров вентиляционного потока вдоль лавы// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2012. – № 4. Депонированная рукопись. Спр. № 880/04-12 от 23 января 2012 г. (12 стр.).
- 114 Каркашадзе Г. Г., Мазаник Е. В., Семыкин Ю. А. Совершенствование расчета нагрузки на очистной забой по газовому фактору на основе производственных испытаний и средств компьютерного моделирования// Сб. научн. трудов. Выпуск 2. «Пути повышения эффективного и безопасного освоения пластовых месторождений подземным способом». Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр» (Библиотека горного инженера), 2014. – С. 308-314.
- 115 Программа расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой угольной шахты по газовому фактору. Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ №2015617827 от 23.07.2015.
Правообладатель: ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС». Авторы: Каркашадзе
Г. Г., Сластунов С. В., Коликов К. С.

- 116 Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Семькин Ю.А. Методика расчёта
притоков метана из отбитого угля в лаве в процессе очистных работ//
Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. – №6. – С. 18-
22.

Приложение А

Согласовано:

Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСиС»



«__» _____ 2017 г.

Утверждаю:

1-й зам. генерального директора-
Технический директор
АО «СУЭК-Кузбасс»



«__» _____ 2017 г.

Методика

определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях

Руководитель НИР
проф., д-р техн. наук


Сластунов С.В.

Ответственный разработчик,
аспирант


Пащенко П.Н.

Согласовано:

Директор по аэрологической
безопасности подземных горных работ
АО «СУЭК-Кузбасс», канд. техн. наук


Мазаник Е.В.

Ленинск-Кузнецкий - 2017 г.

Разработчики:

от Горного института НГТУ "МПСиС": проф., д.т.н. Сластунов С.В., д.т.н.
Коликов К.С., аспирант Пашенков П.Н.

от АО «СУЭК-Кузбасс»: к.т.н. Хаутиев А.М-Б.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Область применения.....	4
2 Определение объекта исследования	5
3 Необходимое оборудование и вспомогательные материалы.....	5
3.1 Оборудование.....	5
3.2 Вспомогательные материалы	5
4 Описание и принцип действия лабораторного оборудования	5
4.1 Подготовка оборудования и материалов.....	8
5 Определение количества газа, сорбированного в процессе нагружения штока	8
Расчётная часть для обоснования параметров установки	9
6 Пример реализации. Результаты эксперимента	11
7 Обработка результатов измерений	11
Приложение 1	13
Список использованных источников.....	15

1 Область применения

Методика определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях (далее - Методика) предназначена для определения объема сорбируемого метана и последующего построения изотерм сорбции Ленгмюра с искомыми параметрами сорбции.

Задачей Методики является определение параметров массопереноса метана для научно-технических задач пластовой дегазации угольных пластов и промышленного извлечения метана.

Методика предназначена для персонала предприятий, занимающегося вопросами дегазации угольных шахт, его проектированием и оценкой фактического коэффициента дегазации для прогноза газообильности лавы и экологией угольной промышленности.

Методика позволяет также в значительной степени обезопасить ведение горных работ на основании использования результатов для уточнения расчётов газообильности лавы при отработке угольного пласта и планировании безопасных максимальных нагрузок на очистной забой, а также прогноза и предупреждения внезапных выбросов угля и газа.

Таким образом, в Методике представлен способ определения параметров сорбции угля для выполнения исследований в лабораторных условиях.

2 Определение объекта исследования

Получение корректных данных о параметрах сорбции обеспечивается периодическим отбором образцов угля по мере продвижения горных работ и проведением исследований этих образцов.

3 Необходимое оборудование и вспомогательные материалы

Для проведения лабораторных работ используется:

3.1 Оборудование

- герметичный цилиндр, для которого необходимо учитывать следующие параметры: а) длина хода штока, мм; б) диаметр гильзы (цилиндра), мм; в) рабочее давление, МПа.

- герметичный контейнер для помещения угольного керна;
- баллон с метаном;
- манометр (до 30 бар) для измерения давления в цилиндре;
- прибор для измерения температуры в °С, окружающей среды;
- весы;
- часы;
- штангенциркуль или рулетка для измерения смещения штока (при отсутствии миллиметровой шкалы на штоке)

3.2 Вспомогательные материалы

- уплотнительные кольца для контейнера
- чаша для взвешивания керна
- молоток для дробления угля.

4 Описание и принцип действия лабораторного оборудования

Суть эксперимента состоит в том, чтобы насытить пробу угля метаном до определённой газонасыщенности. На кинетику процесса сорбции метана влияют такие параметры как температура, размер угольной фракции, влажность угля, степень метаморфизма и др. Порядок действий следующий: проба угля помещается в герметичный стакан, пространство цилиндра заполняется метаном, затем прикладывается нагрузка на шток сверху. Находясь под нагрузкой, шток будет опускаться вниз, создавая давление на поршень, а поршень, в свою очередь, будет сжимать газ в колбе и, тем самым, будет

создавать необходимое для исследования давление газа в стакане с углём. Ход штока необходимо измерять на каждом этапе его опускания. Например, определённой расчётной массой груза создаем давление метана в 2 атмосферы.

Шток опустится на определённую величину в цилиндр. Измерим эту величину. Оставим всю конструкцию на одни сутки. Угольная масса сорбирует некоторое количество метана при таком давлении и шток просядет ещё на некоторую величину. Измерим также эту величину. Таким образом, получим, что при определённом давлении метана, а именно в 2 атм, уголь сорбировал определённое количество газа, максимальное для данного давления. Далее, давление газа следует ступенчато увеличивать. Расчётным путём определяется, какой объём газа сорбировал уголь. Эксперимент продолжается до тех пор, пока проба угля не будет насыщена до определённой расчётной газоносности при заданном давлении. На основании полученных данных строится изотерма сорбции Ленгмюра с искомыми параметрами сорбции.

Главным преимуществом предлагаемой авторами установки для определения параметров сорбции и проницаемости угля перед современными аналогами является конструкция, которая является простой и надёжной в плане технической реализации. В данном случае не потребуется применять дорогостоящее или уникальное специальное оборудование, точных измерительных приборов, требующих регулярной поверки, электроэнергии.

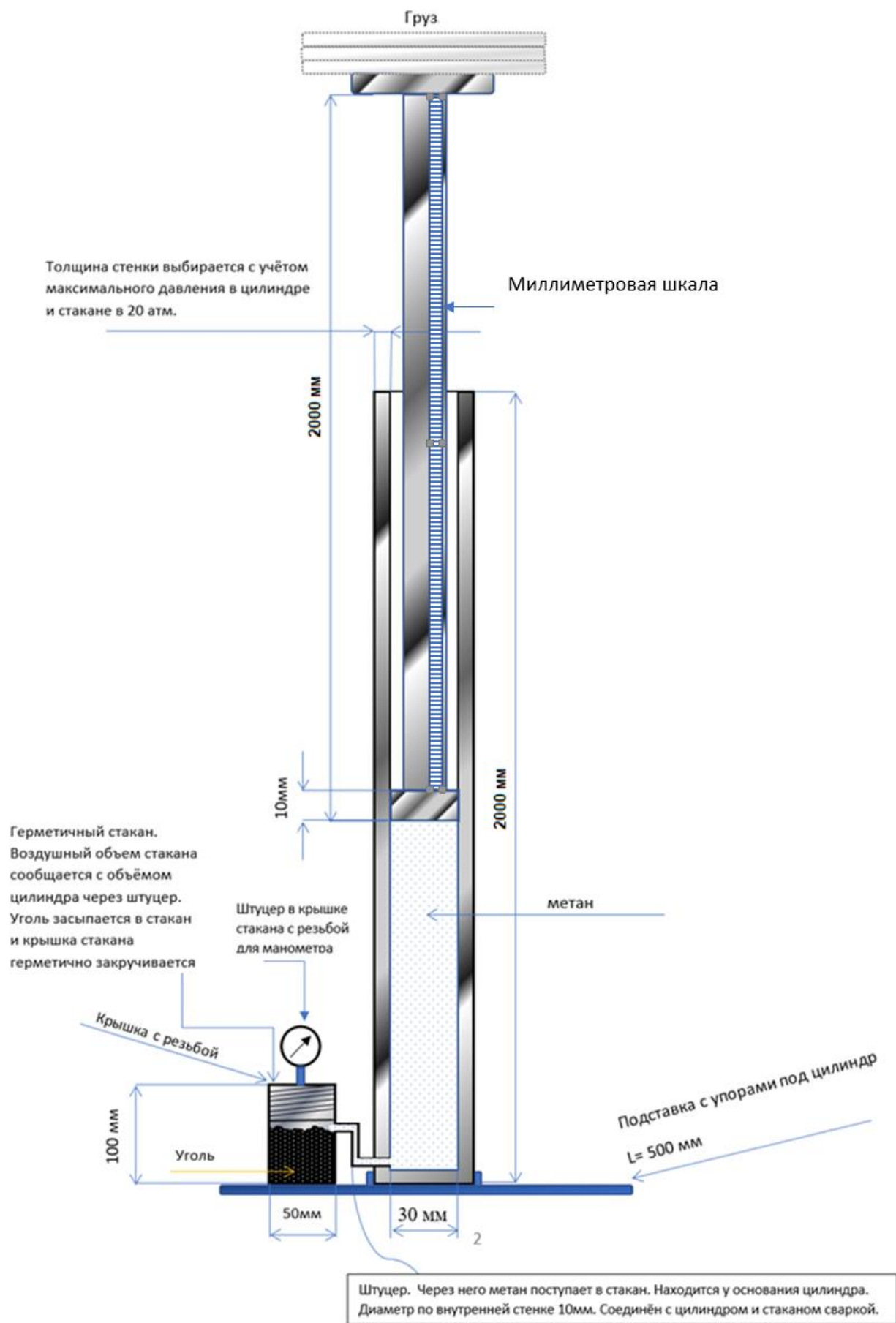


Рисунок 1 – Схема оборудования для проведения эксперимента

4.1 Подготовка оборудования и материалов

Перед началом работ необходимо провести подготовку цилиндра и контейнера для последующего заполнения газом и помещения дисперсных угольных фракций.

Основным элементом проверки является проверка стакана на герметичность под давлением. Для этого создаётся давление в цилиндре в 500 кПа, после чего герметичность конструкции проверяется погружением ее в воду. Если герметичность нарушена, принимаются меры к ее устранению (тщательная очистка резьбового соединения, смазка уплотнителя силиконом). Затем проводится повторная проверка.

После проведения проверки конструкции, цилиндр приводится в рабочее состояние – ёмкость цилиндра наполняется метаном при вытягивании штока до максимального верхнего положения. Уголь измельчается и засыпается в стакан. Крышка стакана герметично закручивается.

5 Определение количества газа, сорбированного в процессе нагружения штока

Подготавливаются бланки протоколов измерений.

После подготовки аппаратуры начинается прикладывание груза на шток.

Измерение объемов сорбированного газа V_1

В протоколе испытаний фиксируются: L_1 - начальное положение штока (мм), температура T окружающей среды, °С, положение штока после приложения нагрузки L_2 (мм), положение штока L_3 после дополнительного проседания через время t .

Проводится расчёт массы сорбированного газа массой угля, основываясь на данных изменения давления за время t и давления внутри контейнера. При этом:

1. Непосредственно после прикладывания груза на шток записывается время и начальное показание манометра, а также положение штока относительно верхнего края цилиндра по его шкале.

2. Производятся поэтапное увеличение нагрузки на шток, для создания необходимого давления в цилиндре. Например, если требуется построить кривую Ленгмюра по 7-ми точкам, то массу прикладываемого на шток груза следует рассчитывать для получения давления в цилиндре 2, 4, 6, 8, 10, 15 и 20 атм. (всего 7 точек)

3. По окончании измерений убрать груз со штока.

4. В итоге должно получиться несколько зависимостей типа давление-газоносность. На основании этих зависимостей строится график с одноимёнными осями.

5. На основании построенной изотермы Ленгмюра вычисляем искомые параметры сорбции.

Все текущие измерения заносятся в протокол (приложение 1).

6 Пример реализации. Результаты эксперимента

Таблица 1 – Предполагаемые результаты эксперимента

Этап	Нагрузка на основание штока, кг	Ход поршня, мм	Доп. ход поршня через сутки, мм	Давление газа, атм	Масса сорбированного метана, г	Объём сорбированного метана в пересчете на тонну угля, м ³
1	14,1	1035	10	2	0,114	1,9
2	28,2	518	10	4	0,234	3,9
3	42,4	163	10	6	0,336	5,6
4	56,5	77	10	8	0,369	6,15
5	70,6	48	10	10	0,48	8
6	106	52	10	15	0,606	10,1
7	141	25	10	20	0,72	12

7 Обработка результатов измерений

Расчётная часть выполняется на ЭВМ при помощи программы Mathcad-15.

На основании полученной зависимости типа «давление-газоносность» строим график.

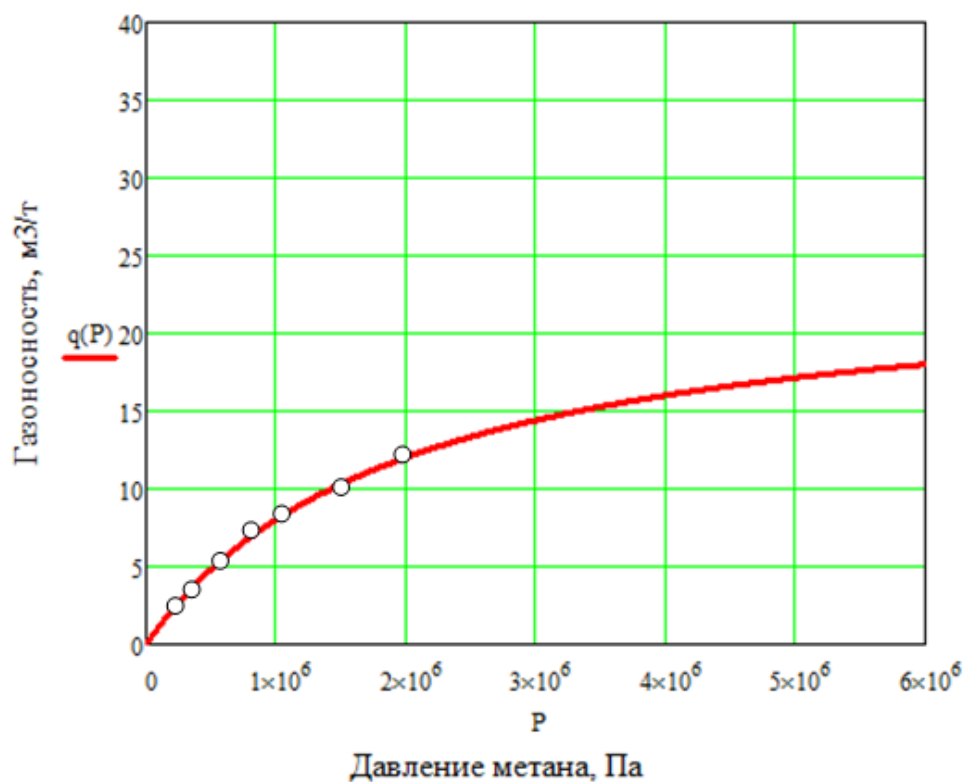


Рисунок 2 – Изотерма Ленгмюра. Зависимость объёма сорбированного метана от давления

Далее при помощи средств программы Mathcad выполним расчёты параметров изотермы Ленгмюра.

При нулевой влажности угля из графика возьмём 2 точки:

$$q_1=8 \quad P_1=10^6$$

$$q_2=12 \quad P_2=2 \cdot 10^6$$

Тогда из уравнения Ленгмюра: $Q(P) = \frac{abP}{1+bP}$, вычислим параметры a и b , соответствующие этой кривой

$$b = \frac{1 - \frac{P_2}{P_1} \frac{q_2}{q_1}}{P_2 \cdot \left(\frac{q_1}{q_2} - 1\right)} = 5 \cdot 10^{-7}$$

$$a = q_1 \cdot \frac{1 + a \cdot P_1}{a \cdot P_1} = 24$$

Таким образом, из кривой Ленгмюра параметры сорбции определяются как: $b=5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$; $a=24 \text{ м}^3/\text{т}$.

Приложение 1

Протоколы измерений

1. Паспорт контейнера*

Дата и время проверки контейнера (число/месяц/год, час-минута)

Номер контейнера _____

Отметка о проверке на герметичность (да-нет) _____

Вес контейнера с крышкой, кг _____

Объем контейнера, см³ _____

Подготовку проводил _____ / _____ /
(подпись) (расшифровка подписи)

* Составляется для каждой контейнера перед каждым использованием, закрепляется на контейнере

2. Протокол шахтных измерений (V_1)*

Место отбора керна _____
(шахта, пласт, выработка)

Дата отбора керна (число/месяц/год) _____

Номер контейнера с керном _____

Общее число отобранных на данном участке кернов _____

Температура в месте отбора пробы, °C _____

Атмосферное давление в месте отбора пробы, кПа _____

Время начала выбуривания керна (час-минута) _____

Время окончания выбуривания керна (час-минута) _____

Атмосферное давление в месте отбора пробы, кПа _____

3. Протокол лабораторных измерений

Этап	Нагрузка на основание штока, кг	Ход поршня, мм	Доп. ход поршня через сутки, мм	Давление газа, атм	Масса сорбированного метана, г	Объём сорбированного метана в пересчете на тонну угля, м ³
1						
2						
3						
...						

Расчеты провел _____

(подпись)

/ _____ /

(расшифровка подписи)

Список использованных источников

1. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А. М-Б. Моделирование процесса дегазации угольного пласта через скважины с учетом геомеханических напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. – № 2. – С. 235-243.
2. Каркашадзе Г.Г., Семькин Ю.А., Лупий М.Г. Методика расчёта притоков метана из очистного забоя по результатам газовой съемки в ремонтную смену// ISSN 0236-1493// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. – №7. – С. 206-211.
3. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М-Б. Механизм повышения газопроницаемости угольного пласта в процессе циклической сорбционной усадки и разбухания угля // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. – № 4. – С. 249– 255.
4. 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, 2013. – № 6. – С.53-59.

Приложение Б

Согласовано:

Проректор по науке и инновациям

НИТУ «МИСиС»



М.Р. Филонов

« » 2017 г.

Утверждаю:

1-й зам. генерального директора-

Технический директор

АО «СУЭК-Кузбасс»



А.А. Мешков

2017 г.

Методика

определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта
в условиях его гидравлической обработки

Руководитель НИР
проф., д-р техн. наук

Сладунов С.В.

Ответственный разработчик,
аспирант

Пашенков П.Н.

Согласовано:

Директор по аэрологической
безопасности подземных горных работ
АО «СУЭК-Кузбасс»

Мазаник Е.В.

Ленинск-Кузнецкий - 2017 г.

Разработчики:

от Горного института НГТУ "МИСиС": проф., д.т.н. Сластунов С.В., проф.,
д.т.н. Коликов К.С., аспирант Пашенков П.Н.

от АО «СУЭК-Кузбасс»: к.т.н. Хаутиев А. М-Б.

Введение	4
1 Описание экспериментальных работ.....	6
1.1 Определение пластового давления, проницаемости и сорбционных параметров угля	6
1.2 Применяемое оборудование	8
1.3 Технологические варианты обустройства устья скважин.....	12
1.4 Последовательность проведения испытаний.....	13
1.5 Пример реализации	16

Введение

Настоящий документ «Методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки» устанавливает методику измерения пластового давления метана, коэффициента газопроницаемости угольного пласта в его исходном и влажном состояниях и параметров сорбции Ленгмюра.

Область использования методики – угольные шахты индустриального партнера АО «СУЭК-Кузбасс».

Для обеспечения достоверного прогноза газообильности горных выработок в условиях интенсивной отработки угольных пластов необходимо иметь данные о коллекторских свойствах угольного пласта, включая газоносность, пластовое давление метана, газопроницаемость и параметров сорбции Ленгмюра. Газоносность угольного пласта является базовой характеристикой, используемой для прогноза газообильности при производстве очистных работ. Широко используемый метод определения газоносности основан на измерении количества газа, содержащегося в отобранной в пласте пробе угля [1].

Пластовое давление метана, газопроницаемость пласта и константы сорбции Ленгмюра также являются параметрами, влияющими на притоки метана в горные выработки и очистной забой. Предлагаемый прямой метод определения пластового давления метана заключается в измерениях давления газа непосредственно в коротких скважинах, пробуренных из вентиляционного или конвейерного штреков.

В основе методики определения коллекторских свойств угольного пласта лежит метод экспериментального определения максимального давления метана в закрытой скважине и дебитов газа при свободном истечении из скважины. Далее на основе использования фундаментальных уравнений массопереноса [2] и современных методов компьютерного моделирования процесса истечения метана из скважины на основе решения

обратной аналитической задачи определяют искомые коллекторские свойства, значения которых в наибольшей степени удовлетворяют теоретическим и экспериментальным данным [3].

В соответствии с разработанной Методикой в процессе испытаний измерительной скважины получают две различные кривые:

первая, на стадии закрытой в устье скважины - изменение давления метана в скважине в течение времени (кривая восстановления давления - КВД);

вторая, на стадии свободного истечения метана - изменение дебита метана из скважины во времени.

1 Описание экспериментальных работ

1.1 Определение пластового давления, проницаемости и сорбционных параметров угля

Целью методики является определение пластового давления, проницаемости и параметров сорбции разрабатываемого угольного пласта.

Главная идея экспериментальных работ заключается в измерении установившегося расхода метана из дегазационной скважины и давления в закрытой дегазационной скважине в течение времени (КВД). На основе обработки результатов измерений и решения обратной аналитической задачи определяют пластовое давление метана, газопроницаемость угольного пласта и параметры сорбции Ленгмюра.

Сорбционные параметры угольного пласта являются составной частью изотермы сорбции Ленгмюра:

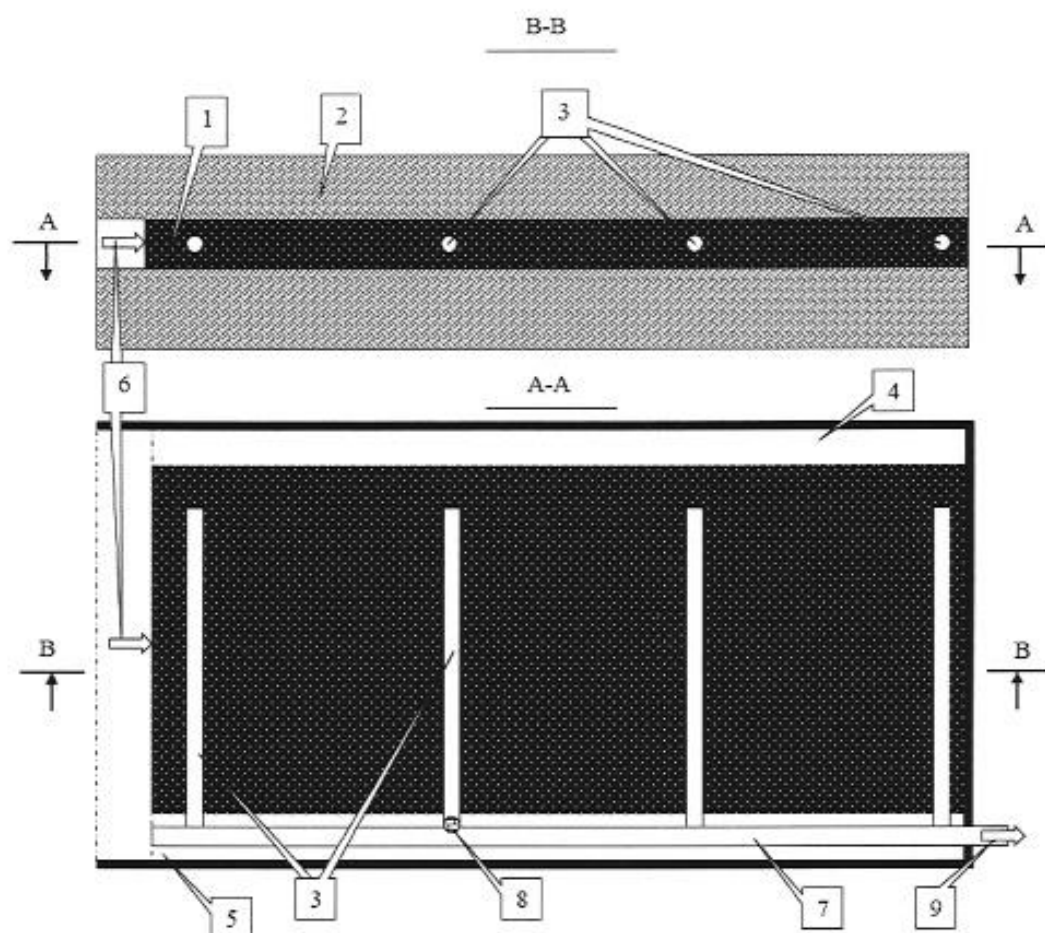
$$q = \frac{abP}{1 + bP}$$

где q - текущая газонасыщенность (метанонасыщенность) угля, норм.м³/т;

a – сорбционная емкость угля, норм.м³/т;

b – коэффициент сорбции, Па⁻¹.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема проведения испытаний. Угольный пласт 1 окружен вмещающими породами 2. В пласт пробурены экспериментальные скважины 3. Система разработки – столбовая. Пласт оконтурен вентиляционным и откаточным штреками 4 и 5. Экспериментальная скважина 3 оснащена измерительной аппаратурой 8, включающей манометр, расходомер и вентиль (на рисунке не показаны). Газ из магистрального газопровода 7 извлекают на поверхность вакуум-насосной станцией (ВНС).

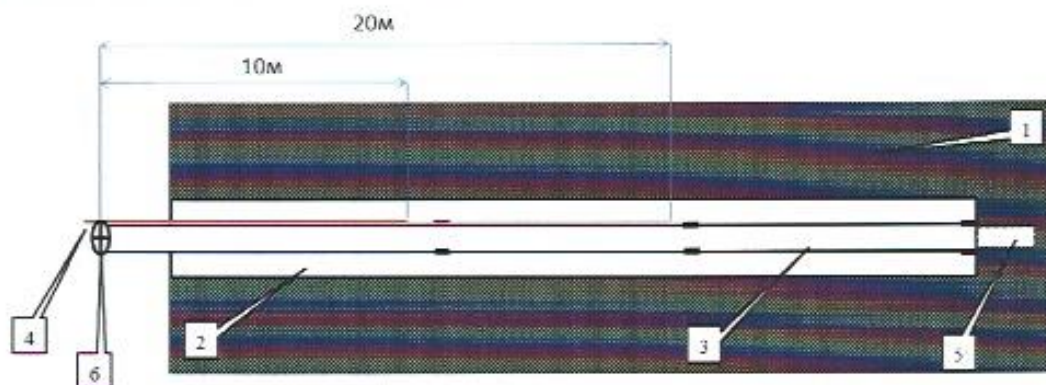


1 – угольный пласт; 2 – вмещающие породы; 3 – экспериментальные скважины;
 4,5 – вентиляционный и откаточный трубопроводы; 6 – направление движения лавы; 7 – магистральный газопровод; 8 – аппаратура для измерения пластового давления, 9 – направление потока

Рисунок 1 – К методике определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки

На рисунке 2 показано, что измерительной аппаратурой оснащена одна скважина 2, пробуренная в угольном пласте 1. Эта скважина 2 в основном работает как дегазационная, при этом в какое-то время скважину перекрывают с целью снятия кривой восстановления давления. На устье скважины устанавливают расходомер 3, кран 6 и манометр (на рисунке не показан). Расходомер-ротаметр для измерения дебита метана присоединяется к крану с

помощью БРС-соединения. Устье скважины соединено с магистральным трубопроводом 6. С помощью данной аппаратуры производят измерения дебита и давления метана в скважине 5. Полученной информации достаточно для расчета искомых показателей угольного пласта.



- 1- угольный пласт;
- 2- экспериментальная скважина под ГРП диаметром 130 мм длиной 36 м;
- 3- обсадная колонна диаметром 70 мм;
- 4- шланги для подачи герметизирующих компонентов.
- 5 – разбуренный участок, длиной 2м
- 6 – гидравлический кран

Рисунок 2 – Обустройство экспериментальной скважины

1.2 Применяемое оборудование

Для изменения расхода газа из устья дегазационной скважины рекомендуются использовать пластиковые ротаметры Dwyer (рисунок 3), предназначенные для измерения расхода чистых неагрессивных жидкостей и газов. Для решения поставленной задачи подходит расходомер Dwyer, тарированный под расход газа, соединяемый с трубкой диаметром 10 мм. Требуемый диапазон измеряемого расхода газа 1...10 л/мин; 10...100 л/мин.

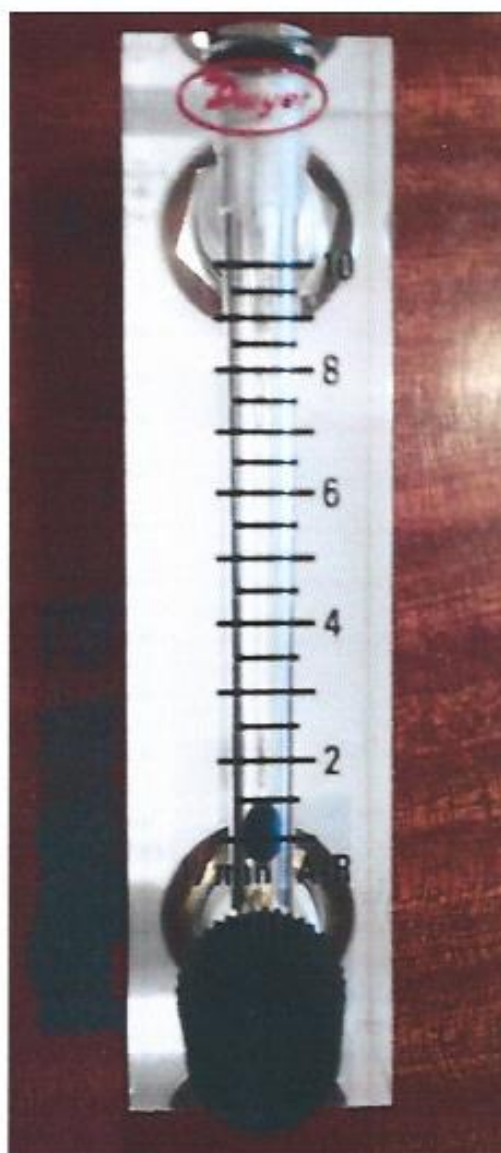


Рисунок 3 - Пластиковый ротаметр Dwyer VFA-24-BV

Примечание. Поскольку ротаметр Dwyer тарирован на расход воздуха, то его показания, полученные в размерности л/мин, следует умножить на коэффициент 1,63. Поэтому, при показаниях ротаметра 10 л/мин, в перерасчете на чистый метан дебит составляет 16,3 л/мин.

Если идет из скважины поступает метановоздушная смесь (например, 74% метана, 26% воздуха), то перерасчет должен вестись с коэффициентом



Рисунок 6 – Газовый манометр

1.3 Технологические варианты обустройства устья скважин

Высокая степень герметичности устья скважины играет важную роль при гидроразрыве угольного массива и является определяющим фактором эффективности проводимого гидравлического воздействия на пласт. Поэтому герметизация устья скважины должна выдерживать давление до 20 МПа.

После бурения скважины производят обсадку уже апробированными цельнотянутыми металлическими трубами диаметром 90 мм с толщиной стенки 5 мм.

Перед установкой труб в полость скважины к ним прикрепляют трубки для подачи герметизирующей двухкомпонентной смолы «Шахтиклей», «Carbofoam» или другого аналога. На конце обсадной колонны в забое скважины ставится манжета для исключения утечек смолы в полость скважины.

Трубки для подачи смолы в затрубное пространство скважины устанавливают в трех местах (в скважине на глубине - 30 м, в середине - 18 м и в устьевой части - 5 м). Герметизирующие компоненты нагнетают через трубки диаметром 10 мм. Для подачи двух компонент клея в затрубное пространство используют пневматический насос.

После затвердевания смолы, скважину подключают к лавной маслостанции в соответствии со схемой, приведённой на рисунке 7 и проводят гидроразрыв угольного пласта через скважину.

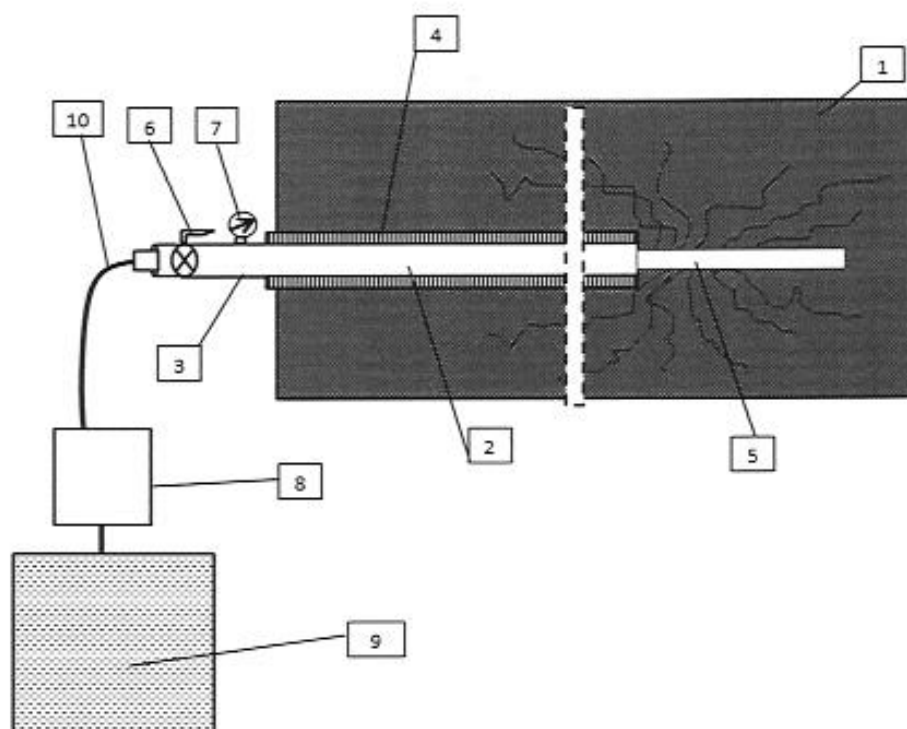


Рисунок 7 – Принципиальная схема проведения гидроразрыва

1 – угольный пласт, 2 – скважина, 3 – обсадная труба, 4 – герметик, 5 – разбуренный участок, 6 – кран, 7 – манометр, 8 – насос, 9 – резервуар с водой, 10 – гидравлический рукав

1.4 Последовательность проведения испытаний

Скважина 2 бурится в угольный пласт, устанавливается обсадная труба 3, коаксиальное пространство между стенками скважины и обсадной трубой герметизируется смолой 4, далее дополнительно разбуривают участок скважины 5 (через обсадную трубу) из которого истекает метан, измерение дебита которого в течение времени осуществляют ротаметром (на рисунке не показан) из обсадной трубы 3 до наступления установившегося режима фильтрации и данные замеров заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – Дебиты метана в исходном состоянии пласта

№ п/п	Время после бурения дополнительного участка скважины, час	Дебит метана, л/мин
1		
2		
3		
...	...	...

После стабилизации дебита метана во времени обсадную трубу 3 присоединяют через рукав 10 к насосу 8 с емкостью 9. Далее в скважину 5 через обсадную трубу 3 нагнетают воду под давлением 15...20 МПа, которая по природным и техногенным каналам проницаемости распространяется через полость скважины 5 в угольный пласт 1. При этом формируется гидравлическая связь нагнетаемой воды с метаном в угольном пласте 1. Затем устье скважины с обсадной трубой 3 закрывают краном 6. При этом с течением времени вода под остаточным давлением распространяется вглубь пласта 1, что фиксируется в виде понижения давления воды на манометре 7. Минимальное установившееся значение давления на манометре 7 соответствует искомой величине верхнего предела пластового давления метана в угольном пласте 1.

Данные замеров стабилизации давления воды в скважине записывают в таблицу 2.

Таблица 2 – Давление воды в скважине

№ п/п	Время после закрытия скважины, час	Давление воды в скважине, МПа
1		
2		
3		
...	...	...

После этого на устье скважины открывают кран 6 и избыточная свободная вода самоистечением выходит из угольного пласта 1. Капиллярная

и поровая вода остается в угольном пласте 1, сохраняя его влажность, характерную для процесса гидрообработки. На заключительной стадии реализации способа аналогичным путем с помощью ротаметра (на рисунке не показан) фиксируют изменение дебита метана из скважины в течение времени, показатели заносят в таблицу 3.

Таблица 3 – Дебиты метана после гидрообработки

№ п/п	Время после истечения воды, час	Дебит метана, л/мин
1		
2		
3		
...	...	...

По второму варианту реализации способа после истечения воды устье скважины закрывают краном 6 и манометром 7 измеряют в ней установившееся пластовое давление метана. В этом случае реализуется режим нарастания давления метана от атмосферного до максимального, что соответствует искомой величине нижнего предела пластового давления метана в угольном пласте 1. Значения нарастающего давления в зависимости от времени заносят в таблицу 4. Замеры давления в начале процесса выполняют через 1 час в течение рабочей смены. Далее – один раз в сутки до стабилизации давления.

Таблица 4 – Давление метана в скважине

№ п/п	Дата, время после закрытия скважины, час	Давление газа, МПа
1		
2		
3		
...	...	...

Истинное пластовое давление метана определяют в диапазоне между величинами верхнего и нижнего пределов пластового давления.

Вместе с прямым определением пластового давления метана, полученной информации достаточно для определения параметров сорбции угольного пласта в исходном и влажном состояниях.

На основе компьютерной обработки экспериментальных данных определяют искомые фильтрационные и сорбционные свойства: коэффициент газопроницаемости угольного пласта и параметры сорбции Ленгмюра [6]. Полученные результаты используют для обоснования предельно допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору [4].

1.5 Пример реализации

Угольный пласт «Болдыревский», шахта им. С. М. Кирова, разрабатывается по столбовой системе разработки. Из вентиляционного штрека лавы 24-58 пробурена скважина длиной 36 м. Обсадка скважины произведена стальными трубами диаметром 70 мм при толщине стенки – 5 мм. Коаксиальное пространство между скважиной и трубой заполняют путем нагнетания шахтного двухкомпонентного герметика «Шахтиклея». После герметизации скважина пробурена на дополнительную длину 3 м буровой коронкой диаметром 50 мм. Затем после обустройства скважины по фигуре 1 с помощью пластикового ротаметра фирмы Dwyer выполнены замеры дебита метана, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Дебиты метана в исходном состоянии пласта

№ п/п	Время после бурения дополнительного участка скважины, час	Дебит метана, л/мин
1	1	6
2	4	5
3	12	4,5
4	48	4

Далее в скважину осуществили нагнетание воды под предельным давлением 14 МПа. Скважину закрыли и выдержали под давлением в течение 4 суток. Результаты измерений давление воды представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Давление воды в скважине

№ п/п	Время после закрытия скважины, час	Давление воды в скважине, МПа
1	0	14
2	24	8,8
3	48	5,2
4	72	3,2
5	90	3,2

По данным таблицы 2 принимаем, что верхний предел пластового давления метана составляет 3,2 МПа.

Затем открывают кран и осуществляют самопроизвольный слив воды из скважины. После слива воды скважину закрывают краном 6 и манометром 7 измеряют нарастание давления метана в скважине, вплоть до величины нижнего предела пластового давления. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Давление метана в скважине

№ п/п	Время после закрытия скважины, час	Давление метана в скважине, МПа
1	0	0,1
2	24	2,5
3	48	3,0
4	72	3,1

Таким образом, истинное пластовое давление метана определяется в диапазоне между верхним и нижним пределами и составляет 3,1...3,2 МПа.

В последующем измеряют дебит метана из скважины, результаты которого представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Дебиты метана во влажном состоянии пласта

№ п/п	Время после начала истечения воды, час	Дебит метана, л/мин
1	0,5	90
2	6	50
3	24	45
4	96	40

Полученных данных достаточно для верификации сорбционных параметров угольного пласта в исходном и влажном состояниях.

На рисунке 2 показан результат верификации параметров сорбции по теоретической модели и шахтным измерениям для исходного пласта, по которым получены следующие результаты:

коэффициент проницаемости $k_1=0,04$ мД;

сорбционная емкость угля $a=30,5$ м³/т;

параметр изотермы сорбции Ленгмюра $b=0,26 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹.

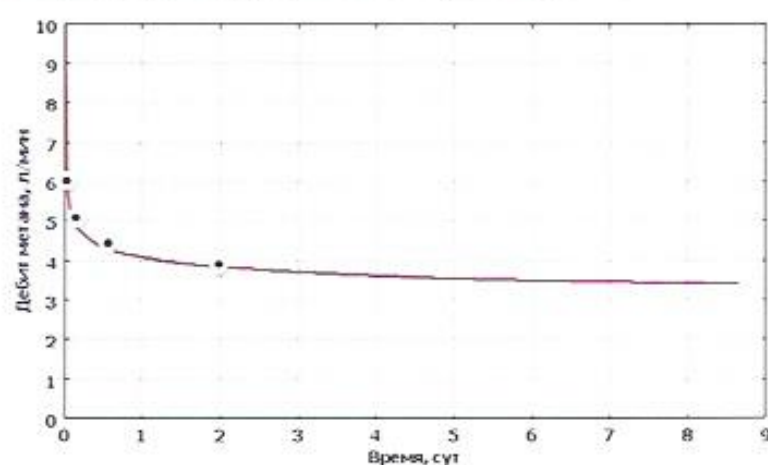


Рисунок 2 – Верификация искоемых параметров для угля в исходном состоянии

На рисунке 3 показан аналогичный результат верификации для влажного угля:

коэффициент проницаемости $k_1=0,5$ мД;

сорбционная емкость угля $a_1=24,1$ м³/т;

параметр изотермы сорбции Ленгмюра $b_1=0,19 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹.

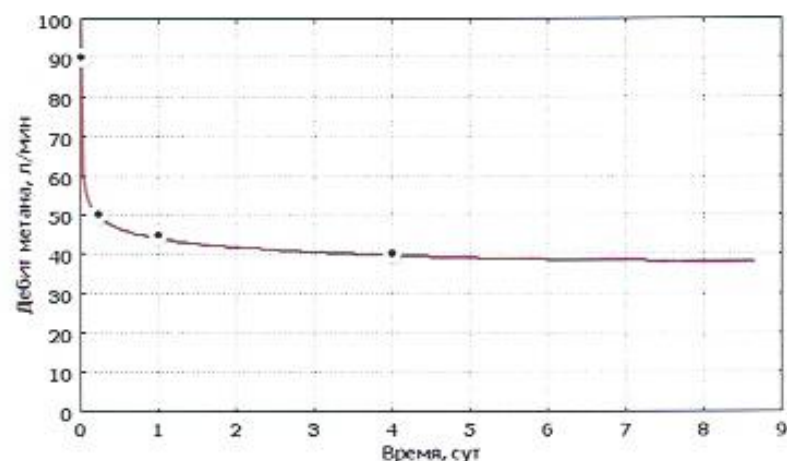


Рисунок 3 – Верификация искомых параметров для влажного угля

Таким образом, в соответствии с представленным способом оперативно осуществляют прямое определение пластового давления метана и далее путем верификации вычисляют параметры сорбции угольного пласта в исходном и влажном состоянии. Достоверность получасмой информации достигается за счет прямых экспериментов с натурным объектом.

Список использованных источников

1. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М.: «Недра», 1977. – С. 13- 14
2. Полубаринова-Кочина П.Я. О неустановившейся фильтрации газа в угольном пласте// Прикладная математика и механика. 1953. – Т. 17. – №6. – С.735-738.
3. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е. В. // Методика и результаты измерения пластового давления метана и сорбционных свойств угольного пласта. Газовая промышленность, 2012. - Спец. вып. - С. 48-49.
4. Сластунов С. В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Аналитическая методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору.соавторы: Журнал Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2013. – № 6. С.53-59.
5. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М-Б., Поляков В.В. Метод измерения дебита метана из пластовых скважин выемочного столба // Сборник научных трудов. Вып. 2 «Пути повышения эффективного и безопасного освоения пластовых месторождений полезных ископаемых подземным способом» / Сост. А.В. Фомин.-М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014.- С.283-286. ISBN 978-5-905450-17-4.
6. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А. М-Б. Моделирование процесса дегазации угольного пласта через скважины с учетом геомеханических напряжений //Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. – № 2. – С. 235-243.

Приложение В

2018г

АО "СУЭК-Кузбасс"

Методика

предварительного и оперативного прогноза газообильности
подземных горных выработок в условиях интенсивной
отработки угольных пластов

Физические свойства угольного пласта

Пористость угольного пласта	$\Pi := 0.02$	
Пористость кровли	$\Pi_1 := 0.02$	
Пористость почвы	$\Pi_2 := 0.02$	
Газопроницаемость угольного пласта, м ²	$C := 0.15 \cdot 10^{-15}$	
Газопроницаемость кровли, м ²	$C_1 := 0.1 \cdot 10^{-16}$	
Газопроницаемость почвы, м ²	$C_2 := 0.1 \cdot 10^{-16}$	
Газопроницаемость отбитых фракций угля, м ²	$C_c := 0.5 \cdot 1.25 \cdot 10^{-22}$	
Константы сорбции Ленгмюра:		
Параметр изотермы сорбции, 1/Па	$k := 5.4 \cdot 10^{-7}$	
Максимальный объем метан в тонне угля, м ³ /т	$q_{\max} := 33.12$	при W=3%
Природная газоносность пласта м ³ /т	$q_r := 20.7$	
Температура газа, К	$T := 300$	Универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К) $R := 8.31$
Атмосферное давление, Па	$P_0 := 10^5$	Молярная масса метана, кг/моль $M := 16 \cdot 10^{-3}$
Динамическая вязкость газа, Па*сек	$\mu := 0.0108 \cdot 10^{-3}$	
Плотность метана, кг/м ³	$\rho_2 := M \cdot \frac{P_0}{R \cdot T}$	$\rho_2 = 0.642$
Пластовое давление метана по изотерме Ленгмюра	$P_{\text{пл}} := P_0 + \frac{q_r}{k \cdot (q_{\max} - q_r)}$	$P_{\text{пл}} = 3.186 \times 10^6$
Объемная масса угля, кг/м ³	$\rho_y := 1280$	
Зольность угля на лавном конвейере	$n := 0.27$	
Предельная сорбция (масса метана к объему угля), кг/м ³	$b_l := q_{\max} \cdot 10^{-3} \cdot M \cdot \frac{P_0}{R \cdot T} \cdot \rho_y$	$b_l = 27.208$

$$\text{Параметр газопроводности угля, } A0 := \frac{C}{\mu \cdot \Pi} \quad \text{Параметр газопроводности отбитого угля, } A01 := \frac{C_c}{\mu \cdot \Pi}$$

$$\text{Параметр газопроводности кровли } A1 := \frac{C1}{\mu \cdot \Pi1} \quad \xi := \frac{1 - \Pi}{\Pi} \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Горно-геологические условия

$$\text{Мощность пласта, м } m := 2.23$$

$$\text{Длина лавы, м } L0 := 240$$

$$\text{Минимальное сечение очистной выработки, кв.м } S_{оч} := 6.8$$

$$\text{Концентрация метана в воздушном потоке в штреке на входе в очистной забой, в долях единицы } C_{вх} := 0.0005$$

$$\text{Максимально допустимая концентрация метана в исходящей струе, в долях единицы } C_{кр} := 0.01$$

$$\text{Максимально допустимая скорость вентиляционного потока в лаве, м/с } V_{max} := 4$$

Режим работы очистного забоя:

$$\text{Количество рабочих смен в сутки } n_{раб} := 3$$

$$\text{Длительность рабочей смены, час } t_{раб} := 6$$

$$\text{Длительность ремонтной смены, час } t_{рем} := 6$$

$$\text{Длительность работы в сутки, час } T_{раб} := 24 - t_{рем} \quad T_{раб} = 18$$

Параметры вентиляционного потока по результатам газовой съемки в ремонтную смену

$$\text{Фактические перетоки вентиляционной струи через крепь в выработанное пространство, м³/м³ } \eta\eta := -0.00204$$

$$\text{Массовый отток или приток метана через крепь в выработанное пространство, кг/мин } QF := -1.277$$

$$\text{Максимально допустимый расход воздуха на входе в очистную выработку, куб м/сек } Q_{очmax} := S_{оч} \cdot V_{max}$$

$$Q_{очmax} = 27.2$$

$$\text{Максимально допустимое содержание метана в исходящей струе, кг/мин } Q_{ch4} := 60(C_{кр} - C_{вх}) \cdot \left(\frac{Q_{очmax}}{1 + \eta\eta} \right) + \frac{QF}{\rho_2}$$

$$Q_{ch4} = 13.546$$

$$\text{Длина зоны притоков метана } L_m := L0 - 20$$

Примечание: поправка Коликова К.С. учет зоны дегазации угля в оконтуривающие выработки: на расстоянии 10 м от штрека вглубь пласта метана почти нет.

Характеристики механизированного комплекса и комбайна

Координата места расположения комбайна в лаве (от начала движения), м	$y1 := 20$
Высота заходки комбайна равна мощности пласта	$m = 2.23$
Ширина заходки комбайна, м	$\Delta h := 0.8$
Коэффициент безаварийной работы комбайна в рабочей смене (надежность)	$K_{исп} := 0.95$
Длительность концевой операции комбайна (после производительной заходки) - перед операцией зачистки забоя), сек	$t1 := 300$
Время остановки в начале и конце смены, мин	$t0 := 20$
Скорость обратного движения комбайна, м/мин	Предложение С.В. Сластунова: скорость обратного движения комбайна (на зачистке) перед очередным циклом заходки - равна скорости движения комбайна при отбойке угля.
Примечание Каркашадзе Г.Г. : скорость движения комбайна на зачистке всегда больше 0, 3 м/мин (0.005 м/с)	
Длительность концевой операции комбайна (после зачистки) перед очередным циклом, сек	$t2 := 300$
Гранулометрический состав угля на лавном конвейере	Средневзвешенный размер фракции $R0 \equiv 13.65 \cdot 10^{-3}$
Скорость движения лавного конвейера, м/с	$V_k := 2.4$

Суммарное время перед очередным циклом заходки, сек

$$t_{123}(v) := t1 + \frac{L0}{v \cdot (v > 0.005) + 0.005 \cdot (v \leq 0.005)} + t2$$

Решение дифференциального уравнения

Количество шагов в расчете LL	$N1 := 500$
Количество шагов в расчете TT	$N2 := 500$

Given

$$P_t(x, t) \cdot \left[1 + \frac{\xi \cdot k \cdot b1}{(1 + k \cdot P(x, t))^2} \right] = A0 \cdot P(x, t) \cdot P_{xx}(x, t) + A0 \cdot P_x(x, t)^2$$

Граница на бесконечности

$$LL := 10.0 \quad P(x, 0) = P_{пл} \quad P(0, t) = P0$$

$$P_x(LL, t) = 0 \quad P(LL, t) = P_{пл}$$

Время

$$TT \equiv 60 \cdot 60 \cdot 6 \quad \text{сек}$$

$$P := \text{Pdesolve} \left[P, x, \begin{pmatrix} 0 \\ LL \end{pmatrix}, t, \begin{pmatrix} 0 \\ TT \end{pmatrix}, N1, N2 \right]$$

Удельный приток метана из забоя, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$q(x, t) := \frac{C}{\mu} \cdot \left(\frac{d}{dx} P(x, t) \right)$$

Абсолютный приток метана из забоя, куб м/мин

$$QQ(x, t) := 60 \cdot m \cdot L0 \cdot q(x, t)$$

Приток метана из очистного забоя
при расположении комбайна
в координате $y1$

$$y1 = 20$$

$$Q1(v) := (1 - n) \cdot m \cdot \int_0^{y1} q\left(0, \frac{L0 - y}{v}\right) dy$$

$$Q(v) := Q1(v) + (1 - n) \cdot m \cdot \int_{y1}^L q\left[0, t1 + \frac{L0}{[v \cdot (v > 0.005) + 0.005 \cdot (v \leq 0.005)]} + t2 + \frac{y - y1}{v}\right] dy$$

$$QQQ(v) := (1 - n) \cdot m \cdot \int_0^L q\left(0, \frac{L0 - y}{v}\right) dy$$

$$Q(v) := Q(v) \cdot (Q(v) > 0)$$

Расчет давления в отбиваемом угле

Среднее давление газа в порах отбиваемого угля

$$P_{cp}(v) := \frac{\int_0^{\Delta h} P\left(x, \frac{2.5L0}{v} + t1 + t2\right) dx}{\Delta h}$$

$$P_{cp}(v) := P_{cp}(v) \cdot (P_{cp}(v) > P0) + P0 \cdot (P_{cp}(v) < P0)$$

$$\chi := \frac{P_{cp}(0.171)}{P_{пл}} = 0.537$$

Приток метана из частицы угля радиусом $R0$

Давление в отбитом угле, Па

$$P1 := \chi \cdot P_{пл}$$

Решение дифференциального уравнения полярно симметричной задачи

Количество шагов в расчете расстояния $N11 := 100$

Количество шагов в расчете времени $N22 := 10^3$

Решение дифуравнения

Given

$$PR_t(r, t) \cdot \left[1 + \frac{\xi \cdot k \cdot bl}{(1 + k \cdot PR(r, t))^2} \right] = A01 \cdot PR(r, t) \cdot PR_{rr}(r, t) + A01 \cdot PR_r(r, t)^2 + A01 \cdot \frac{2}{r} \cdot PR(r, t) \cdot PR_r(r, t)$$

$$PR(r, 0) = P1 \quad PR(R0, t) = P0 \quad R00 := 0.001 \cdot R0 \quad PR_r(R00, t) = 0$$

$$TT = 3600 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 6$$

$$PR := \text{Pdesolve} \left[PR, r, \left(\frac{R00}{R0} \right), t, \left(\frac{0}{TT} \right), N11, N22 \right]$$

Удельный приток метана из частицы угля, м³/(м²·с)

$$qR(r, t) := -\frac{Cc}{\mu} \cdot \left(\frac{d}{dr} PR(r, t) \right)$$

Интегральный поток метана
с поверхности отбитого угля за время t,
куб. м

$$Vch4(t) := \int_0^t 4 \cdot \pi \cdot R0^2 \cdot qR(R0, t) dt$$

Относительная дегазация отбитого угля
за время t, куб.м/куб м

$$qqR(t) := \frac{Vch4(t)}{\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R0^3}{3} \right)}$$

Приток метана из отбитого угля

$$QCH4(v, t) := (1 - n) \cdot v \cdot m \cdot \Delta h \cdot \frac{3}{R0} \cdot qqR(t) \cdot 60$$

Приток метана из отбитого угля в лаву при расположении
комбайна в координате y1 составляет

$$Q4(v, y1) := (1 - n) \cdot v \cdot m \cdot \Delta h \cdot \frac{3}{R0} \cdot qqR \left(\frac{L0 - y1}{vk} \right) \quad \text{куб. м /сек}$$

Удельный приток метана из-под крепи пород кровли(в месте
расположения крепи, м³/(м²·сек)

Given

$$P11_t(x, t) = A1 \cdot P11(x, t) \cdot P11_{xx}(x, t) + A1 \cdot P11_x(x, t)^2$$

$$\text{Граница на бесконечности, м} \quad \underline{LL} := 10 \quad P11(x, 0) = P_{пл} \quad P11(0, t) = P0$$

$$P11_x(LL, t) = 0$$

$$P11(LL, t) = P_{пл}$$

$$\underline{TT} := 60 \cdot 60$$

$$P11 := \text{Pdesolve} \left[P11, x, \left(\frac{0}{LL} \right), t, \left(\frac{0}{TT} \right), N1, N2 \right]$$

$$q_{11}(x,t) := \frac{C1}{\mu} \cdot \left(\frac{d}{dx} P_{11}(x,t) \right)$$

Интегральный приток метана из-под пород кровли (из почвы) в месте расположения крепи, м³/с

$$Q_{11}(v) := \Delta h \cdot \int_0^L q_{11} \left(0, \frac{L_0 - y}{v} + t_{123}(v) \right) dy$$

$$Q_{11}(v) := Q_{11}(v) \cdot (Q_{11}(v) > 0)$$

Примем, что из-под крепи почвы и кровли поступает одинаковый поток метана (свойства одинаковы)

Удельный приток метана из пород свежесобранной кровли, м³/(м²·сек)

Given

$$P_{2t}(x,t) = A1 \cdot P_2(x,t) \cdot P_{2xx}(x,t) + A1 \cdot P_{2x}(x,t)^2$$

Граница на бесконечности, м LL = 10 P₂(x, 0) = P_{пл} P₂(0, t) = P₀

$$P_{2x}(LL, t) = 0 \quad P_2(LL, t) = P_{пл} \quad TTT := 6 \cdot 60 \cdot 60$$

$$P_2 := \text{Pdesolve} \left[P_2, x, \begin{pmatrix} 0 \\ LL \end{pmatrix}, t, \begin{pmatrix} 0 \\ TTT \end{pmatrix}, N1, N2 \right]$$

$$q_2(x,t) := \frac{C1}{\mu} \cdot \left(\frac{d}{dx} P_2(x,t) \right)$$

Интегральный приток метана из кровли при расположении комбайна в конце заходки, м³/сек

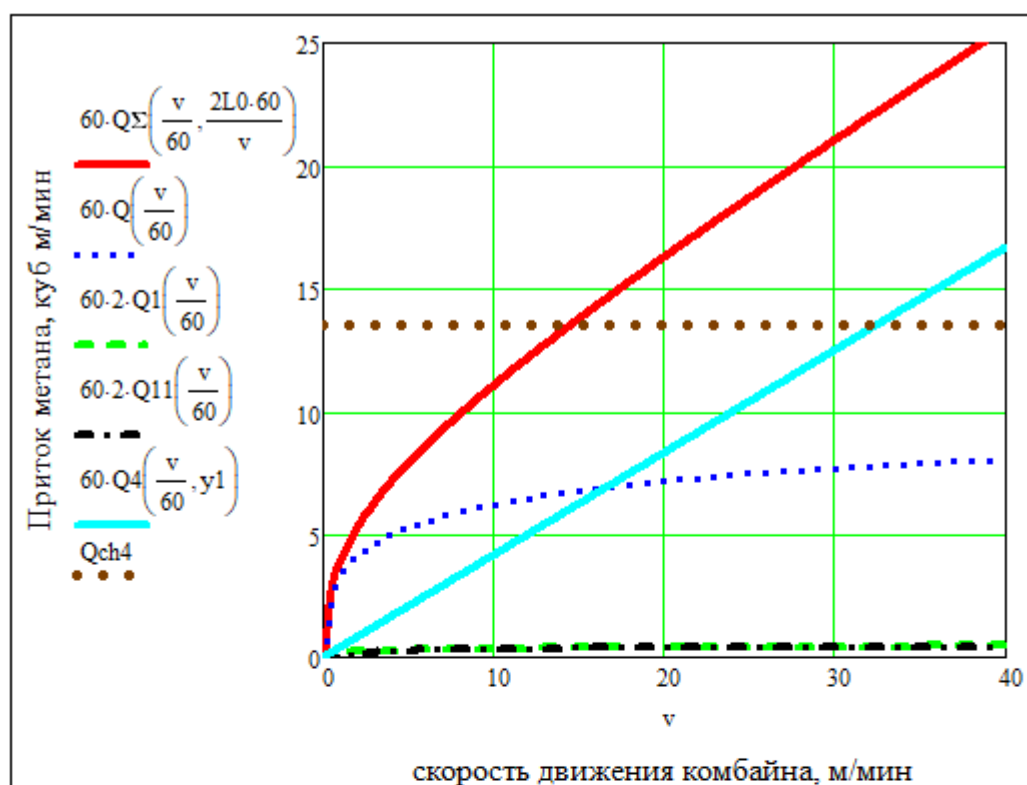
$$QQ_1(v) := \Delta h \cdot \left(\int_0^{y1} q_2 \left(0, \frac{L_0 - y}{v} \right) dy \right)$$

$$QQ_1(v) := QQ_1(v) + \Delta h \cdot \int_{y1}^L q_2 \left[0, t1 + \frac{L_0}{[v \cdot (v > 0.005) + 0.005 \cdot (v \leq 0.005)]} + t2 + \frac{y - y1}{v} \right] dy$$

$$Q_1(v) := QQ_1(v) \cdot (QQ_1(v) > 0)$$

Суммарный приток метана из всех источников

$$Q_{\Sigma}(v,t) := Q(v) + 2 \cdot Q_1(v) + 2 \cdot Q_{11}(v) + Q_4(v, y1)$$



Решение уравнения относительно скорости комбайна

$$f(v) := 60 \cdot Q_{\Sigma}(v, y1) - Q_{ch4}$$

$$vk := \text{root}(f(v), v, 0.001, 50)$$

$$vk = 0.242$$

Максимально допустимая скорость движения комбайна в процессе

$$\text{выемки угля, м/мин} \quad vk0 := 60 \cdot vk$$

$$vk0 = 14.541$$

Коэффициент машинного
времени с учетом пересменок
и концевых операций

$$K_{\text{маш}} := \frac{\frac{L0}{vk}}{\frac{L0}{vk} + t123(vk)} \cdot \frac{6 \cdot 60 - t0}{6 \cdot 60}$$

$$K_{\text{маш}} = 0.362$$

Суточная нагрузка
на очистной забой

$$A_{\text{сут}}(vk) := \frac{K_{\text{исп}} \cdot K_{\text{маш}} \cdot \text{Траб} \cdot 60 \cdot \rho_{\text{у}} \cdot m \cdot \Delta h \cdot vk0}{1000}$$

Расчет нагрузки на очистной
забой

$$A_{\text{сут}}(vk) = 1.235 \times 10^4 \quad \text{т/сут}$$

Расчет газообильности очистного забоя

$$60 \cdot Q_{\Sigma}\left(\frac{vk0}{60}, \frac{2L0 \cdot 60}{vk0}\right) = 13.546 \quad \text{м}^3/\text{мин}$$

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
Управления дегазации
и утилизации метана (УДиУМ)
ОАО «СУЭК – Кузбасс»



Гаврилов В.И.

« » сентября 2015 г.

АКТ

выполнения работ по гидроразрыву пласта «Болдыревский» через скважину № 5-ПодзГРП шахты им. С.М. Кирова на выемочном участке 24-58 с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин

от 22.09.2015 г.

Согласовано:

Директор по аэрологической
безопасности подземных горных работ
ОАО «СУЭК-Кузбасс»


подпись, дата

Е.В. Мазаник

Директор управления дегазации и
утилизации метана


подпись, дата

А.П. Садов

Мы, нижеподписавшиеся:

представители УДиУМ, зам. директора по производству Семькин Ю.А.,
зам. главного инженера по технологии Комиссаров И.А., инженер-технолог
Хаутиев А.М.-Б., зам начальника участка №3 Демин С.Л.;

представители шахты им. С.М. Кирова, зам. главного инженера Малафеев А.В, зам. начальника участка ВТБ Агафонников А.С.;
представитель Горного института НИТУ «МИСиС», руководитель НИР, проф., д-р техн. наук Сластунов С.В., инженер Пащенко П.Н.
составили настоящий акт о следующем.

Работы проводились в соответствии со следующими документами:

- Технологическая часть проекта по предварительной дегазации пласта «Болдыревский» на поле шахты им. С.М.Кирова на выемочном участке 24-58 с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин (утверждена Первым зам. генерального директора - Техническим директором ОАО «СУЭК-Кузбасс» А.А. Мешковым);
- Паспорт на выполнение работ по гидроразрыву пласта «Болдыревский» в выемочном участке №24-58 ОАО «СУЭК-Кузбасс» шахта им. С.М. Кирова (утвержден главным инженером шахты им. С.М. Кирова В.С. Сметаниным);
- Программа и методика экспериментальных работ по апробации и оценке эффективности предварительной дегазации пласта «Болдыревский» на поле шахты им. С.М.Кирова (выемочный участок 24-58) с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин (утверждена Первым зам. генерального директора - Техническим директором ОАО «СУЭК-Кузбасс» А.А. Мешковым).

Время, последовательность и состав работ.

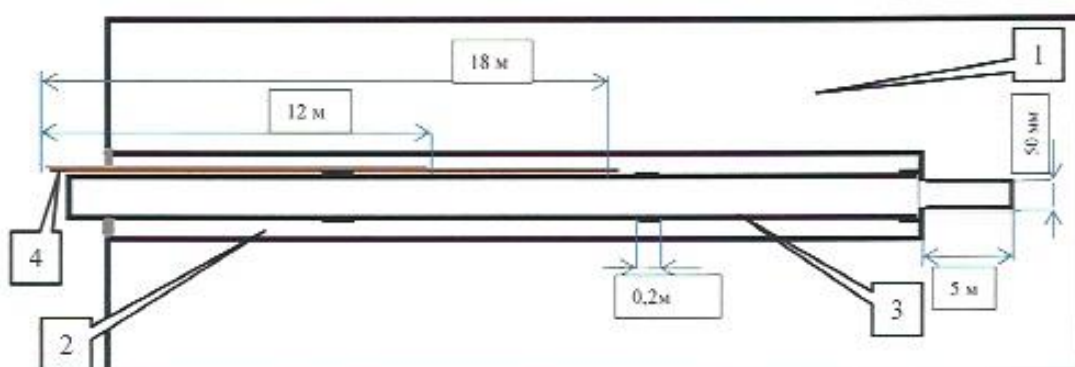
Из вентиляционного штрека 24-58 (место заложения экспериментальной скважины №5 ПодзГРП - вентиляционный штрек лавы 24-58, ПК 102 – выкопировка из плана горных работ прилагается).

06.09.2015. Была пробурена скважина длиной **36 метров** диаметром **130 мм**. Произведена обсадка скважины стальными трубами диаметром **70 мм**, стенка - **5 мм**. При обсадке периодически велась промывка скважины для удаления бурового штыба.

На этапе герметизации скважины для нагнетания шахтиклея были опущены в скважину вместе с обсадной колонной 2 шланга на глубины 12 и 18 метров.

10.09.2015. Герметизация скважины была проведена с помощью специалистов ООО «Сибхимукрепление».

По факту в скважину было залито около 240 литров смолы. Опрессовка скважины не производилась.



1- угольный пласт; 2- экспериментальная скважина под ПГРП диаметром 130 мм длиной 35,5 м; 3- обсадная колонна диаметром 70 мм; 4- шланги для подачи герметизирующих компонентов.

Рисунок 1 – Схема герметизации скважины

12.09.2015. Скважина была разбурена на 5 м штангами диаметром 50 мм.

14.08.2015. Был осуществлен замер начального дебита газа из скважины, который составил 10 л/мин, концентрация метана в смеси 81%.

Измерение нарастания пластового давления газа в скважине не производилось в виду ограниченного времени. Планируется демонтаж лавы 24-57 и перенос маслостанции.

07.09-15.09.2015. Были изготовлены и собраны необходимые переходники для подключения скважины к трубопроводу от маслостанции. Был изготовлен также тройник с краном для сбрасывания давления в рукавах после проведения ГРП. Кран для сброса давления в рукавах высокого

давления предназначен для того, чтобы можно было безопасно отсоединить рукава и подключить на следующую скважину для проведения гидровоздействия. Таким образом, появляется возможность в течение рабочей смены проводить эксперимент на нескольких скважинах.

14.09.2015. Подключили скважину к высоконапорному трубопроводу от маслостанции выемочного участка лавы 24-57 через гибкие рукава высокого давления. Схема подключения приведена на рисунке 2.

Произведено циклическое гидровоздействие – циклический гидроразрыв. Всего проведено 2 цикла. Каждый цикл завершался перерывом в подаче рабочей жидкости в связи с отключением маслостанции.

Оба цикла закачка велась при работе одной маслостанции с возможным темпом закачки **10 л/с**. Объем закачанной рабочей жидкости составил оценочно **10 м³**.

После окончания каждого цикла велись замеры по падению давления в скважине в период остановки закачки.

В середине второго цикла в **6, 16 и 20 метрах** от скважины в сторону заложения скважины №6 ПодзГРП зафиксирован капеж и неинтенсивное выделение эмульсии из кровли выработки в местах заложения анкеров для крепления монорельсовой балки.

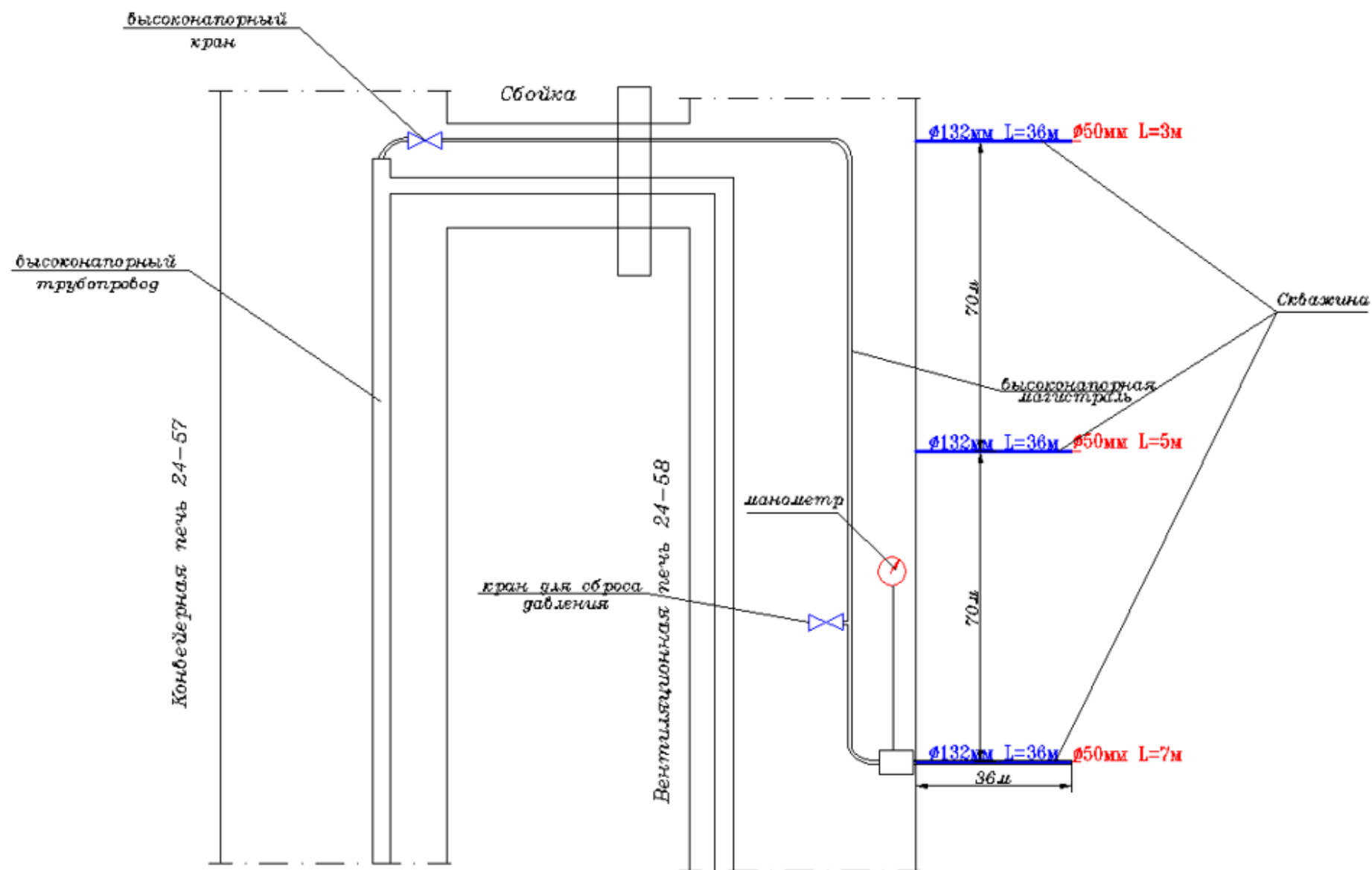


Рисунок 2 – Схема подключения скважины к высоконапорному трубопроводу

По окончанию всего процесса ГРП наблюдался площадной капеж и интенсивное выделение эмульсии с кровли на всю ширину выработки и на расстоянии **5 м** в сторону скважины №4 ПодзГРП и **10 м** в сторону скважины №6 ПодзГРП.

Ниже приведена таблица и график **изменения давления в пласте во времени** в ходе проведения ПодзГРП.

Таблица – Изменение давления в пласте в течение времени

Время нагнетания, мин:сек	Давление, бар
начало закачки, 1 цикл	
1.45	60
1.50	80
2.00	90
2.15	100
2.45	110
2.55	120
3.20	130
4.00	140
5.00	145
5.40	150
6.00	150
6.30	155
7.00	155
7.40	155
8.00	160
9.00	165
11.00	165
12.00	165
13.00	165
15.00	165
16.00	170
остановка закачки и выдерживание скважины под давлением	
16.30	160
17.10	150
17.30	140
17.50	140
18.40	135
20.10	130
23.10	120
29.10	110
начало повторной закачки, 2 цикл	
29.25	140
29.35	160
29.55	165

30.40	170
31.10	170
32.10	170
32.40	175
33.20	175
34.10	175
35.10	175
36.10	175
37.40	175
38.10	175
Остановка процесса закачки эмульсии в скважину, интенсивное поступление воды из борта в 30 см выше скважины, закрыли кран на скважине	

* время в таблице отмечено в минутах, после запятой идут секунды

Примечание. Закачка производилась циклически. В таблице отмечены отрезки выдерживания давления в скважине без закачки жидкости, на которых наблюдалось незначительное падение давления. С началом повторной закачки жидкости в пласт давление повышалось на некоторое значение. Максимальное значение давления при закачке составило **175 бар**. Предполагаемый радиус раскрытия трещин в массиве больше **36 м**.



Синим цветом обозначен процесс закачки жидкости в пласт, красным - процесс выдержки давления

После проведения гидроразрыва скважину закрыли на некоторое время, пока давление не спадет до величины безопасных значений, после чего должен быть произведен сброс давления и осуществлено измерение газовыделения из скважины. После проведения гидроразрыва давление в скважине упало **со 175 бар до 120 бар в течение 16 мин.** Спустя **20 мин** давление в пласте упало до величины **110 бар**; по истечении **24 часов** до **30 бар**, а **42 часов** до **0 бар**.

Темп падения давления в пласте после проведенного ПодзГРП представлен на рисунке 3.

18.09.15. Установившийся дебит метана из скважины составил **10 – 12 л/мин.** Затем скважину закрыли для определения кривой нарастания давления в соответствии с пунктом 7 «Программы и методики экспериментальных работ по апробации и оценке эффективности предварительной дегазации пласта «Болдыревский» на поле шахты им.С.М.Кирова (выемочный участок 24-58) с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин».

21.09.15. Произведено измерение давления в скважине №5 ПодзГРП, которое составило **17 бар**.

Намечены дальнейшие исследования по определению максимальных значений давления метана в скважине, близкие к пластовому давлению, динамики изменения метаноотдачи пласта в течение времени и оценка эффективности мероприятий по ПодзГРП в соответствии с указанными выше программой и методикой экспериментальных работ.

Падение давления в скважине после проведения гидроразрыва

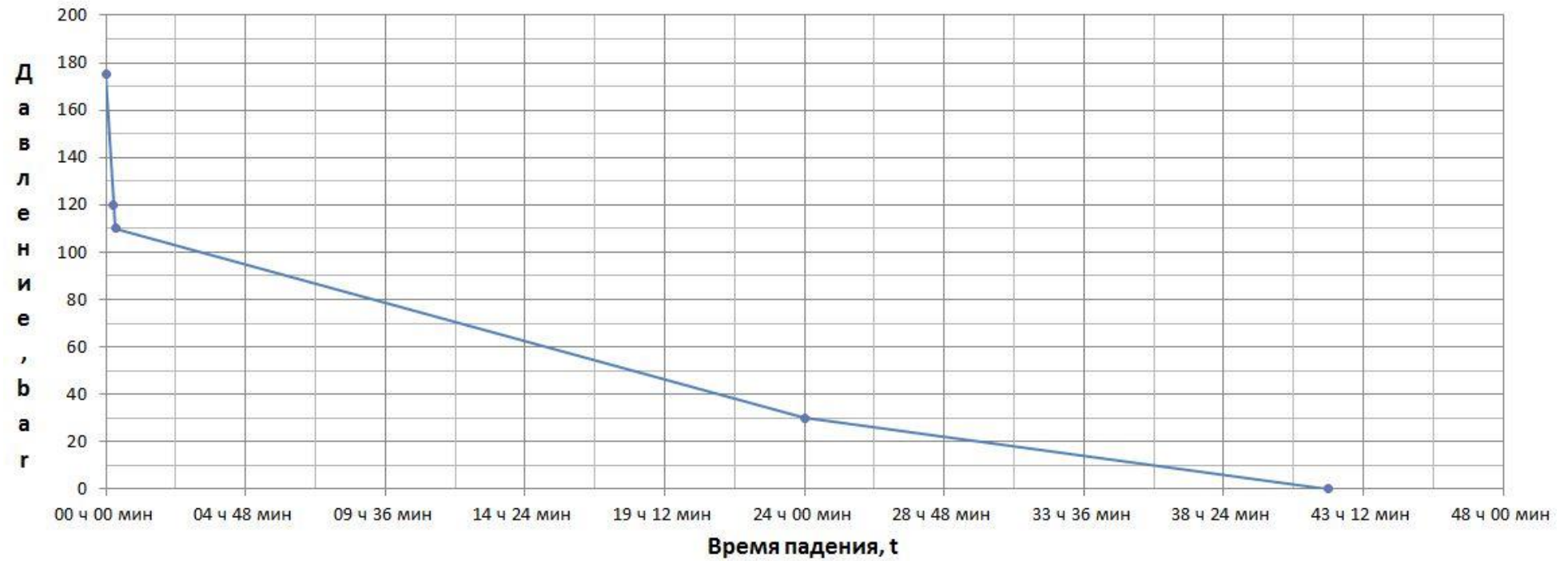


Рисунок 3 – Темп падения давления после ПодзГРП

от УДиУМ ОАО «СУЭК – Кузбасс»:

зам. директора по производству



Семькин Ю.А.

зам. главного инженера по технологиям



Комиссаров И.А.

инженер-технолог



Хаутиев А.М-Б.

зам. начальника участка №3



Демин С.Л.

от шахты им. С.М. Кирова:

зам. главного инженера по вентиляции



Малафеев А.В.

зам. начальника участка ВТБ



Агафонников А.С.

от Горного института НИТУ «МИСиС»:

руководитель НИР,
проф., д-р техн. наук



Сластунов С.В.

ведущий инженер



Пашенков П.Н.