

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Пашенков 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»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 гг. 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».

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.

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 максимально допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору.

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.

Исходя из изложенного для достижения поставленной цели в диссертационной работе были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Усовершенствовать аппаратное обеспечение определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях.

2. Разработать способ определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угля в натуральных условиях.

3. Провести апробацию способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в натуральных 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 натуральных условиях.

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 натуральных 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Мировая практика подземной разработки угольных пластов 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 *первой главе* анализируется современное состояние исследований в области определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угленосного массива и отбитого угля, способов прогноза газообильности очистного забоя и проблем угольного метана при разработке угольных месторождений.

Вторая глава посвящена разработке аппаратного обеспечения для определения параметров сорбции отбитого угля в лабораторных условиях. Многочисленные научные исследования свидетельствуют о том, что систематическое изучение свойств угля подсказывает наилучшие способы применения 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.

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.

Обзор существующих методов и средств определения параметров сорбции Ленгмюра для угля приведён в первой главе диссертационной работы. Однако каждый из рассмотренных способов 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 лабораторное оборудование для проведения эксперимента по определению сорбционных характеристик угля и построению изотермы Ленгмюра.

Как известно, процесс сорбции метана при постоянной температуре описывается уравнением сорбции Ленгмюра:

$$Q = \frac{abp}{1+bp} \quad (1)$$

где Q – текущая газоносность угля, м³/т;

a – предельная сорбционная метаноёмкость угля, м³/т;

b – коэффициент сорбции, 1/Па;

p – пластовое давление метана, Па.

В такой форме уравнение Ленгмюра широко известно. Оно содержит две константы a и b .

Предельная сорбционная ёмкость угля (параметр a) оказывает значительное влияние на возможные метановыделения из угольного пласта в горные выработки.

Для определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях автором предложена апробированная лабораторная аппаратура, принцип работы которой описан ниже. Для проведения эксперимента применяется герметичный пневмоцилиндр высотой 2 м и диаметром 30 мм по внутренней стенке, который установлен в специальный удерживающий его стационарный каркас, выполненный из металла. На поддоне располагается стакан, соединяемый гибким шлангом высокого давления с цилиндром. На крышке стакана предусмотрен манометр. Стакан служит для размещения в нём пробы угля.



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

Рисунок 1 – Лабораторная установка для определения параметров сорбции

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. Алгоритм операций описан в методике, представленной в приложении А диссертационной работы.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента по определению параметров сорбции 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

Из результатов эксперимента имеем две точки:

1) $q_1=4,6$ м³/т; $P_1=3$ бар.

2) $q_2=10,8$ м³/т; $P_2=9$ бар.

Тогда из уравнения Ленгмюра (1) можно вычислить параметры a и b , соответствующие этому уравнению:

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

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

При этом изотерма Ленгмюра показана на рисунке 2.

В *третьей главе* представлена разработка способа определения сорбционно-кинетических и фильтрационных свойств угольного пласта по результатам натуральных экспериментов. Представлены результаты экспериментов по определению пластового давления, проницаемости и сорбционных свойств угольного пласта на основании натуральных испытаний. На основании этих результатов была разработана методика определения

газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта, использующая как прямые, так и косвенные измерения.

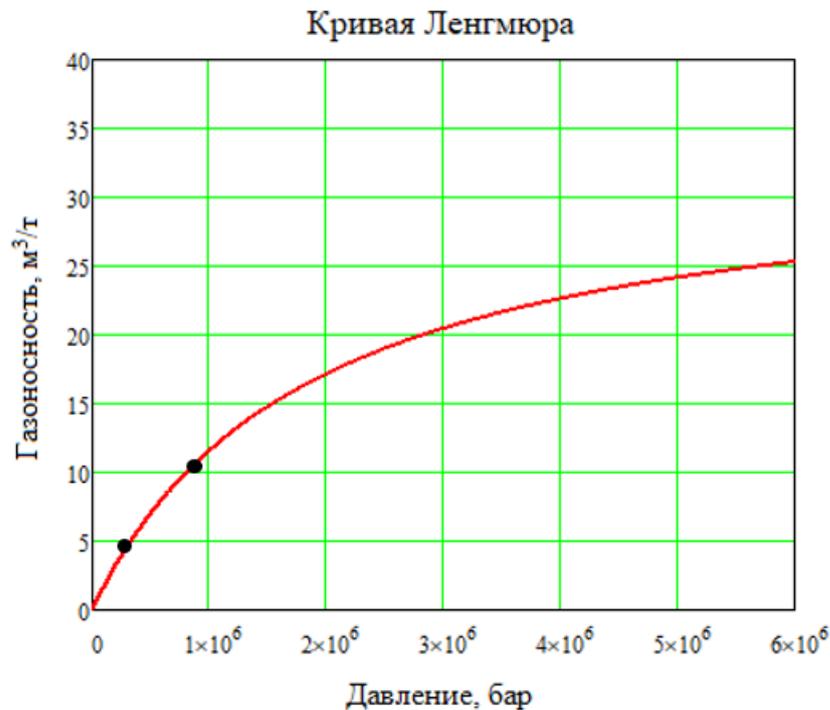


Рисунок 2 – Изотерма Ленгмюра, построенная по результатам лабораторного эксперимента

Для определения констант сорбции Ленгмюра существуют достаточно апробированные лабораторные методики, предусматривающие насыщение угольного образца метаном и измерение массы сорбированного метана в зависимости от его давления. Автор представляет альтернативный способ определения констант Ленгмюра. Достоинством данного способа является возможность оперативного получения дополнительной информации в рамках проводимых шахтных испытаний на масштабном объекте – непосредственно в угольном пласте в его естественных условиях залегания.

Главная идея заключается в последовательном измерении в течение времени дебита метана из открытой дегазационной скважины и последующем измерением давления метана в этой же, но закрытой, скважине. Искомые характеристики находят из решения задачи

массопереноса метана путем обработки экспериментальных данных и сопоставления измерений с теоретической моделью этого процесса в дегазационную скважину.

В качестве основополагающего дифференциального уравнения массопереноса метана в угольном пласте использовано уравнение, которое учитывает закон сохранения массы, закон Дарси, уравнение Ленгмюра и в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\Pi \rho + (1 - \Pi) \frac{abP}{1+bP} \right] - \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} P \right) = 0 \quad (2)$$

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.

Точного аналитического решения уравнения (2) не существует, поэтому для практических целей выполняется моделирование методом конечных элементов в программном продукте COMSOL Multiphysics, позволяющим решать подобные задачи при заданных краевых условиях.

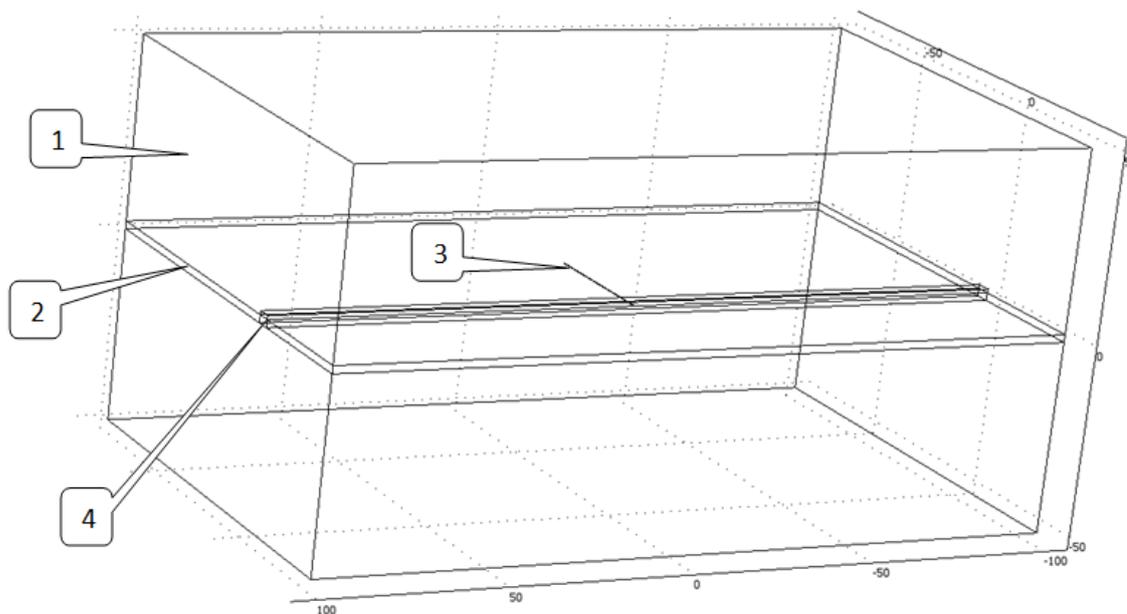
Анализ уравнения (2) показывает, что необходимо определить четыре неизвестных параметра: пластовое давление метана, коэффициент газопроницаемости угольного пласта вокруг дегазационной скважины и две константы, входящие в изотерму сорбции Ленгмюра в соответствии с уравнением (1). Значения остальных параметров, входящих в уравнение (2), указаны в справочной литературе, а коэффициент пористости известен по данным геологоразведки, либо определяется в лаборатории по известным методикам.

Определим сначала пластовое давление метана, которое соответствует установившемуся режиму нарастания давления газа в закрытой дегазационной скважине. Очевидно, решение уравнения (2) в установившемся режиме не зависит от газопроницаемости угля и констант Ленгмюра, 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 средствами программного обеспечения COMSOL Multiphysics. На рисунке 3 представлен объект моделирования в виде короткой скважины, пробуренной в угольный пласт из вентиляционного штрека.



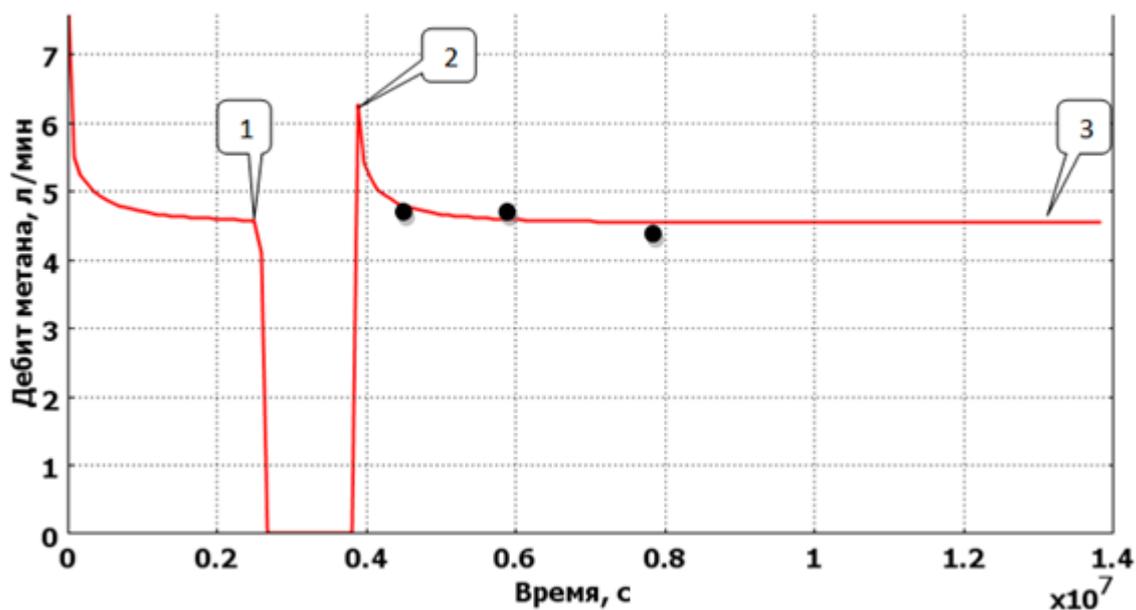
1 – вмещающие породы; 2 – угольный пласт; 3 – экспериментальная скважина; 4 – выработка (вентиляционный штрек)

Рисунок 3 – Модель короткой скважины в угольном пласте

Фильтрационные характеристики угольного пласта определены на основе сопоставления данных эксперимента с теоретической зависимостью, представленной на рисунке 4. Теоретическая зависимость устанавливалась методом вариации параметров Ленгмюра, проницаемости пласта при фиксированном пластовом давлении метана в процессе компьютерного моделирования.

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



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

Рисунок 4 – Теоретическая зависимость и экспериментальные точки

Представленный методический прием определения констант Ленгмюра и пластового давления дополняет лабораторные методики и имеет перспективу использования при моделировании задач пластовой дегазации. При этом, если имело место гидровоздействие на угольный пласт через скважину, вычисленный коэффициент проницаемости не следует принимать в качестве характеристики коллекторских свойств пласта, поскольку гидравлическая обработка вносит коррективы из-за нарушения природной целостности пласта.

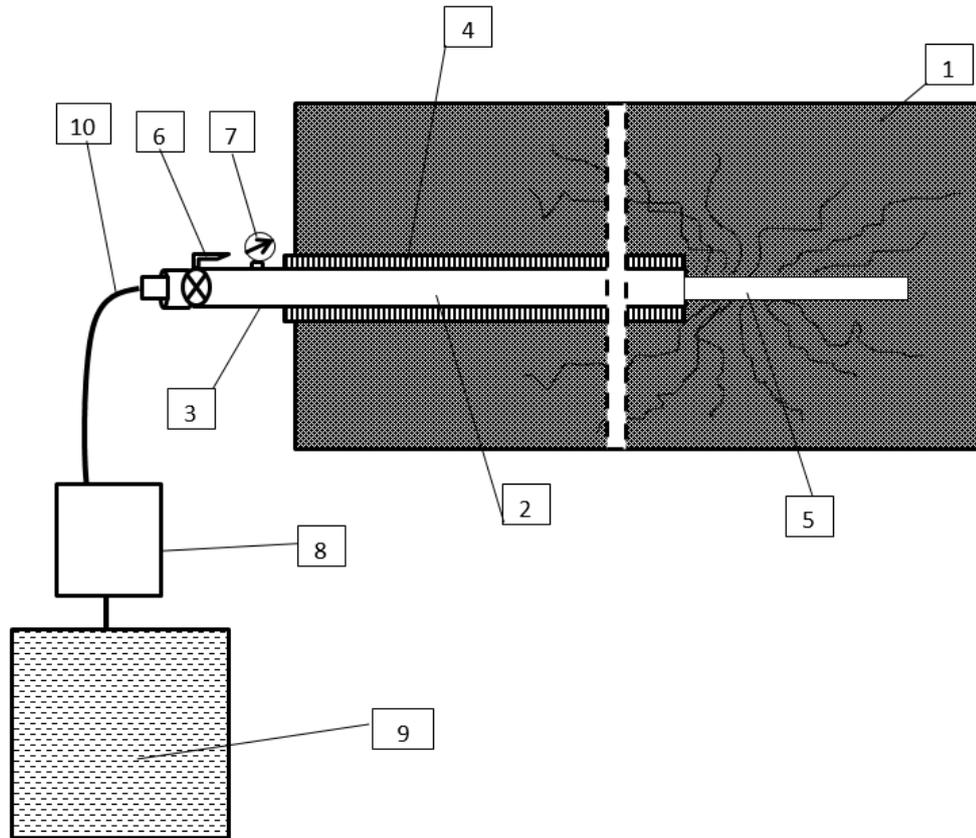
Что касается пластового давления метана, то базовая методика, используемая для определения этого параметра в условиях ряда шахт АО «СУЭК-Кузбасс» нуждается в совершенствовании, поскольку предполагает длину герметизации пластовой скважины на глубину 6 м, а как показывает практика, случаи неудовлетворительной герметизации случаются довольно часто, что обусловлено высокой трещиноватостью угольного пласта в зоне вблизи штрека, достигающей до 20 м. Базовая методика допускает увеличение глубины герметизации устья скважины, однако существенным

недостатком базового варианта 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 достоверной информации о пластовом давлении метана и сорбционных параметрах угольного пласта не позволяет принимать оперативные технические решения, направленные на оптимизацию очистных работ, что в конечном результате понижает их безопасность. В связи с изложенным, был усовершенствован существующий вариант измерения пластового давления и запатентован новый способ определения пластового давления. В результате реализации предложенного способа повышается достоверность и оперативность определения пластового давления метана, а также сорбционных и фильтрационных параметров угольного пласта в его исходном и влажном состояниях.

Способ поясняется рисунком 5, где показана схема обустройства скважины и применяемое технологическое оборудование.

Практическая реализация усовершенствованного способа определения пластового давления 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 пробурена скважина длиной 36 м. Глубина заложения – 440 м. Обсадка скважины произведена стальными трубами диаметром 70 мм при толщине стенки – 5 мм. Пространство между стенками скважины 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. Далее в скважину осуществили нагнетание воды под предельным давлением 14 МПа. Скважину закрыли и выдержали

под давлением в течение 4 суток. Результаты измерений давления воды представлены на рисунке 6. По результатам замеров давления воды в скважине принимаем т.н. верхний предел (P_B) пластового давления равным 3,2 МПа.



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 5 – Схема проведения эксперимента по определению пластового давления метана

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 (P_H) пластового давления. Результаты измерений представлены на рисунке 7. По результатам замеров давления газа в скважине принимаем нижний предел пластового давления равным 3,1 МПа.

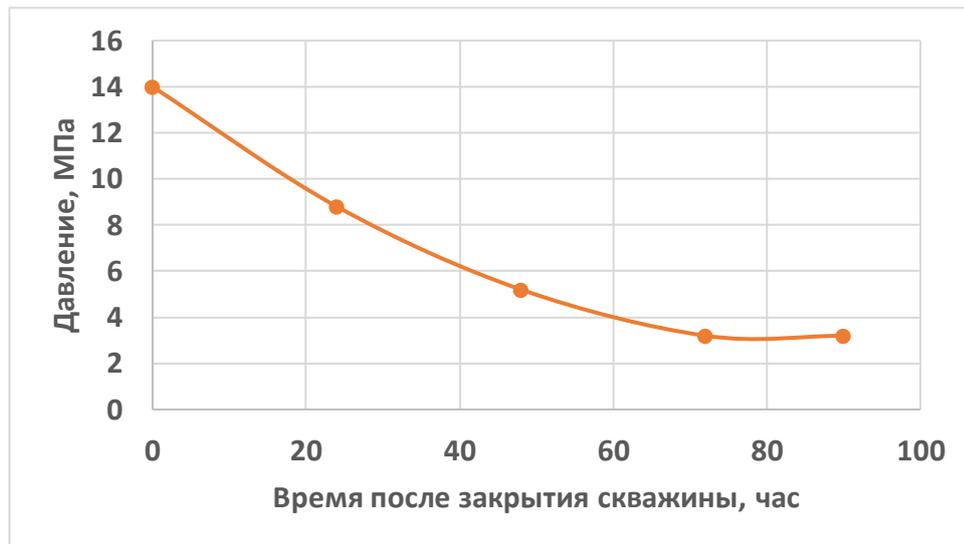


Рисунок 6 – Давление воды в скважине

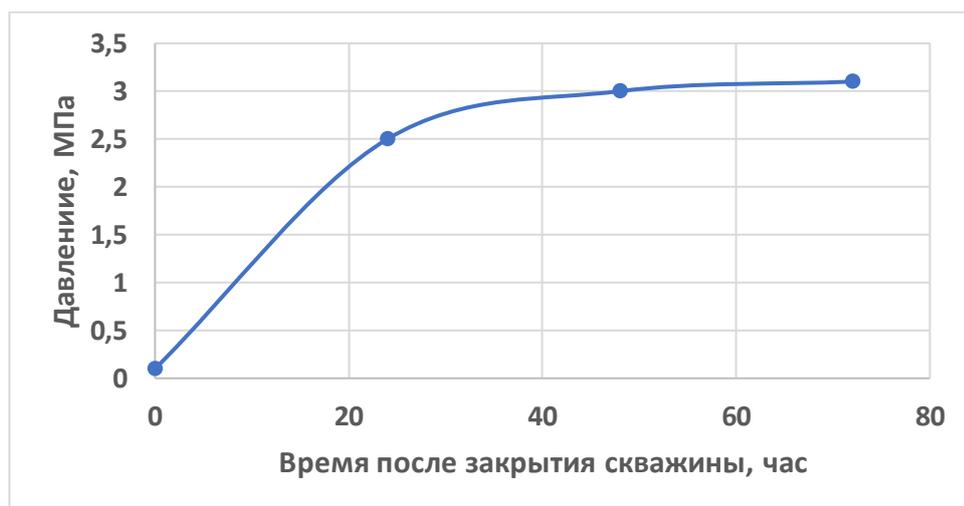


Рисунок 7 – Давление метана в скважине

Таким образом, истинное пластовое давление метана определяется как среднее арифметическое верхнего и нижнего пределов пластового давления, и в экспериментах эта величина принимала значения в диапазоне 3,1...3,2 МПа. Стоит отметить, что величина пластового давления, измеренная таким способом, является более близкой к действительному значению, по сравнению с измерением давления газа в закрытой скважине без гидровоздействия на пласт в силу того, что при гидровоздействии в пласте

создаются новые трещины (гидроразрыв) или раскрываются существующие каналы проницаемости (гидрорасчленение), и в целом задействуется более масштабный участок пласта, поэтому приток газа в скважину осуществляется из более широкой зоны повышенной проницаемости, что ускоряет определение пластового давления и уточняет этот параметр для большей зоны.

Четвёртая глава содержит описание усовершенствованной методики прогноза газообильности очистного забоя. Представлено описание методики и результаты расчёта, а последовательность расчётов продемонстрирована в приложении В диссертационной работы. Представлены результаты исследования, доказывающие значительное влияние параметра Ленгмюра a (предельная сорбционная метаноёмкость) на газообильность очистного забоя.

Разработанные рекомендации по определению пластового давления метана и сорбционных свойств угольного пласта и отбитого угля по результатам лабораторных и натурных экспериментов позволяют усовершенствовать разработанную за последние годы учёными НИТУ «МИСиС» и АО «СУЭК-Кузбасс» методику прогноза газообильности и максимально допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору. Исходные данные, необходимые для произведения расчёта, состоят из параметров системы разработки, физических свойств углепородного массива, фундаментальных свойств метана, а также характеристик работающего в лаве добычного оборудования.

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.

Технологические параметры системы разработки и технические данные очистного оборудования берутся из соответствующей технической документации.

Оперативный прогноз газообильности и максимально допустимой нагрузки на очистной забой производят при помощи компьютерной программы расчёта, полученные результаты используют при планировании очистных работ на предстоящие рабочие смены.

Выполненный оперативный прогноз газообильности (13,5 м³/т) и предельно допустимой нагрузки на забой по фактору газа (15,8 тыс.т/сут – для влажного пласта) позволил установить, что прогноз газообильности необходимо осуществлять на основе использования в расчётах параметров сорбции, полученных по результатам шахтных замеров непосредственно в угольном пласте.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с:

- увеличением количества шахтных экспериментов с использованием разработанной методики определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки, направленное на уточнение искомых параметров в пределах выемочного столба в различных горно-геологических условиях;
- установлением оптимальных параметров гидровоздействия на угольный пласт (времени воздействия, темпа нагнетания рабочей жидкости, объёма закачанной жидкости и пр.).

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 давление метана.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

1. 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.

2. Пащенко П. Н. Нагрузка на очистной забой по газовому фактору в зависимости от влажности угольного пласта// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017. – №1. – С. 396-403.

3. Пащенко П.Н. О влиянии параметров сорбции Ленгмюра на газообильность очистного забоя и производительность отработки угля// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017. – №9. – С. 225-229.

4. Пащенко П.Н. Способ определения параметров изотермы сорбции Ленгмюра и газопроницаемости дисперсных фракций угля// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018. – №2. – С.120-128.

5. Пащенко П.Н., Гаврилов В.И. Методика определения газокинетических и фильтрационных свойств угольного пласта в условиях его гидравлической обработки// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018. – №1 (Спецвыпуск №3). – С. 30-37.

6. Мазаник Е.В., Позин А.В., Сластунов С.В., Пащенко П.Н. Шахтные исследования усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта в целях его эффективной предварительной дегазации// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018. – №1 (Спецвыпуск №3). – С. 16-22.

7. Пащенко П.Н., Хаутиев А.М.-Б., Мазаник Е.В. Методика и результаты определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях// Горный информационно-аналитический бюллетень, специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства», 2018. – №6. – С. 54-60.

8. 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».