На правах рукописи

Кормин Алексей Николаевич

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И ДИФФУЗИИ МЕТАНА

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2015

Работа выполнена в Лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте угля Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Тайлаков Олег Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», проректор по научной работе и стратегическому развитию

Официальные оппоненты: Фрянов Виктор Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», зав. кафедрой геотехнологии

Киряева Татьяна Анатольевна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр»

Защита диссертации состоится « 18 » декабря 2015 г. в 13.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (384-2) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу
http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/

Автореферат разослан « 18 » ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета В.В. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная добыча угля подземным способом характеризуется отработкой газоносных угольных пластов с применением высокопроизводительного горно-шахтного оборудования, эффективность функционирования которого зависит от горно-геологических условий и зачастую ограничивается газовым фактором. Существенное значение для повышения объемов и безопасности добычи угля имеет совершенствование систем и средств дегазации угольных пластов, при проектировании которых необходимо использовать информацию о газоносности угольных пластов, обусловливающую интенсивность поступления метана в горные выработки при разгрузке углепородного массива.

Для определения метаноносности угля применяют прямые и косвенные методы. Прямые методы основаны на отборе угольных кернов при бурении с поверхности вертикальных геологоразведочных скважин и определении объема газа, выделяющегося из угольных проб в лабораторных условиях. При этом плотность сетки скважин не всегда достаточна для корректной оценки газоносности угля, которая на разрабатываемых участках угольных пластов может существенно отличаться от метаноносности, определенной на этапе геологической разведки, вследствие их разупрочнения, сопровождающегося выделением метана.

Определение газоносности угля косвенными методами основывается на анализе фактической метанообильности действующих выработок и установлении газового баланса выемочных участков по источникам газовыделения. Однако в процессе измерения метан поступает в горные выработки не только из рабочего угольного пласта, но также из выработанного пространства, вмещающих пород и пластов спутников. Таким образом, определяется общее выделение газа без его разграничения по отдельным источникам в углепородном массиве, что снижает достоверность оценивания пространственного распределения плотности ресурсов метана. Поэтому для формирования массивов данных, которые дополняют и/или уточняют информацию о метаноносности, полученную с помощью известных методов, необходимо разработать, обосновать и практически внедрить подход, основанный на применении фундаментальных закономерностей фильтрации и диффузии метана для обработки и интерпретации результатов регистрации макрокинетических процессов его десорбции из угольных проб, которые извлекаются с помощью скважин, пробуренных из горных выработок в угольный пласт с применением кернонаборника.

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института угля Сибирского отделения Российской академии наук по проектам 25.2.4 «Экспериментально-аналитические основы механики газоводоносных геоматериалов» на 2004-2006 гг.; 123 «Геомеханические и физико-химические процессы интенсификации десорбции и миграции метана из угольных пластов» на 2009-2011 гг.; VII.60.3.1 «Обеспечение освоения углегазовых

месторождений на основе мониторинга физических процессов в углепородном массиве» на 2011-2012 гг., «Теоретическое обоснование и разработка метода оценки эффективности дегазации угольных пластов на основе прямых измерений газоносности» на 2013-2014 гг.

Целью работы является разработка и обоснование метода оценки остаточной газоносности угольных пластов с учетом динамики процессов фильтрации и диффузии метана на основе определения его содержания в кернах, обеспечивающего контроль эффективности дегазации углепородного массива.

Идея работы заключается в сохранении локального термодинамического равновесия при извлечении угольных проб из горизонтальных скважин, пробуренных в глубь массива, с последующим определением объема метана, выделившегося в процессе его десорбции в лабораторных условиях, и восстановлением объема упущенного газа с момента извлечения до размещения керна в измерительную систему методом обратной экстраполяции.

Задачи исследований:

– обосновать технологические параметры устройство для отбора угольных образцов в скважинах, пробуренных из горных выработок угольных шахт;

– определить границы участков процесса десорбции, соответствующих изменению скорости фильтрации при метановыделении из угольных проб, для формирования лабораторных термодинамических условий, обеспечивающих достоверную оценку газоносности угольных пластов;

– экспериментально оценить кинетику газоотдачи угольных проб для разработки методики определения метаноносности угля при ведении горных работ.

Методы исследований:

– систематизация и научное обобщение известных методов определения газоносности угольных пластов, применяемых в горном деле;

– методы оценки скорости десорбции метана (объемный метод) и коллекторских свойств углей;

– регрессионный анализ при обработке экспериментальных данных.

Объект исследования – участок угольного пласта, ограниченный горными выработками.

Предмет исследований – процессы фильтрации метана в угольных пластах.

Научные положения, защищаемые автором:

– двухсекционный кернонаборник с длиной наборной части 0,35 м и диаметром буровой коронки 0,076 м обеспечивает отбор угольных кернов с помощью скважин, пробуренных из горных выработок угольных шахт, с коэффициентом кернообразования K_o не хуже 0,89;

– снижение скорости метановыделения в лабораторных экспериментах в 1,3÷1,5 раза на границе участков десорбции характеризует переход процесса фильтрации в область диффузии газа при термостатировании исследуемых углей со степенью отражения витринита R_0=0,9÷0,7 и температуре, соответствующей естественным условиям их залегания;

– продолжительность линейного процесса десорбции метана не превышает 10-25% общего времени газоистощения угольного керна и обусловливает возможность восстановления объема упущенного газа методом обратной экстраполяции на этом участке десорбционной кривой с последующими прямыми измерениями объема выделения метана из угольных проб в методике определения газоносности угля.

Научная новизна работы заключается:

– в обосновании параметров кернонаборника, позволяющего отбирать угольные керны с поддержанием естественной температуры угольного пласта, соответствующего натурным условиям его залегания;

– в развитии подхода к определению остаточной газоносности угля, основанного на регистрации границ газокинетических процессов десорбции метана из угля и обеспечивающего поддержание в лабораторных измерениях термодинамического равновесия, которое соответствует естественным условиям залегания угольного пласта при отборе из него кернов;

– в обосновании прямого метода определения газоносности угля при отборе угольных проб из скважин, пробуренных в углепородный массив из горных выработок шахт, который позволяет корректно определить объем упущенного газа.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

– значительным объемом проведенных лабораторных исследований 160 проб, отобранных из угольных пластов № 48, 50, 52, 70, Бреевский, Поленовский и Байкаимский в Кузнецком угольном бассейне;

– положительными результатами апробации методики определения газоносности угольных пластов в условиях действующих шахт Кузбасса;

– представительными объемами шахтных экспериментов и лабораторных измерений, удовлетворительной сходимостью геологоразведочных данных и значений газоносности угля, полученных на основе разработанного подхода.

Личный вклад заключается:

– в разработке и изготовлении кернонаборника для отбора угольных проб в технологических скважинах, пробуренных из горных выработок шахт;

– в анализе результатов теоретических и лабораторных исследований, направленных на определение скорости газовыделения для регистрации перехода линейного процесса фильтрации в нелинейную область диффузии газа;

– в организации и участии в проведении шахтных и лабораторных экспериментов по измерению объемов выделившегося метана из угольных проб, отобранных в горных выработках, внедрении полученных результатов на угледобывающих предприятиях Кузбасса для оценки газоносности угля;

– в разработке и апробации метода определения газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ.

Научное значение работы состоит в совершенствовании метода оценки газоносности угольных пластов на основе изучения макрокинетических процессов фильтрации метана в образцах угля, извлекаемых с применением про-

буренных из горных выработок скважин с использованием шахтного керноноборника.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в обосновании подхода к оценке остаточной газоносности угля на основе процессов фильтрации метана и определении объема упущенного газа при извлечении угольных кернов из скважин, пробуренных в горных выработках шахт, в разработке и применении оригинальной конструкции керноноборника, позволяющего поддерживать квазипостоянную температуру угольного пласта, соответствующую натурным условиям его залегания.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения разработанной методики для определения газоносности и оценки эффективности дегазации угольных пластов, уточнения схем и параметров проветривания горных выработок. При этом полученные значения метаноносности могут быть использованы для установления критических глубин проявления и энергетической возможности внезапных выбросов угля и газа.

Реализация результатов работы в промышленности. Основные положения разработанного подхода изложены в методике ФР.1.292010.07454 «Определение газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ», зарегистрированной в Федеральном реестре методик, и использованы при выполнении научно-исследовательских работ по «Определению газоносности угольного пласта «Байкаимский» на шахте «Заречная» (2008 г.) и «Оценке газоносности угольных пластов в пределах выемочного столба 48-2 шахты «Ерунаковская-VIII» (2013 г.).

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на 2-й школе-семинаре молодых ученых России «Проблемы устойчивого развития региона» (Улан-Удэ, 2001); на совместном заседании Президиума КемНЦ СО РАН и Ученого совета Института угля и углехимии СО РАН, посвященного Дню Российской науки (Кемерово, 2002); на научно-технической конференции «Шахтный метан: прогноз, управление, использование» (Кемерово, 2002); на I Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 25-летию ИПКОН РАН «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых» (Москва, 2002); на V Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2002); на международной конференции «The International Coalbed Methane Symposium» (США, Таскалуза, Алабама, 2003); на VIII Всероссийской научно-практической конференции (Томск, 2004); на научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2010); на молодежной конференции «I-ые Усовские чтения в Кузбассе» (Кемерово, 2010); на Международном семинаре «Эффективные методы извлечения и переработки угольного метана» (Кемерово, 2011); на обучающем семинаре для сотрудников Ростехнадзора «Эксплуатация производств и объектов угольной промышленности» (Кемерово, 2011); на научном симпозиуме «Неделя горняка – 2011» (Москва, 2011); на международной научно-практическая

конференции «Подземные горные работы – 21 век» (Ленинск-Кузнецкий, 2013); на пятом научно-практическом семинаре «Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы» ФГБОУ ВПО «Российский Государственный Университет нефти и газа имени И.М. Губкина» (Москва, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 13 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэродинамика и горная теплофизика».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 112 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц, 25 рисунков и список литературы из 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе содержится обзор известных методов и оборудования, которые применяются для оценки газоносности угольных пластов и приводится их сопоставительный анализ. Рассмотрено состояние изученности влияния геомеханических процессов на закономерности перемещения метана в углепородном массиве.

Аналитический обзор существующих методов определения газоносности угольных пластов показал, что одним из наиболее распространенных является прямой метод, основанный на отборе угольных образцов при проведении геологоразведочных работ с последующим измерением содержания в них метана. При этом из-за низкой надежности срабатывания специальных герметичных керногазонаборников применяют обычные устройства для отбора проб, а расчет газоносности проводится с учетом поправочных коэффициентов от 1,1 до 1,25 в зависимости от угольного бассейна, что приводит к снижению достоверности оценки объемов выделившегося газа. Также при бурении геологоразведочных скважин применяют метод, основанный на использовании непрерывного газового каротажа выходящей из скважины промывочной жидкости. В шахтных исследованиях газоносность изучают по газовыделению при бурении скважин и по газовым съемкам в очистных и подготовительных выработках расчетными методами. При этом не учитываются закономерности изменения фильтрационных свойств в углепородном массиве в результате ведения горных работ, обусловленные разгрузкой от горного давления вмещающих пород. Изучению особенностей пространственного распределения газа в угольных пластах и кинетики метановыделения посвящены работы научных коллективов ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр РАН, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», ОАО «НЦ ВостНИИ», ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина», ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», ФГБОУ

ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», ОАО «ВНИМИ», АО «Газпром промгаз», ОАО «ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского». Практические измерения газоносности угольных пластов на этапе геологоразведочных работ выполняет ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр». Для совершенствования подхода, позволяющего проводить оценку газоносности угля в пределах разрабатываемого участка, выбран прямой метод, основанный на отборе угольных кернов из скважин, пробуренных в горных выработках шахты, сформулирована цель и основные задачи.

Вторая глава посвящена рассмотрению макрокинетических процессов десорбции метана из угля на основе теории фильтрации и диффузии. Представлены результаты испытаний шахтного кернонаборника, определены его рациональные технологические параметры для отбора угольных проб с учетом термодинамических характеристик, а также установлена зависимость времени выбуривания кернов от влияющих факторов (крепость и степень метаморфизма угля).

При опробовании угольных пластов на газоносность с земной поверхности широко применяются специальные устройства – кернонаборники. Для совершенствования существующих устройств отбора угольных проб разработана оригинальная конструкция шахтного кернонаборника, позволяющая отбирать керны в подземных горных выработках с сохранением термодинамических параметров отобранных проб угля, близких к природным условиям. Известно, что интенсивность газовыделения в процессе отбора угольных проб, в основном, зависит от температуры и характера дифференциальной пористости угля, а общее количество выделившегося метана - от выхода летучих веществ. Поэтому опробования кернонаборника проводились на углях с разными физико-техническими характеристиками. При этом их эффективность оценивалась системой показателей

$$\begin{cases} B_K = \dfrac{h_k}{H_C}; \\ K_0 = \dfrac{d_k}{D_c}\ ; \\ k_n = \dfrac{d_k}{h}. \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь $B_к$ – вынос керна; K_0 – коэффициент кернообразования, предложенный проф. Д.Е. Брентли; k_n – коэффициент керноприема; h_k – расстояние от керноприема до забоя скважины; H_c – длина скважины; $d_к$ – диаметр выбуриваемого керна; D_c - диаметр скважины; h – высота керноприема.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты испытаний трех типов кернонаборников с учетом временных характеристик выбуриваемых угольных проб, коэффициентов крепости угля, а также усредненных коэффициентов

кернообразования $\overline{k_o}$, керноприема $\overline{k_n}$ и показателям выноса керна $\overline{B_K}$. Сопоставительный анализ показал, что преимуществами III типа кернонаборника являются простота конструкции и наибольший коэффициент керноотбора (до 0,7). При этом время выбуривания образца составляло 1200-1620 с при длине керна 0,3 м и его диаметре 0,062 м. С применением шахтного кернонаборника III типа отобрано 85 угольных проб, по которым определялся объем выделившегося метана в зависимости от времени десорбции при нормальном давлении и температуре для образцов, имеющих разную стадию метаморфизма и физические свойства (дисперсную структуру, пористость).

Для кернонаборника I типа усредненный коэффициент керноприема $\overline{k_n}$ ниже на 10 -15 % в сравнении с кернонаборниками II и III типа. При этом время выбуривания с применением кернонаборника III типа выше, что снижает влияние эффекта затирания и перегрева угольной пробы для сохранения целостности ее структуры.

Таблица 1

Результаты испытаний кернонаборников при выбуривании проб на углях с коэффициентом крепости f = 0,7-2,2 по шкале проф. М.М. Протодьяконова

Тип шахтного керно-наборника	Марка угля	Время выбуривания пробы, T_d, мин	K_o	$\overline{K_0}$	k_n	$\overline{k_n}$	B_k	$\overline{B_k}$
I	*КС*	20-30	0,50	0,58	1,52	1,48	67	70
	ДГ	12-20	0,56		1,45		72	
	Г	10-15	0,7		1,48		70	
II	*КС*	18 – 20	0,35	0,55	1,46	1,54	70	70,6
	ДГ	26 - 27	0,62		1,58		70	
	Г	13 - 14	0,7		1,6		72	
III	*КС*	17 - 19	0,45	0,60	2,0	2,08	75	78,3
	ДГ	25 - 27	0,65		2,1		80	
	Г	10 - 13	0,7		2,14		80	

В конструкции кернонаборника II предусмотрен внутренний цилиндр для набора проб, что позволяет подавать промывочную жидкость через буровые штанги и тем самым охлаждать стенки кернонаборника при выбуривании угольных кернов. При этом скорость выбуривания образца составляет 720-1200 с при длине керна 0,3 м и ∅ 0,062 м. В III варианте усовершенствованы коронки на внутреннем и наружном цилиндрах кернонаборника, что обеспечило скорость выбуривания 1200-1620 с. С вероятностью 0,17 отношение объемов отбираемых проб угля и внутренней полости кернонаборника составляет 0,98.

На рис. 2 представлена конструкция шахтного кернонаборника III типа, предназначенного для отбора проб из углепородного массива на любом произвольном расстоянии от борта горной выработки.

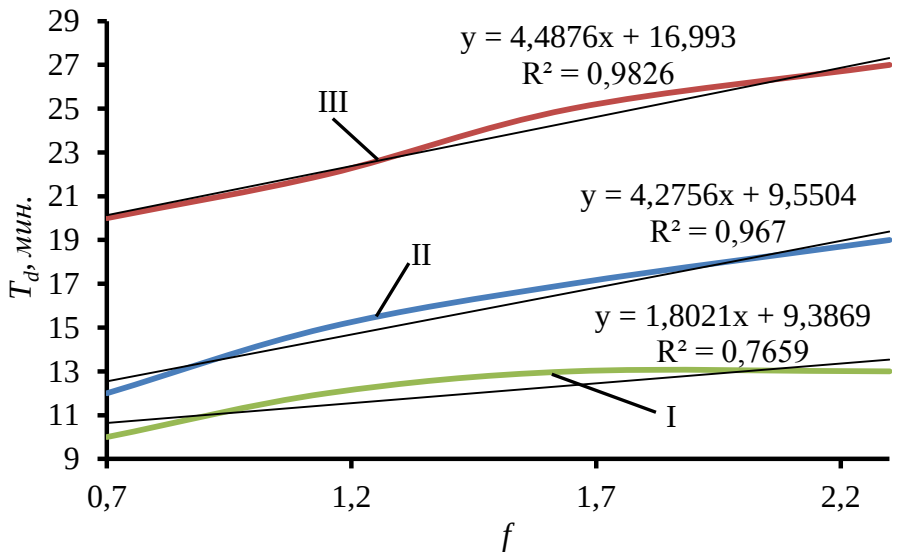


Рис. 1. Зависимость времени выбуривания T_d угольной пробы от коэффициента крепости угля *f*, полученная в шахтных условиях для угля марки *ДГ* при использовании кернонаборников I-III типа

Подача кернонаборника вглубь массива осуществляется с помощью буровых штанг через скважину, пройденную буровым станком.

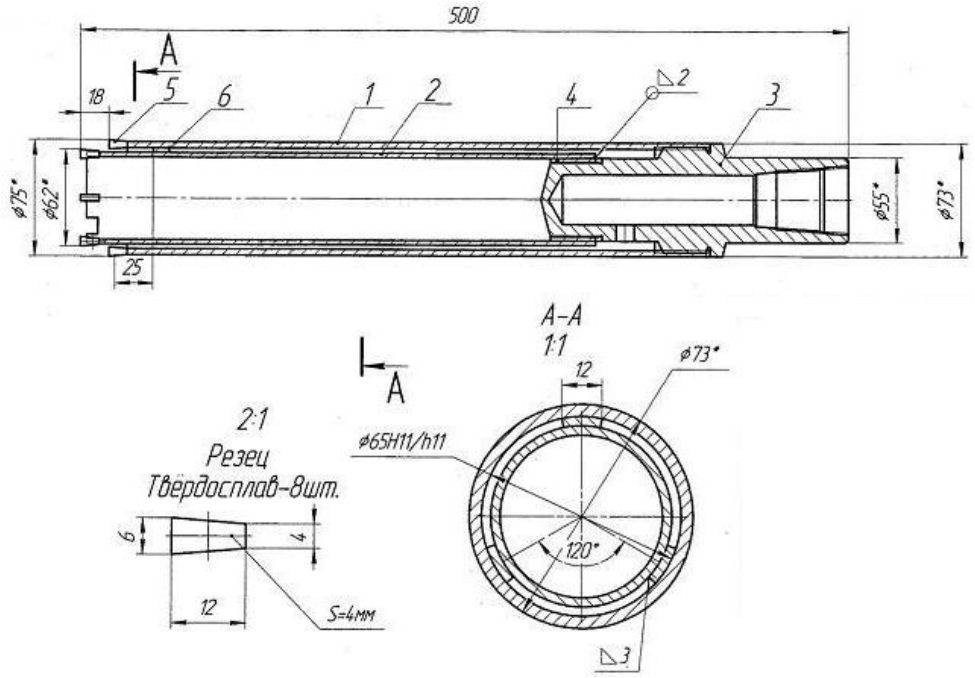


Рис. 2. Конструкция кернонаборника для отбора и транспортировки угольных проб:
1 – наружный цилиндр; 2 – кернонаборная часть;
3 – хвостовик для крепления к буровым штангам; 4 – резьбовое соединение;
5 – буровая коронка; 6 – центрующий блок

В состав устройства для отбора угольных кернов входит три узла: корпус, керноприемная часть и хвостовик, которые соединены между собой двухзаходными резьбовыми соединениями. В конструкции кернонаборника

предусмотрены отверстия для подачи охлаждающей жидкости, поступающей через буровые штанги. Для данного типа керонаборника обобщен принцип действия механического устройства, основанный на отборе керна при помощи буровой коронки, которая разрушает породу по радиусу скважин. Герметизация керна осуществляется в торце керноприемной части механизма длиной 0,02-0,05 м, которая образуется непосредственно в забойной части скважины. Этот фрагмент керна удаляется и не используется в дальнейших измерениях. В процессе шахтных испытаний установлена необходимость увеличения времени выбуривания на 480-600 с и снижения частоты вращения бурового инструмента до 0,83 об/с, так как при интенсивном вращении керонаборника 1,3-1,5 об/с происходит нагрев пробы до 70 °С.

В процессе ведения горных работ происходит нарушение целостности углепородного массива, что инициирует процесс массопереноса метана – его десорбцию в область пониженного давления. Известно, что связь молекул метана с углем определяется силами Ван-дер-Вальса, а его истечение из угольного пласта заключается в двух последовательных процессах – фильтрации и диффузии. Массоперенос метана по системе открытых пор, трещин и каналов, сообщающихся с внешней поверхностью угольного пласта, происходит путем фильтрации. Процесс переноса молекул метана из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией является диффузией и описывается вторым законом Фика, который учитывает пространственное и временное изменения концентрации метана в зависимости от температуры.

Для определения эмпирической формы связи газоносности угольных проб со временем ее газоистощения проанализирована математическая связь фильтрации и диффузии метана. На основе фактических измерений процесс десорбции метана аппроксимировался пятью математическими функциями:

$y = a_0 e^{(b_1 x)}$ – экспоненциальная связь;

$y = b_0 + b_1 \times ln(x)$ – логарифмическая связь;

$y = b_0 + \frac{b_1}{x}$ – гиперболическая связь;

$y = b_0 + x^{b_1}$ – степенная связь;

$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$ – квадратичная связь.

Здесь a_0, b_0; b_1; b_2; – параметры регрессионных кривых; y – выделившейся объем газа; $x=\sqrt{t}$; t – время эксперимента, мин.

Сравнение качества аппроксимации проводилось на основе обработки экспериментальных данных измерения газоносности угольных проб, отобранных с применением разработанного шахтного керонаборника на шахтах «им. С.М. Кирова», «Котинская», «Комсомолец», «№ 7», «Талдинская-Западная-2», «Заречная», «Полысаевская». Значения критерия Фишера, собственно характеризующего качество аппроксимации, составили 2,22 для экспоненциальной связи; 3,72 - логарифмической; 2,27 – гиперболической; 2,16 – степенной и

1,98 для квадратичной связи. На основании этих результатов сделано заключение о том, что процесс десорбции газа удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью при коэффициенте детерминации R=0,9 и может быть представлен как (рис. 3)

$$f(x) = \begin{cases} a_1 + b_1 x; x \in [x_0; x_{diff}] \\ a_2 + b_2 ln x; x \in [x_{diff}; x_n] \end{cases}, \quad (2)$$

где a_1; b_1; a_2; b_2 – параметры; x_0 = 0; n – количество измерений; x_{diff} – начало диффузии; [x_0; x_{star}] – интервал экстраполяции; [x_{star}; x_{diff}] – процесс фильтрации (закон Дарси); [x_{diff}; x_n] – процесс диффузии.

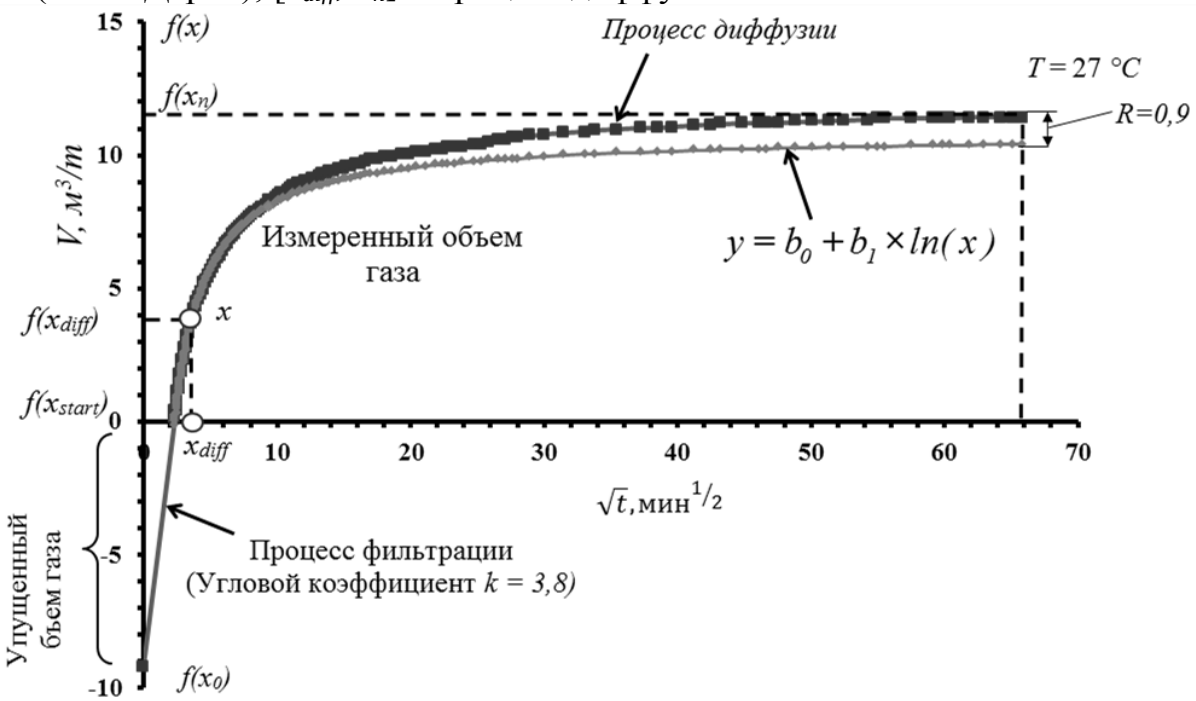


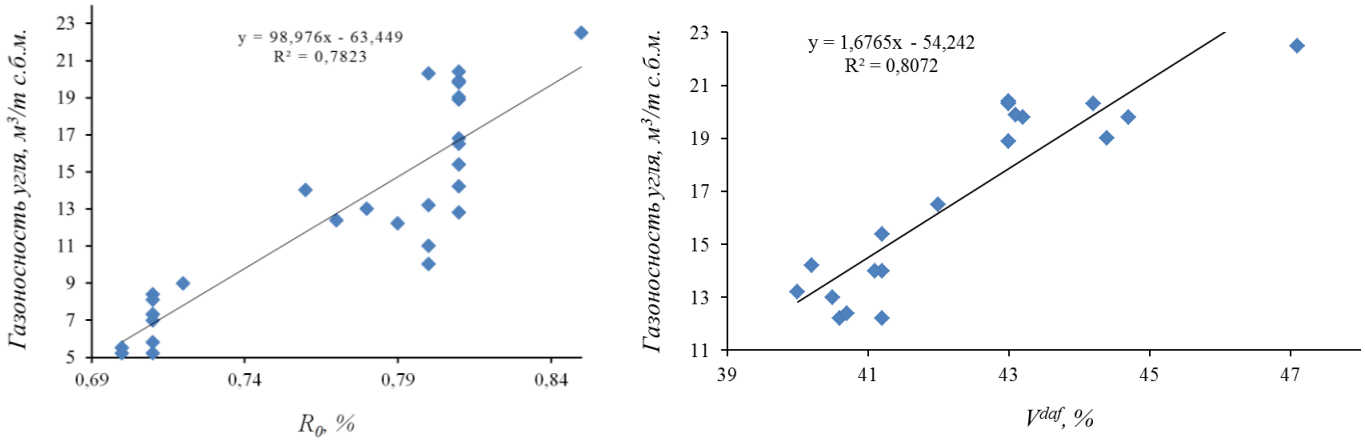
Рис. 3. Зависимость объема выделившегося метана V от функции времени $\sqrt{t}$

В лабораторных исследованиях упущенный объем газа, характеризующий процесс отбора угольных проб, в течение которого выделяется не отбираемый в герметичный сосуд газ, определялся методом обратной экстраполяции в момент времени x=0 (здесь и далее $x = \sqrt{t}$, t – время десорбции метана из угля, мин). При этом объем выделившегося метана на интервале от x_{diff} до x снижается линейно, что характеризуется как процесс фильтрации. Таким образом, при обработке экспериментальных данных по формуле $y=kx+b$ можно определить положение соответствующей прямой. Объем выделившегося газа на втором участке кривой десорбции измерялся в пределах температур, соответствующих природным условиям залегания пластов (20-30 °C). При этом в закрытых порах оставалось 30-70 % объема газа, что характеризует процесс внутренней диффузии газа.

В результате выполненных измерений установлено, что процесс диффузии и фильтрации газа через систему пор и трещин замедляется во времени.

Так при температуре угля T=20-30 °C угля с показателями выхода летучих веществ V^{daf}=37-43 % время десорбции метана, находящегося в системе открытых пор и характеризуемое как процесс фильтрации газа, составило t=300-600 с, а при V^{daf}=71-85 %, t=600-1200 с. Кривая десорбции характеризует суммарный объем метана, выделившейся к моменту времени t газоистощения (900-1800 часов) исследуемой угольной пробы. В общем случае скорость изменения давления газа зависит от температуры образца, размера гранул угля, его проницаемости и объема сосуда. Таким образом, установленные особенности газокинетического процесса определяют возможность применения разработанной конструкции шахтного кернонаборника для оценивания объема упущенного газа и последующего определения газоносности угольных пластов в условиях Кузбасса.

Для определения физико-химических факторов, влияющих на газоносность угля χ, выполнен анализ ее взаимосвязи с выходом летучих веществ V^{daf} и показателем отражения витринита R_0, % (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Зависимость газоносности χ от физико-технологических характеристик угля:
а) степень отражения витринита R_0= 0,7 ÷ 0,9 %;
б) выход летучих веществ V^{daf} = 40÷47,5 %

На основе полученных результатов установлено, что наиболее значимым параметром, влияющим на содержания газа в исследуемых угольных пробах, является выход летучих веществ V^{daf}. Зависимость газоносности угля от выхода летучих веществ (рис. 4 б) предложено использовать для верификации значений газоносности угля, определяемой в процессе ведения горных работ на основе предложенного подхода.

Третья глава посвящена разработке методики определения газоносности угольных пластов, учитывающей закономерности десорбции метана и определяющей порядок отбора угольных образцов непосредственно в шахтных условиях в процессе ведения горных работ и последующих измерений объема газа в лабораторных условиях. Так как газоносность может отличаться в пределах небольших участков, например, в случае

тектонических нарушений при предварительной дегазации или разгрузке, вызванной близлежащими горными работами, влияние этих факторов учтено при выборе места отбора пробы. В методике предусмотрен отбор угольных кернов из скважин, пробуренных по пласту от бортов горной выработки за пределы зоны опорного давления. Расстояние между скважинами для отбора угольных кернов принято не более 300 м (для пологих и наклонных пластов) в зависимости от горно-геологических условий залегания угольного пласта, а для крутонаклонных и крутых пластов - не более 50 м по падению пласта от выработанного пространства вышележащего этажа. По результатам проведенных измерений стандартное отклонение значений газоносности χ пласта изменяются в пределах 1-5% между пробуренными скважинами ≤300 м, с доверительной вероятностью 95 % по критерию Стьюдента. Для повышения достоверности получаемых результатов в каждой точке (скважине) отбираются три угольных пробы. При этом в дальнейших расчетах использовалось наибольшее значение газоносности.

Опробования методики проводились в следующем порядке. Регистрировалось время начала отбора проб и момент их герметизации в сосуде, а также измерялась температура углепородного массива и атмосферное давление в горных выработках. Измерения выделившегося объема газа при температуре угольного пласта продолжалось в течение 24-72 часов в зависимости от интенсивности газовыделения с момента размещения герметичных сосудов с образцами в термостаты. При этом интервал измерений рассчитывался по формуле

$$\Delta t_{i+1} = \begin{cases} \Delta t_i \times 2 & \text{при } V_i \le V/30; \\ \Delta t_i \times 1{,}5 & \text{при } V_i \le V/15; \\ \Delta t_i & \text{при } V_i > V/15, \end{cases} \qquad (3)$$

где V - объем герметичного сосуда, см^3; V_i - объем выделившегося газа, см^3. Выделившийся из емкости газ измерялся как функция времени. Общий объем газа V_Σ определялся по формуле

$$V_\Sigma = V_{упущ} + V_{выд} + V_{ост}, \qquad (4)$$

где $V_{упущ}$ – объем упущенного газа, который выделился из угольного образца с момента начала выбуривания образца до момента его помещения в герметичный сосуд, м^3.

Затем определялся объем выделившегося газа из угольного образца

$$V_{выд} = \sum_{i=1}^{N} V_i, \qquad (5)$$

где N – количество измерений выделившегося объема газа, см^3; V_i – объем газа, измеренный за каждый i-ый интервал времени, см^3; $V_{ост}$ – объем газа, выделившийся из образца после нагрева, см^3.

После этого оценивалась остаточная газоносность угольного образца Γ по формуле

$$\Gamma = \frac{V_\Sigma}{M}, \tag{6}$$

где M – масса угля, высушенного при комнатной температуре, кг.

Далее в точке отбора угольных образцов при $X > \overline{\Gamma}$ определялось относительное превышение X над $\overline{\Gamma}$

$$\Delta = \frac{X - \overline{\Gamma}}{\overline{\Gamma}}, \tag{7}$$

где X – значения газоносности угля, полученные при геологоразведочных работах. Далее для всех точек отбора проб рассчитывались скорректированные значения газоносности по формуле

$$\overline{\Gamma}_к = \overline{\Gamma}(1 + \Delta), \tag{8}$$

при $X < \overline{\Gamma}$ принималось значение $\overline{\Gamma}_к = \overline{\Gamma}$. С использованием значений $\overline{\Gamma}_к$ отстраивался скорректированный план изогаз.

Для получения информации об изменении объема и относительной доле сохранившегося газа в результате выветривания и влияния горных работ проведен сопоставительный анализ различных подходов определения газоносности угля. При этом использованы значения газоносности угля, полученные на этапе геологоразведки на угольном пласте № 52 шахты «Котинская», и значения газоносности угля, полученные на основе применения разработанного подхода, а также значения газоносности, рассчитанные по фактическому газовыделению в горные выработки (табл. 2).

Таблица 2

Значения газоносности угля, полученной при применении предложенного, прямого и косвенного методов, м^3/т

Место отбора проб	Разработанная методика	Прямой метод (геологоразведочные работы)	Косвенный метод
На удалении 30 м от конвейерного штрека	7,5	10,3	7,8
На удалении 30 м от вентиляционного штрека	5,7	9,8	7,3
На удалении 350 м от конвейерного штрека, вблизи скважины А	5,8	9,8	7,1
На удалении 350 м	5,2	9,8	8,0

Место отбора проб	Разработанная методика	Прямой метод (геологоразведочные работы)	Косвенный метод
от конвейерного штрека, вблизи скважины В			
На удалении 600 м от конвейерного штрека	8,4	11,3	7,9
На удалении 600 м от вентиляционного штрека	7,3	11,3	7,2

Образцы угля и газа для дальнейшего анализа отбирались на одном из участков пласта, подготовленного к отработке. Выполненные измерения позволили установить, что значения газоносности угля, полученные при проведении геологоразведочных работ, на 10-30% выше, чем полученные в результате предложенного подхода. Это обусловлено влиянием горных работ, при которых происходит разгрузка углепородного массива от горного давления, что приводит к увеличению количества десорбируемого метана и способствует его миграции в горные выработки или дегазационные скважины, а неравномерность распределения газоносности в пределах одного выемочного столба связана с показателями петрографических свойств угля. Таким образом, применение разработанной методики позволяет уточнять остаточную газоносность угля на планируемых к разработке и разрабатываемых участках угольных пластов, которая может отличаться от результатов, полученных при геологической разведке.

<u>В четвертой главе</u> представлено практическое применение разработанного подхода определения газоносности угольных пластов в условиях Кузбасса. На рис. 5 представлены изменения газоносности угля с учетом сохранения температурных условий в интервале 22-24 °*C* на участке пласта 52, определенный на основе применения разработанного подхода.

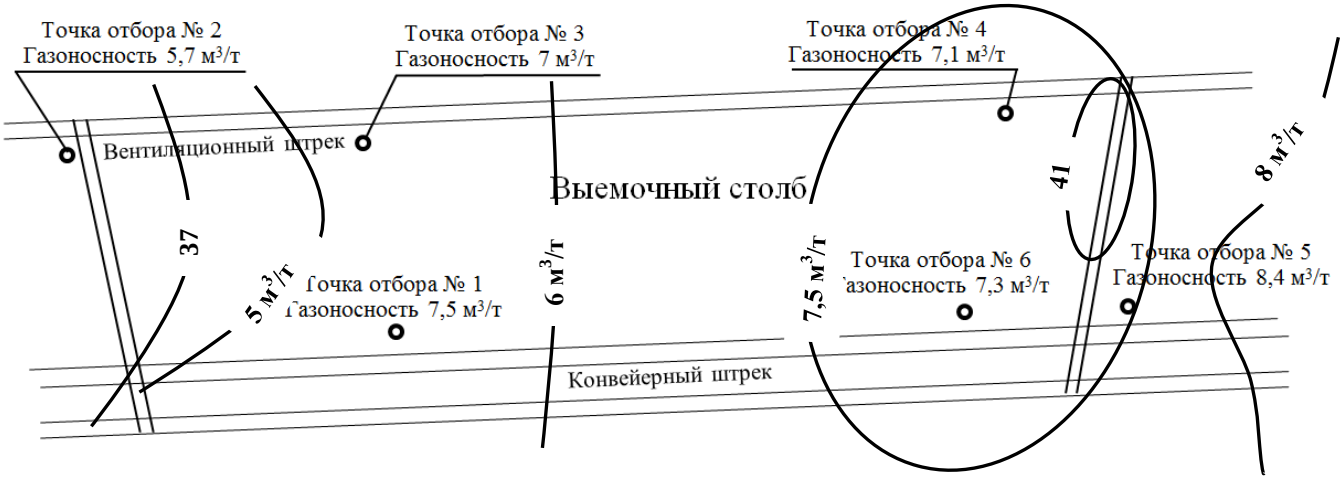


Рис. 5. Газоносность угольного пласта и изогазы, полученные на основе применения предложенного подхода, и изолинии выхода летучих веществ, используемые для верификации результатов

Для верификации полученных значений газоносности угольных кернов, отобранных в горных выработках шахты выполнено сравнение полученных значений газоносности угля и выхода летучих веществ. При этом установлено, что схожий характер изолиний и изогаз, полученных на основе выполненных измерений в реальных шахтных условиях с применением предложенного подхода, свидетельствует об удовлетворительном качестве оценки газоносности. С помощью разработанного подхода, основанного на прямом определении газоносности угля, проведена оценка эффективности дегазации угольных пластов для 4 шахт Кузбасса (табл. 3).

$$K_{эД} = \frac{\chi_п - \chi'_п}{\chi_п}, \qquad (9)$$

где $\chi_п$ – природная газоносность угольного пласта, м^3/т.; $\chi'_п$ – газоносность после дегазации угольного пласта, м^3/т.

Таблица 3

Оценка эффективности дегазации угольных пластов на основе прямого метода

Шахта	Коэффициент эффективности дегазации, $K_{эД}$	Природная газоносность, *м^3/т с.б.м.*	Остаточная газоносность, *м^3/т с.б.м.*
A	0,9-0,85	9-14	1,2-2,1
B	0,01-0,1	9-11	8,9-8,7
C	0,9-0,6	17-20	2,0-7,6
D	0,9-8,4	18-20	1,0-3,2

На основе выполненных измерений установлено, что коэффициент эффективности дегазации (9) для рассмотренных шахт изменяется от 10 до 60 % в зависимости от фильтрационных свойств угольных пластов, а также влияния горных работ. Выполненные измерения на шахтах Кузбасса подтвердили возможность и целесообразность применения методики для оценки газоносности угля на планируемых к разработке и разрабатываемых участках угольных пластов, а также для контроля эффективности их дегазации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по совершенствованию метода оценки остаточной газоносности угольных пластов на основе отбора угольных проб из скважин, пробуренных от борта горной выработки в угольный пласт с помощью разработанного шахтного кернонаборника, и определения выделившегося объема газа в шахтных и лабораторных условиях путем исследования процессов фильтрации и диффузии метана, имеющей существенное значение для отрасли наук о Земле.

Основные научные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. В шахтных испытаниях разработанного керноноборника установлено, что его двухсекционная модификация наилучшим образом обеспечивает отбор кернов длинной 0,3 м; диаметром 0,062 м; коэффициентом керноотбора 0,7; временем выбуривания менее 1200 с и исключает перегрев угольных проб при их выбуривании.

2. Определено, что процесс фильтрации метана продолжается в течение 600-900 с, после чего он переходит в диффузионный процесс при условии не превышения давления в измерительной системе 170 кПа для кузбасских углей.

3. В лабораторных измерениях показано, что угловой коэффициент линейного участка десорбционной кривой, соответствующего закону Дарси, при фильтрации газа из трещиновато-порового пространства отобранных проб угля составляет 1,2-4,5. При этом объем упущенного газа корректно определяется на основе применения метода обратной экстраполяции в границах этого участка.

4. Установлено, что неравномерность пространственного распределения газоносности угля вызвана анизотропией компонентов угольного вещества, которое характеризуется изменением выхода летучих веществ V^{daf}=37-43 % и степени отражения витринита R_0=0,7-0,9 %, а также наличием локальных нарушений в структуре угольного пласта.

5. Установлено, что газоистощение угля на нелинейном участке десорбционной кривой удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью объема выделившегося метана от времени для 67 угольных кернов, отобранных в центральной части Кузнецкого угольного бассейна, а ее применение позволяет снизить затраты времени на выполнение измерений газоносности угольных пластов на 20-50%.

6. Разработанная методика оценки газоносности угольных пластов, заключается в отборе угольных кернов с помощью керноноборника из скважин, пробуренных в угольный пласт, с последующим измерением объема газа, выделившегося в процессе его десорбции в лабораторных условиях, и отличается от известных подходов тем, что при отборе проб из скважин, пробуренных в борт горной выработки, поддерживается квазипостоянная температура угольного пласта, которая соответствует натурным условиям его залегания.

Основное содержание диссертации опубликовано

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кормин, А.Н**. Классификация угольных пластов по петрографическим свойствам / Кормин А. Н. // Вестник КузГТУ. – 2002. – № 5 – С. 48-49.

2. Тайлаков, О.В. Анализ структурных свойств углей Кузбасса / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, **А.Н. Кормин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 8. – С. 285-286.

3. Тайлаков, О.В. Классификация источников и оценка эмиссии шахтного метана на основе геоинформационных технологий / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, **А.Н. Кормин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение Метан. – 2006. – С. 206-210.

4. **Кормин, А.Н.** Оценка фактической природной газоносности угольных пластов при ведении горных работ / А.Н. Кормин // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2009. – № ОВ7. – С. 150-154.

5. Тайлаков, О.В. Разработка методики определения газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ / О.В. Тайлаков, Е.В. Мазаник, **А.Н. Кормин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. Экология, метанобезопасность. – 2011. – № 8 – С. 210-214.

6. Тайлаков, О.В. Оценка ресурсов метана на горных отводах действующих угольных шахт / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, В.О. Тайлаков // «Газовая промышленность» Спец. выпуск. – 2012. – № 672. – С. 18-19.

7. Тайлаков, О.В. Совершенствование метода определения газоносности угля для повышения эффективности дегазации угольных пластов / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, А.И. Смыслов, В.О. Тайлаков // Газовая промышленность – 2012. – № 682. – С. 46-47.

8. **Кормин, А.Н.** Определение газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ / А.Н. Кормин, Д.Н. Застрелов, В.О. Тайлаков // Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня. – 2013. – № ОВ 6. – С. 155-160.

9. Тайлаков, О.В. К оценки ресурсов шахтного метана в выработанном пространстве / О.В. Тайлаков, В.О. Тайлаков, М.П. Макеев, С.В. Соколов, **А.Н. Кормин** // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2013. – № ОВ 6. – С. 160-165.

10. Тайлаков, О.В. Определение остаточной газоносности угольных пластов на основе макрокинетических десорбционных процессов фильтрации и диффузии метана для оценки эффективности дегазации / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, В.О. Тайлаков // Наука и техника в газовой промышленности – 2014. – № 1 – С. 10-13.

11. Тайлаков, О.В. Физическое моделирование изменения фильтрационных свойств угольных пластов / О.В. Тайлаков, Е.А. Уткаев, **А.Н. Кормин**, А.И. Смыслов // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 6 – С. 13-16.

12. Тайлаков, О.В. Способ оценки ресурсов метана угольных пластов / О.В. Тайлаков, В.О. Тайлаков, Д.Н. Застрелов, **А.Н. Кормин** // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельная статья (специальный выпуск). – 2014. – № 12. – 12 с.

13. Тайлаков, О.В. Определение газоносности угольных пластов на основе исследования процессов фильтрации и диффузии метана / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, Д.Н. Застрелов, Е.А. Уткаев // Уголь. – 2015. – № 1. – С. 74-77.

в прочих изданиях:

14. **Кормин, А.Н.** Классификация угледобывающих предприятий Кузбасса на основе применения кластерного анализа / А.Н. Кормин // Проблемы освоения недр в XXI веке - глазами молодых: Материалы I Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 25-летию ИПКОН РАН – 2002. – С. 163-165.

15. Tailakov, O.V. Coal mine methane ownership relations in Russia / O.V. Tailakov, D.V. Islamov, **A.N. Kormin,** & T.A. Panchisheva // The International Coalbed Methane Symposium, May 5-9, in Tuscaloosa, Alabama. – 2003. – P. 1-5.

16. **Кормин, А.Н**. Мониторинг эмиссии метана при добыче угля на основе геоинформационного подхода / А.Н. Кормин // Сборник трудов научной сессии Кемеровского научного центра СО РАН, – 2005. – С. 187.

17. Тайлаков, О.В. Обобщенная оценка объемов эмиссии метана в угольной промышленности России / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, В.О. Тайлаков // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики Кузбасса. – Материалы международного форума. – 2008. – С. 90-97.

18. Тайлаков, О.В. Эмиссия метана при добыче угля в России / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин**, М.Л. Гитарский, В.О. Тайлаков // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Том XXII. – Москва: ИГКЭ. – 2009. – С. 216-227.

19. **Кормин, А.Н.** Сопоставительный анализ прямых методов определения газоносности угольных пластов / А.Н. Кормин // Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена -2013». Том 3. – 2013. – С. 260-263.

20. Тайлаков, О.В. Совершенствование метода оценки остаточной газоносности угольных пластов / О.В. Тайлаков, **А.Н. Кормин** // Сборник научных трудов. Выпуск 2 «Пути повышения эффективности и безопасности освоения пластового месторождения полезных ископаемых подземным способом». – 2014. – С. 409-413.

21. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Utkaev E.A., Smyslov A.I., **Kormin A.N.** Experience for Coal Mine Methane Utilization to Generate Thermal and Electric Power // Taishan Academic Forum – Project on mine Disaster Prevention and Control – Mining 2014. – Qingdao, China, 17-20 October, 2014. - pp. 450-454.

Подписано к печати «15» октября 2015 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Печ. л. 1,12. Тираж 100 экз. Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Типография Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а