



005018116

На правах рукописи

БУХТИЯРОВ Алексей Александрович

**ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ И ВМЕЩАЮЩИХ
ПОРОД ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ВЫЕМКЕ
МЕТАНОСНЫХ УГЛЕЙ**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

19 АПР 2012

Тула 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) на кафедре геотехнологий и строительства подземных сооружений.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
КАЧУРИН Николай Михайлович.

Официальные оппоненты:

ЕФИМОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, МГГУ, профессор кафедры «Экономика природопользования», г. Москва,
БАКУНИН Евгений Иванович, кандидат технических наук, доцент, ТулГУ, доцент кафедры «Аэрологии охраны труда и окружающей среды», г. Тула.

Ведущая организация: ОАО «Прокопгипроуголь», г. Прокопьевск Кемеровской области.

Защита диссертации состоится «15» мая 2012 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.271.04 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, Ученый совет ТулГУ, факс: (4872) 33-13-05, e-mail: galina_stas@mail.ru.

Автореферат разослан «10» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Б. Копылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Практика эксплуатации угольных шахт России показывает, что уровень безопасности подземных горных работ по газовому фактору постоянно снижается. Это обусловлено переходом на технологии интенсивной отработки запасов, при которых нагрузка на очистные забои может превышать 10000 т/сут, и постоянным ростом глубины разработки. При этом устойчивое обеспечение потребностей страны во всех видах топлива и энергии будет по-прежнему осуществляться за счет увеличения их добычи. Наиболее перспективным в России является Кузнецкий угольный бассейн. Общие балансовые запасы угля в России составляют почти 200 млрд т, или 11,3 % мировых запасов. По производству угля Россия занимает 5-е место в мире после Китая, США, Индии и Австралии. Энергетической стратегией до 2020 года намечается увеличить добычу угля в России до 450 млн тонн, в том числе в Кузбассе – до 177 млн тонн. Кузбасс преодолел 150-миллионный рубеж добычи и выдает на-гора около 160 млн тонн высококачественного угля (подземная добыча – 46 %, открытая – 54 %).

Динамика взрывов метановоздушной смеси (МВС), количества пострадавших и погибших последних лет показывает, что увеличение добычи угля может осуществляться только при условии снижения риска такого вида аварий. Важнейшей подсистемой технологии снижения риска и локализации последствий взрывов метановоздушной смеси является компьютерная технология оценки динамики концентрации метана в воздухе. Оценка надежности технологии азрологической защиты показывает, что по своим характеристикам система защиты от взрывов МВС в угольных шахтах России не изменилась и остается на уровне угольной промышленности СССР. Эффективность системы защиты от поражающих факторов снизилась по сравнению с угольной промышленностью СССР в 5 раз.

Высокая метаноносность угольных пластов Кузбасса, Воркуты и Донбасса является причиной возникновения газового барьера для современных высокопроизводительных технологий добычи угля. Поэтому исследование газовыделения из разрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород при интенсивной выемке метаноносных углей является весьма актуальным.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с тематическим планом НИР Научно-образовательного центра по проблемам рационального природопользования при комплексном освоении минерально-сырьевых ресурсов Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2010 годы)» (рег. номер 2.2.1.1/3942) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт № 02.740.11.0319).

Целью работы являлось уточнение закономерностей газовыделения из разрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород при интенсивной выемке метаноносных углей подземным способом для прогноза опасных газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках, обеспечивающего снижение аварийности на угольных шахтах при отработке глубоких горизонтов.

Идея работы заключается в том, что результаты прогноза опасных газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках, обеспечивающего снижение аварийности на угольных шахтах при отработке глубоких горизонтов, основываются на адекватных математических моделях газовыделения из разрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород при интенсивной выемке метаноносных углей.

Основные научные положения состоят в следующем:

- динамика метановыделений на очистных и подготовительных участках удовлетворительно моделируется решениями линеаризованных уравнений гиперболического и параболического типов, при этом метановыделение с поверхности обнажения угольного пласта пропорционально произведению начальной скорости газовыделения на экспоненту с отрицательным показателем и модифицированную функцию Бесселя нулевого порядка, имеющих аргумент, прямо пропорциональный времени процесса и обратно пропорциональный удвоенному периоду релаксации;

- динамика остаточной метаноносности отбитого угля описывается гиперболическим уравнением со стоком, учитывающим гранулометрический состав угля, скорость подачи комбайна и транспортирования угля, его фильтрационные и диффузионные свойства;

- метановыделение из подработанных вмещающих пород в выработанное пространство возрастает, если произведение времени на пьезопроводность транспортных машин, отнесенное к показателю газообмена с породными блоками, меньше 1, а затем наблюдается снижение дебита и при значениях этого комплекса, равных 4...10, газовый поток остается практически постоянным;

- газовый поток из надработанных пород в выработанное пространство убывает во времени по гиперболической зависимости и при фильтрационном критерии Фурье более 4 изменяется на 20...25 %;

- метановыделение из смежных угольных пластов связано с процессом дегазации всей породной толщи, подверженной воздействию очистных пород, и происходит менее динамично и более растянуто во времени и по сравнению с дегазацией вмещающих пород.

Новизна разработанных научных положений заключается в следующем:

- получены аналитические закономерности газовыделений из разрабатываемого угольного пласта и выработанного пространства, отличающиеся

ся тем, что динамика газовыделений описывается с учетом технологических параметров;

- предложены математические модели для прогноза газовых ситуаций в горных выработках, отличающиеся тем, что расчет полей концентрации газов осуществляется на основе установленных закономерностей динамики газовыделений, входящих в уравнение конвективно-турбулентной диффузии в виде источников;

- установлены зависимости газовой проницаемости угольных пластов и вмещающих пород нарушенной структуры от коллекторских свойств горного массива и свойств газа, отличающейся тем, что учтены параметры, характеризующие стохастичность фильтрационного движения газа в пористой среде.

Обоснованность и достоверность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- корректной постановкой задач исследования, применением классических методов математической физики, математической статистики и теории вероятностей и современных достижений вычислительной математики;

- удовлетворительной сходимостью результатов прогноза с фактическими данными (отклонение не превышает 20 %) и большим объемом вычислительных экспериментов;

- значительным объемом шахтных наблюдений, а также результатами анализа плановых замеров (проанализированы данные по 26 очистным участкам).

Практическая значимость работы заключается в том, что установленные закономерности газовыделения повышают достоверность прогноза газообильности выработок, участков и шахт и дают возможность предварительного анализа газовых ситуаций, которые могут возникать при различных технологических решениях и, таким образом, позволяют оценить уровень их безопасности по газовому фактору. Разработанные пакеты прикладных программ для прогноза газовыделений и газовых ситуаций в угольных шахтах существенно облегчают решение задач газовой динамики шахт за счет обеспечения диалогового режима работы пользователя с ЭВМ, что повышает эффективность САПР вентиляции. В процессе шахтных исследований проведена промышленная апробация прогноза газовыделений.

Практическая реализация выводов и рекомендаций. Основные выводы и рекомендации работы по обоснованию возможности увеличения добычи углей в Кузнецком и Донецком угольных бассейнах, направленные на обеспечение безопасных условий развития добычи угля с учетом расширения масштабов производства действующих предприятий, нового строительства и освоения остаточных запасов углей ликвидируемых шахт, использованы при корректировке программы развития угольных

бассейнов на перспективу и реализации энергетической стратегии России на период до 2020 года. Теоретические результаты и технические решения включены в учебные курсы по аэрологии горных предприятий, а также использованы при выполнении хозяйственных и госбюджетных НИР в Тульском государственном университете.

Апробация работы. Научные положения и практические разработки диссертационной работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений ТулГУ (г. Тула, 2009 – 2011 гг.), технических советах ОАО «ОУК «Южжубассуголь» (г. Новокузнецк Кемеровской обл., 2009 – 2011 гг.), 3-й и 4-й Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2008 – 2009 гг.), Международной конференции «Геомеханика. Механика подземных сооружений» (г. Тула, 2010 г.), Международной конференции «Ecology, Energy, Economy Safety in a Non Liner World. 3E – SAFETY» (г. Белград, 2009 г.); 3-й Международной конференции по проблемам рационального природопользования «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи и переработки отходов горного производства» (г. Тула, 2010 г.); 3-rd International Symposium ENERGY MINING «Energy Mining, New Technologies, Sustainable Development» (Сербия, г. Апатин, 2010 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 статей.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 180 страницах машинописного текста, состоит из 5 разделов, содержит 22 таблицы, 23 рисунка, список литературы из 158 наименований.

Автор диссертации выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений за постоянную поддержку и методическую помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Современные методы прогноза газовойделений и газовых ситуаций в горных выработках являются результатом исследований, выполненных ИПКОН РАН, ВостНИИ, ИГД им. А.А. Скочинского, МГТУ, Санкт-Петербургским горным институтом, ТулГУ и др. Большой вклад в решение проблемы внесли академики РАН К.Н. Трубецкой, Ю.Н. Мальшев, Д.А. Рубан, Д.Р. Каплунов, А.Е. Красноштейн; а также А.А. Айруни, К.К. Бусыгин, Ю.Ф. Васючков, Ф.С. Клебанов, А.Д. Кизряков, О.И. Касимов, С.П. Казаков, Н.М. Качурин, А.А. Мясников, Н.В. Ножкин, А.Э. Петросян, В.С. Пак, И.В. Сергеев, Э.М. Соколов, М.Б. Сулла, Н.И. Устинов, К.З. Ушаков, и др. Анализ основных научных и практических резуль-

татов, полученных в различных научных школах, показал, что переход на технологии интенсивной отработки запасов, при которых нагрузка на очистные забои может превышать 10000 т/сут, и постоянный рост глубины разработки требуют дополнительных исследований по данной проблеме.

Цель и идея работы, а также современное состояние знаний по рассматриваемой проблеме обусловили необходимость постановки и решения следующих задач исследований.

1. Проанализировать существующую базу данных по динамике газовыделений и получить системные оценки динамики выделения метана из разрабатываемого угольного пласта и вмещающих пород.
2. Изучить связь технологических параметров с параметрами аварий, обусловленных газовым фактором, при подземном способе разработки месторождений полезных ископаемых и обосновать модель прогноза газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках.
3. Обосновать математические модели выделения газа с поверхности обнажения угольного пласта и из отбитого угля и разработать методические положения прогноза динамики выделения метана из разрабатываемого угольного пласта.
4. Обосновать математические модели выделения метана из вмещающих пород, оценки газоносности и фильтрационных свойств, подработанных и надрботанных горных пород и разработать методические положения прогноза динамики выделения метана из выработанного пространства очистного участка.
5. Разработать математические модели формирования опасных газовых ситуаций в горных выработках на основе фильтрационно-диффузионного переноса газов в пористых сорбирующих средах и конвективно-турбулентной диффузии газовых примесей в рудничной атмосфере.
6. Разработать комплекс программных средств для прогноза газовыделения из разрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород при интенсивной выемке метаносных углей и провести вычислительные эксперименты.

Многочисленные газовоздушные съемки, проведенные как на метаобоильных, что структура газового баланса очистных и подготовительных участков шахт Кузнецкого, Печерского и Донецкого бассейнов весьма динамична. И в произвольный момент времени составляющие газового баланса могут существенно отличаться от их значений, полученных осреднением за длительные периоды наблюдений. Детерминированный тренд абсолютной газообильности представляет собой периодическую кривую со случайными значениями амплитуды, частоты и фазы. Периодичность тренда определяется цикличностью геомеханических и технологических воздействий и процессов, происходящих при ведении очи-

стных работ. Конфигурация тренда при этом зависит от случайных сочетаний фаз различных элементарных циклов.

Рассматривая угольные пласты, которые обрабатывают по технологии «шахта – лава», процесс фильтрационного движения метана считать ламинарным и одномерным. Учитывая весьма значительную скорость подачи комбайна в лаве, необходимо использовать уравнение фильтрации гиперболического типа, поэтому математическое описание поля давлений свободного метана в краевой части разрабатываемого угольного пласта имеет следующий вид:

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = \chi_{y,n} \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где p - давление свободного метана в трещиновато-пористой структуре угля; z - пространственная координата; t - время; t_r - период релаксации процесса ламинарной фильтрации метана в угольном пласте; $\chi_{y,n}$ - пьезопроводность угольного пласта, зависящая от фильтрационных и сорбционных свойств угля.

Длина выемочного столба существенно превышает мощность разрабатываемого угольного пласта и размеры зоны естественного газового дренирования, поэтому физически обоснованно, можно рассматривать одномерное полубесконечное пространство, что позволяет записать начальные и граничные условия в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} p(z, 0) = p_0 = \text{const}, \quad \frac{\partial p(z, 0)}{\partial t} = 0, \\ p(0, t) = p_c = \text{const}, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} p \neq \infty, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где p_0 , p_c - давление свободного метана в угольном пласте и на поверхности обнажения пласта соответственно.

Решение уравнения (1) для условий (2) позволило получить аналитическую зависимость для расчета метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта

$I_{y,d,n} = I_{y,d,n} \exp(-0,5tt_r^{-1}) I_0(0,5tt_r^{-1})$, где $I_{y,d,n}$ - начальная скорость газовой выделенности, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Тогда дебит метана $dI_{n,o}$ в очистной забой с элементарной поверхности обнажения угольного пласта dS , учитывая полученную зависимость, можно определить как $dI_{n,o} = I_{y,d,n} dS = m_{y,n} V_{\Pi} I_{y,d,n} \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/t_r) dt$, где $m_{y,n}$ и V_{Π} - мощность разрабатываемого угольного пласта и скорость подачи очистного комбайна. Представляя модифицированную функцию Бесселя в интегральном виде, метановыделение в очистной забой со всей поверхности обнажения угольного пласта определим по формуле

$\bar{I}_{n,o}(\tau_{с.ц}) = \pi I_{n,o} (m_{y,n} t_r V_{\Pi} I_{y,d,n})^{-1}$. Безразмерное значение метановыделе-

ния в очистной забой со всей поверхности обнажения угольного пласта определяется следующим интегральным соотношением:

$$\overline{I_{n.o}} = \int_0^{L_{OЧ} / (2t, V_{II})} \exp(-\tau) \left\{ \int_0^{\pi} [\exp(\tau \cos\theta) + \exp(-\tau \cos\theta)] d\theta \right\} d\tau, \quad (3)$$

где $L_{OЧ}$ - длина очистного забоя.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием соотношения (3). Исследования проведены на четырех интервалах значений безразмерной длительности выемочного цикла. Результаты исследования закономерности $\overline{I_{n.o}} = f(\tau_{в.ч})$ показывают, что при $\tau_{в.ч} \in [0, 3]$ функция $f(\tau_{в.ч})$ может быть аппроксимирована степенной зависимостью, для интервалов значений $\tau_{в.ч} \in [3, 10]$, $\tau_{в.ч} \in [10, 50]$ и $\tau_{в.ч} \in [50, 100]$ целесообразно использовать линейную аппроксимацию с различными начальными значениями и угловыми коэффициентами.

Следует отметить, что погрешность принятых аппроксимаций не превышает 3%. Таким образом, можно записать, что

$$\overline{I_{n.o}} = \begin{cases} 3,73 \tau_{в.ч}^{0,68} & \text{при } 0 < \tau_{в.ч} < 3, \\ 4,571 + 1,143 \tau_{в.ч} & \text{при } 3 < \tau_{в.ч} < 10, \\ 10 + 0,5 \tau_{в.ч} & \text{при } 10 < \tau_{в.ч} < 50, \\ 25 + 0,26 \tau_{в.ч} & \text{при } 50 < \tau_{в.ч} < 100. \end{cases} \quad (4)$$

Из формул (3) – (4) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана с планограммой работ в очистном забое. Анализ этой зависимости свидетельствует о том, что при выемочном цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность находится под перепадом давления, приблизительно равным значению $p_0^2 - p_c^2$. А площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь недегазированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние, определяемое формулой (3).

Динамика газоносности отбитого угля в общем виде описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} + (v_K - v_{II}) \frac{\partial x_0}{\partial \eta} = - \frac{\omega_{o,y}}{\rho_a \gamma_y 2R_{мин}} \int_0^{\infty} (2R)^{m_i-3} \times \\ \times \exp \left\{ - \left[\frac{39,48 K_M t}{(2R)^2} + \lambda_M (2R)^{m_i} \right] \right\} d(2R), \quad (5)$$

где $\omega_{o,y}$ - коэффициент массообмена; x_0 - остаточная газоносность угля при давлении p_0 ; λ_m - показатель степени измельчения угля, являющийся параметром масштаба; m_1 - показатель способности угля к измельчению, являющийся параметром формы; $2R_{min}$ - минимальный размер угольных частиц, образующихся при резании углей.

Решение уравнения (5) для условий $x_0(\eta, 0) = x_0(0, t) = x_3 = const$ позволяет рассчитать метановыделение из отбитого угля при высокопроизводительных современных технологиях выемки угля. Окончательно расчетная формула получена в следующем виде: $J_{o,y}(t_{с.ч}) = (\rho_a \gamma_y)^{-1} \omega_{o,y} K_{п.у} A_K \times$, $\times (1,26 - 0,78 \cdot t_{с.ч})$, где $K_{п.у}$ - коэффициент погрузки угля на конвейер; A_K - производительность комбайна. В целом вычислительные эксперименты показали, что метановыделение из отбитого угля - весьма динамичный процесс, имеющий тесную связь с планограммой работ в лаве, при этом установлено, что челноковая схема работы комбайна снижает неравномерность метановыделения из отбитого угля на 20...30 % и его длительность - на 60...70 % по сравнению с односторонней схемой работы.

Подработанная толща представляет собой куски породы, имеющие пористость и проницаемость, близкие к их значениям, существовавшим до подработки. Газовая проводимость системы трещин во много раз больше породных блоков. Поэтому в пористых блоках находится газ, который выделяется в трещины, являющиеся транспортными каналами. Движение метана в подработанной толще можно принять одномерным, то есть $x_1 = z$, где z - аппликата декартовой системы координат с началом отсчета, расположенным на почве разрабатываемого угольного пласта. Тогда уравнение фильтрации в доработанных породах можно представить в виде

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \eta \frac{\partial^3 p}{\partial t \partial z^2} = \varphi \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (6)$$

где $\varphi = k_m (\mu p_0 \beta)^{-1}$; $\eta = k_0^{-1} k_m l^2$; p - давление газа в трещинах; x_1 - пространственные координаты; k_m , k_0 - газовая проницаемость трещин и породных блоков соответственно; β - коэффициент сжимаемости метана; l - среднее значение характерного размера породных блоков.

Решение уравнения (6) для условий $p(z, 0) = p_0$;

$p(+0, t) = p_0 - (p_0 - p_c) \cdot \exp(-\eta^{-1} \varphi t)$; $\lim_{z \rightarrow 0} p(z, t) = const$ позволило получить закономерность для объема метана, выделившегося в единицу времени с единичной площади подработанных пород ($I_{п.л}$):

$$I_{п.л} = (\mu p_a l)^{-1} (k_m k_0)^{0,5} (p_0 - p_c) \{ p_0 - (p_0 - p_c) [1 - \exp(-\zeta)] \} f(\zeta), \quad (7)$$

где $\zeta = \eta^{-1} \varphi t$; $f(\zeta) = \exp(-\zeta) \int_0^{\zeta} \exp(0,5\tau) I_0(0,5\tau) d\tau$.

Для надработанных пород математическое описание процесса можно получить как частный случай уравнения (6) при $\eta \rightarrow 0$. Решение этой краевой задачи известно, тогда, учитывая, что фильтрация газа идет по закону Дарси, получим метановыделение из надработанных пород

$$I_{Н.П} = 0,282 p_n^{-1} (p_n^2 - p_c^2) \sqrt{\frac{k_n m_n}{\mu \beta t}}, \quad (8)$$

где k_n , m_n - проницаемость и пористость надработанных пород соответственно.

Вычислительные эксперименты показали, что дебит метана с единицы площади подработанных пород достигает максимального значения при $\xi^* \approx 1$. В дальнейшем наблюдается его снижение и начиная со значений $\xi^* = 4 \dots 10$ газовый поток существенно во времени не изменяется.

Относительная метанообильность может быть определена по следующим формулам:

$$q_{пор.н} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{l_2 \gamma_{пор.н} x_{н.н} f_2(\zeta_2^*)}{v_{оч} m_g \gamma_y} \sqrt{\frac{k_{н.н}}{k_g}} \frac{M^3}{m}, \quad (9)$$

$$q_{пор.н} = 10^8 \frac{l_2 \gamma_{пор.н} x_{н.н}}{v_{оч} m_g \gamma_y} \sqrt{\frac{k_{н.н}}{m}} \frac{M^3}{m}, \quad (10)$$

где $q_{пор.н}$, $q_{пор.н}$ - относительное метановыделение из подработанных и надработанных пород соответственно, m^3/t ; l_2 - шаг обрушения пород основной кровли, м; $\gamma_{пор.н}$, $\gamma_{пор.н}$ - плотность подработанных и надработанных пород, t/m^3 ; $x_{н.н}$, $x_{н.н}$ - природная газоносность подработанных и надработанных пород, $k_{н.н}$, $k_{н.н}$ - газовая проницаемость подработанных и надработанных пород, m^2 ; $\zeta_2^* = 4,87 \cdot 10^{18} k_g m^{-1}$;

$$f_2(\zeta_2^*) = \int_0^{\zeta_2^*} \exp(-0,5\tau) I_0(-0,5\tau) d\tau - \exp(-\zeta_2^*).$$

В том случае, когда процессами сорбции можно пренебречь, формула для расчета газовой проницаемости имеет вид

$$k_n = 0,266 \cdot 10^{-2} t_r (R_T T)^{0,5} m^3 p^{-1}. \quad (11)$$

Если перенос происходит в пористой сорбирующей среде, то для давления газа до 5 МПа можно использовать уравнение Лэнгмюра, тогда формула для расчета газовой проницаемости принимает вид

$$k_n = 1,88 \cdot 10^{-4} (R_T T)^{0,5} t_r (1 + b_n p)^2 m^2 p^{-1} \left[0,1 \cdot a_n b_n + 0,707 (1 + b_n p)^2 \right]^2. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет рассчитать газовую проницаемость сорбирующей пористой среды, сложенной материалом, изотерма сорбции которого выпукла (по классификации С. Брунауэра - это изотерма первого рода).

В выработанном пространстве обрушенные породы образуют зону интенсивного дробления породы. Обрушения непосредственной кровли приводят к возрастанию площади обнажения основной кровли, которая в этот период нагружена собственной силой тяжести и силой тяжести покрывающих её пород. Первое обрушение происходит при пролётах 25...100 м. После этого обрушения и разломы основной кровли происходят периодически, блоками, в установившемся режиме. Таким образом, породы непосредственной и основной кровли, нагруженные силой тяжести вышележащих слоёв и собственной силой тяжести, можно представить в виде статически неопределимой балки переменного сечения.

Изгиб породных слоёв приводит к образованию областей сжатия в их нижней части и областей растяжения в верхней части, а так как $[b_{сж}] > [b_p]$, где $[b_{сж}]$ и $[b_p]$ - предельные значения нормальных напряжений сжатия и растяжения, то разрушение слоя происходит за счет растягивающих усилий. Максимальное значение изгибающего момента будет в точке жесткого защемления слоя, там же будут и наибольшие внутренние напряжения.

Тогда предельные значения толщины слоёв породы непосредственной и основной кровли (H_1 и H_2) определяются по следующим формулам:

$$H_1 = ([b_p] \text{Cos } \alpha_n)^{-0,5} 1,732 I_1 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \right)^{0,5},$$

$$H_2 = ([b_p] \text{Cos } \alpha_n)^{-0,5} 0,866 I_2 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \right)^{0,5},$$

где γ_i - плотность i -го породного слоя мощностью H_i , кг/м³; α_n - угол падения разрабатываемого угольного пласта, град.

Величины, определяемые по этим формулам, в сумме представляют собой глубину проникновения разрывных нарушений подработанных пород. На этом расстоянии наблюдается существенное увеличение трещиноватости и проницаемости пород. Дополнительная пористость, образовавшаяся в обрушенной непосредственной и основной кровле, (m_1 и m_2) определяется по формулам $m_1 = m_{г,n} (m_{г,n} + H_1)^{-1}$,

$$m_2 = m_{г,n} (m_{г,n} + H_1 + H_2)^{-1}.$$

Породы почвы угольного пласта до начала выемки нагружены верти-

кальной составляющей распределенной нагрузки вышележащих пород и находятся в объемном напряженном состоянии. На поверхности контакта угольного пласта с почвой $\sigma = \gamma_{cp}H$, где γ_{cp} – средневзвешенная плотность вышележащих пород. В процессе выемки пласта происходит обнажение этой поверхности, и породный слой будет находиться под действием распределенной нагрузки, направленной вертикально вверх, которая равна $0,7 \gamma_{cp} H \cos^2 \alpha_n$. Рассматривая породы почвы в виде балки на упругом основании, можно использовать дифференциальное уравнение упругой линии породного слоя на упругом основании $d^2z/dx^2 + K_{y.o} z (EJ_{ин})^{-1} = q_3(EJ_{ин})^{-1}$, где E – модуль упругости пород; $J_{ин}$ – момент инерции сечения слоя; $K_{y.o}$ – коэффициент упругого отпора. Геометрические параметры рассматриваемого слоя длиной $l_{оч}$ оказывают существенное влияние на проявление краевого эффекта. Так, при расчетах на прочность слой на упругом основании можно рассматривать как бесконечно длинный, если $\beta l_{оч} > 3$, где $\beta = [0,25 K_{y.o} (EJ_{ин})^{-1}]^{0,25}$. Расчеты показали, что $\beta l_{оч}$ в десятки раз больше трех. Таким образом, породный слой можно рассматривать как полубесконечную балку, так как при $\beta l_{оч} \gg 3$ прогибы и моменты возле одного края не зависят от условий закрепления другого края.

Поэтому решение уравнения упругой линии породного слоя имеет следующий вид: $z(x) = q_3 K_{y.o}^{-1} [1 - \exp(-\beta x)] (\cos \beta x + \sin \beta x)$. Тогда, определив максимальный изгибающий момент, получим, что для пологих пластов $H_3 = 0,213 l_{оч}^{0,334} (H/[b_p])^{0,667}$. Исходной информацией для расчета фильтрационных свойств вмещающих пород и смежных угольных пластов являются геологические сведения о разрабатываемом угольном пласте, технологические параметры и прочностные характеристики.

Газовые ситуации на очистных и подготовительных участках моделируют с помощью уравнения конвективно-турбулентной диффузии газовой примеси в воздухе. Если учесть конвективный и турбулентный диффузионные потоки, то математическая модель газовой ситуации в подготовительной выработке будет иметь следующий вид:

$$C(x, t) = \frac{DI_{п.в}}{\Omega_{п.в}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{u_{cp}}{L_{п.в}} t\right) \right\} + 0,5 \exp\left(-\frac{u_{cp}}{L_{п.в}} t\right) \times \\ \times \int_0^t \exp\left(\frac{u_{cp}}{L_{п.в}} \tau\right) \left[\exp(-K\sqrt{b}) \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{b\tau}\right) + \right. \\ \left. + \exp(K\sqrt{b}) \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{b\tau}\right) \right] d\tau, \quad (13)$$

где $K = \frac{x}{\sqrt{D}}$; $b = \frac{u_{cp}^2}{4D} + \frac{u_{cp}}{L_{п.в}}$; u_{cp} – средняя скорость движения воздуха по

подготовительной выработке; $L_{п.в}$ – проектная длина подготовительной выработки; $I_{п.в}$, $\Omega_{п.в}$ – абсолютная газообильность и объем подготовительной выработки; $C = c - c_H$; c – объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в воздухе выработки (для условий Кузбасса – это метан или углекислый газ); c_H – объемная концентрация газовой примеси на свежей струе, поступающей в подготовительную выработку.

Аналогичные рассуждения относительно переноса газовых примесей в выработках очистных участков приводят к другой математической модели, позволяющей оценивать газовую ситуацию:

$$C(x, t) = I_{0,y} Q_{0,y}^{-1} \left\{ \left[1 - \exp(-\langle u \rangle (\Sigma L_{0,y})^{-1} t) \right] - \exp(-x (\Sigma L_{0,y})^{-1}) \times \right. \\ \left. \times \left\{ 1 - \exp \left[-\langle u \rangle (\Sigma L_{0,y})^{-1} (t - x \langle u \rangle^{-1}) \right] \right\} \sigma_0 (t - x \langle u \rangle^{-1}) \right\},$$

(14)

где $Q_{0,y}$ – количество воздуха, протекающего по выработкам.

В объекте, начальное состояние которого характеризуется массивом исходных данных, а динамика метановыделения описывается пакетом математических моделей и регистрируется системой газозащитного контроля на входе и выходе в рассматриваемые горные выработки, необходимо обеспечить требуемый расчетный вектор технологических параметров $X_{ин.п.}$. В соответствии с такой постановкой задачи контроля и управления разработан алгоритм функционирования подсистемы. При этом информация об оперативной газовой обстановке (ОГО) используется для определения количества воздуха по газовому фактору, и если этот фактор является превалирующим, то подача воздуха на рассматриваемый участок увеличивается. Основные научные и практические результаты исследований, направленные на обеспечение безопасных условий развития добычи угля с учетом расширения масштабов производства действующих предприятий, нового строительства и освоения остаточных запасов коксующихся углей, использованы на предприятиях ОАО «Южкузбассуголь».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований уточнены закономерности газовыделения из разрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород при интенсивной выемке метаносных углей подземным способом для прогноза опасных газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках, обеспечивающего сниже-

ние аварийности на угольных шахтах при обработке глубоких горизонтов с использованием технологии «шахта – лава».

Основные выводы, научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Изменение газообильности и газовых ситуаций в метанообильных угольных шахтах является случайным процессом, представляющим собой суперпозицию распределенных во времени элементарных случайных процессов, связанных с планограммой технологических операций и периодом обрушения основной кровли.

2. Динамика метановыделений на очистных и подготовительных участках удовлетворительно моделируется решениями линеаризованных уравнений гиперболического и параболического типов, при этом метановыделение с поверхности обнажения угольного пласта пропорционально произведению начальной скорости газовыделения на экспоненту с отрицательным показателем и модифицированную функцию Бесселя нулевого порядка, имеющих аргумент, прямо пропорциональный времени процесса и обратно пропорциональный удвоенному периоду релаксации.

3. Установлено, что газовая проницаемость горного массива является обобщенной характеристикой свойств газа, коллекторских свойств горного массива и стохастичности фильтрационного течения, а оценки ее математического ожидания изменяются от 10^{-17} до 10^{-20} м² для углей и пород Кузбасса и Донбасса.

4. Динамика остаточной метаноносности отбитого угля описывается гиперболическим уравнением со стоком, учитывающим гранулометрический состав угля, скорость подачи комбайна и транспортирования угля, его фильтрационные и диффузионные свойства.

5. Метановыделение из подработанных вымещающих пород в выработанное пространство возрастает, если произведение времени на пьезопроводность транспортных трещин, отнесенное к показателю газообмена с породными блоками, меньше 1, а затем наблюдается снижение дебита и при значениях этого комплекса, равных 4...10, газовый поток остается практически постоянным.

6. Газовый поток из наработанных пород в выработанное пространство убывает во времени по гиперболической зависимости и при фильтрационном критерии Фурье более 4 изменяется на 20...25 %.

7. Метановыделение из смежных угольных пластов связано с процессом дегазации всей породной толщи, подверженной воздействию очистных пород, и происходит менее динамично и более растянуто во времени по сравнению с дегазацией вмещающих пород.

8. Разработаны методические положения прогноза газовых ситуаций в горных выработках с учетом закономерностей динамики газовыделений, позволяющие получить информацию о протекании газодинамических процессов, провести на этой основе критический анализ газовых ситуаций

при различных технологических решениях и обосновать вариант, оптимальный по газовому фактору.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Теоретическое обоснование ограничения нагрузки на очистной забой по газовому фактору// Изв ТулГУ. Науки о Земле. 2009. Вып. 4. С. 84-88.

2. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Теоретическое обоснование прогноза выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта при интенсивной выемке угля// Изв ТулГУ. Науки о Земле. 2009. Вып. 4. С. 93-97.

3. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Прогноз выделения метана с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта и нагрузка на лаву при интенсивной выемке угля// Безопасность жизнедеятельности. 2010. Вып. 5. С. 19-24.

4. Безопасность геотехнологий добычи угля по газовому фактору. М.: Безопасность жизнедеятельности/ Н.М. Качурин, А.М. Борщевич, О.Н. Качурина, А.А. Бухтияров. Вып. 5. 2010. С. 24-28.

5. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Предельно допустимая нагрузка на очистной забой по газовому фактору//3-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. 2010. С. 188 – 193.

6. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Газовыделения с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта на метанообильных шахтах// 3-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. 2010. С. 193 – 200.

7. Метановыделение из отбитого угля при интенсивной отработке угольного пласта/ Н.М. Качурин, А.М. Борщевич, А.А. Бухтияров, И.И. Сарычева // 3-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. 2010. С. 200 – 205.

8. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Метановыделение в очистной забой из подработанных и надработанных пород». Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2011. Вып. 1. С. 62-68.

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 13.02.2012 г.

Формат бумаги 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 100 экз. Заказ 37

Тульский государственный университет.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95.