

Б.В. Бокий, д-р техн. наук
(АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»),
В.Г. Перепелица, д-р техн. наук, проф.
(ИГТМ НАН Украины),
И.А. Ефремов, канд. техн. наук
(АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»).

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАНА ВОКРУГ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Встановлено особливості, описано механізм і визначено параметри процесу перерозподілу метану навколо очисного вибою, який рухається, у вугільних шахтах.

METHANE REDISTRIBUTION AROUND THE ADVANCING BREAKAGE FACE

This article describes peculiarities and mechanism of and states parameters for the process of methane redistribution around the advancing breakage face in the coal mines.

При высоких скоростях подвигания очистных забоев процесс активных сдвижений массива горных пород развивается в пространстве и охватывает весьма большие участки горного массива. При этом газ движется вдоль линий градиента давления от большего в сторону меньшего. Однако, распределение интенсивности и направление потоков газа отличается особой сложностью, которая обусловлена движением лавы, а также ее примыканием к ранее выработанному пространству [1, 2, 3].

Для установления механизма перераспределения метана вокруг движущегося очистного забоя проводилось имитационное моделирование динамического сдвижения массива горных пород вокруг движущегося очистного забоя и перераспределения метана вокруг него. При этом использовался подход, описанный в работе [4] и моделировалось два процесса - геомеханический и газодинамический.

Время протекания процессов учитывалось дискретно, приращение времени принято равным не более полушага посадки основной кровли, что позволило учесть наиболее характерные моменты динамики сдвижений подрабатываемого газонасыщенного массива.

В модели учитывалась скорость подвигания лавы. Для этого передвижение полости выработанного пространства выполнялось с разным приращением – чем больше скорость, тем больше приращение по координате подвигания лавы в единицу времени. Точно также изменялись внутренние граничные условия, описывающие распределение давления рудничной атмосферы в горных выработках с учетом депрессии вентилятора главного проветривания (ВГП).

На каждом этапе моделирования геомеханического и газодинамического процессов в качестве исходных данных использовались результаты, полученные на предыдущем шаге, что позволило корректно учесть начальное состояние моделируемой системы.

Учтена анизотропия массива горных пород - проницаемости по простира-

нию, падению и по нормали к напластованию и динамикой изменения этих параметров во времени, что повысило достоверность результатов моделирования

Моделировалась фильтрация газа вокруг движущегося очистного забоя, примыкающего к ранее выработанному пространству. То есть, взят наиболее характерный случай бесцеликовой отработки запасов, что является отличительной особенностью данной модели. Кроме того обеспечена возможность ввода любого количества выработанных пространств, в том числе и в пределах свиты пластов.

Форма выработанных пространств в данной задаче выбиралась произвольной. Это позволило установить особенности перераспределения давления и потоков газа в условиях геомеханического и газодинамического взаимодействия смежных выработанных пространств и расширить область применения результатов с точки зрения отработки запасов угля до 90%, поскольку почти все запасы на большой глубине вынимают примыкающими лавами (существующие модели ориентированы на 5-10% запасов).

При разработке модели в соответствии с [4] приняты следующие допущения и ключевые положения.

1. Процесс фильтрации газа вокруг действующей лавы протекает в ламинарном режиме.

2. Процесс фильтрации газа в среде с высокой проницаемостью подобен процессу фильтрации в среде с низкой проницаемостью и отличается только скоростью протекания (критерий подобия Фурье).

3. Высота зоны трещиноватых пород в кровле выработки и области интенсивной дегазации распространяется не далее 30 вынимаемых мощностей пласта, а общая область фильтрации газа распространяется в кровлю не далее 120-150 вынимаемых мощностей пласта.

4. Содержание газа в массиве не существенно влияет на его процесс сдвижения и разрушения.

5. При бесцеликовой отработке смежных запасов происходит геомеханическое и газодинамическое взаимодействие выработанных пространств.

6. Скорость подвигания очистного забоя оказывает существенное влияние на процесс сдвижения вмещающих пород и перераспределения газового давления и его потоков.

7. Анизотропия прочностных и деформационных свойств массива порождает в процессе его подработки анизотропию проницаемости.

Процесс дегазации массива горных пород вокруг действующего очистного забоя происходит в результате разрушения вмещающих пород, которые переходят в запредельное состояние в результате развития зоны полных сдвижений. После разрушения вмещающих пород и образования трещин и расслоений газ начинает двигаться в сторону градиента давления, который направлен от нетронутого массива в сторону рабочего пространства действующей лавы и ее выработанного пространства. Таким образом, закономерности перераспределения газового давления и его потоков определяются законами фильтрации газа, а

процесс сдвигения - законами теории упругости и теории прочности горных пород.

Направление и интенсивность газовых потоков зависят от распределения проницаемости или коэффициентов общей диффузии и изменения этого распределения во времени. Для того чтобы получить эту информацию (распределение проницаемости толщи вокруг действующего очистного забоя и его изменение во времени), необходимо решить задачу о динамике необратимых сдвижений массива вокруг движущейся лавы. Таким образом, задача исследования процесса перераспределения газового давления и его потоков вокруг действующей лавы распадается на две сопряженные. Сначала решается задача о динамике сдвижений массива горных пород, при решении которой получаем распределение проницаемости массива (коэффициентов общей диффузии метана) в пространстве и времени, а затем эти распределения используются в качестве исходных данных для решения задачи о фильтрации газа. Именно поэтому геомеханическая и фильтрационная задача являются сопряженными.

Величина подвигания очистного забоя принималась постоянной и равной 20-50 м в зависимости от размера расчетной схемы и требований к степени ее детализации. Такой шаг подвигания лавы достаточен, чтобы учесть основные периодические процессы, возникающие на активной стадии сдвижений и обусловленных периодическим зависанием и обрушением основной кровли и вышележащих породных слоев. Поскольку время применялось как глобальная переменная, скорость подвигания очистного забоя учитывалась тем, что время, в течение которого лава передвигалась на расстояние, равное элементарному шагу, зависело от скорости ее подвигания. Чем больше скорость, тем за меньшее время проходила лава элементарный участок или тем больше ее подвигание в течение месяца. Таким образом, в течение месяца лава, имеющая скорость 100 м/мес., преодолевала пять элементарных участков длиной по 20 м, а при скорости 150 м/мес. восемь таких участков.

Решение сопряженных задач геомеханики и фильтрации реализовали следующим образом. Обе сопряженные задачи решались методом конечных разностей. Именно поэтому приращения времени и координат очистного забоя осуществлялось дискретно, а величина приращения выбиралась так, чтобы быть меньшей периода и шагу обрушения основной кровли. Именно такой подход позволил гарантировать требуемую точность решения обеих сопряженных задач.

Решение задачи о фильтрации газа осуществлялось на примере массива осадочных горных пород, вмещающего пласт m_3 на глубине 1200 м в условиях 16-й западной лавы шахты им. А.Ф. Засядько [4].

Эта лава является типичным производительным очистным забоем, обрабатывающим угольный пласт m_3 с природной газоносностью до 25 м³/т.с.б.м. Пласт является сверхкатегорийным по газу, поскольку при работе лавы выделяется до 100 м³ метана в минуту. Лава обрабатывается как примыкающая к сплошному ранее выработанному пространству на глубине 1200 м. Поскольку около 90% запасов пологих угольных пластов обрабатываются примыкающими

не одиночными лавами, то такой подход свидетельствует о представительности выбранного для моделирования объекта. Таким образом, выбранный объект для моделирования представляет собой типичный случай отработки запасов на большой глубине в сложных горно-геологических и газодинамических условиях. Кроме того, в окрестности данной лавы проводились ежемесячные инструментальные наблюдения за газовыделением, что позволяет сравнить расчетные результаты с фактическими.

Вынимаемая мощность пласта составляет 2 м, длина очистного забоя 250 м, скорость его подвигания равна 150 м/мес. Общие размеры расчетной схемы составили: по высоте 400 м, по простиранию 1000 м, по падению 450 м. Пласт размещен с таким расчетом, чтобы границы расчетной схемы были удалены в почву далее 40, а в кровлю – более 150 вынимаемых мощностей. Экспериментально установлено, что на таком расстоянии возмущение природного распределения газового давления вследствие очистных работ пренебрежимо мало [5]. Расстояние от ближайших границ выработанного пространства к боковым или торцевым стенкам модели принималось не менее 100 м, что также гарантировало соблюдение граничных условий, соответствующих нетронутому массиву, поскольку размер области естественной дегазации краевой части массива, как правило, не превышает 20–30 м.

Со стороны восстания была задана часть ранее выработанного пространства 15-й западной лавы на ширину 100 м. Границы зон различной проводимости совмещали с характерными контактами разнородных по прочности и газопроницаемости слоев. В качестве таких границ принимались контакты угольных пластов с мощными слоями песчаника, известняка или алевролита. В итоге было выделено 8 характерных зон проводимости, коэффициент общей диффузии которых уменьшался в направлении от пласта в кровлю и почву. Разница коэффициентов общей диффузии метана для нетронутого массива и обрушенных пород составляла порядка десяти тысяч.

Такой диапазон проводимости обусловлен не только существенным различием величин коэффициента общей диффузии для характерных областей горного массива, затронутого очистными работами, но и спецификой решения задачи неравновесной фильтрации.

Сокращение времени решения было достигнуто за счет применения метода учета времени путем использования гидродинамического критерия подобия Фурье. При его соблюдении длительные процессы фильтрации в среде с низкой проницаемостью подобны быстрым процессам в среде с высокой проницаемостью.

Пробные расчеты процесса фильтрации на разработанной модели показали, что при использовании интервала приращения по времени, равного ~ 1 с, и характерных размерах расчетной области решение задачи является весьма устойчивым. Если шаг по времени увеличивать, то при определенных соотношениях проводимости массива и конфигурации расчетной области могут возникать неустойчивости, которые приводят к плохой обусловленности матрицы коэффициентов численного аналога уравнения фильтрации.

Достоверность результатов моделирования с помощью разработанной комплексной модели проверялась путем сравнения результатов моделирования с данными шахтных инструментальных наблюдений. Как было отмечено выше, проницаемость выработанного пространства является одним из ключевых параметров, от которого зависит характер протекания процесса фильтрации метана в окрестности действующей лавы. Коэффициенты общей диффузии окружающего массива являются функциями координат и времени. Эти коэффициенты являются входными параметрами математической модели фильтрации. Поэтому обоснованный выбор распределения коэффициентов диффузии играет важную роль в достижении достоверных результатов моделирования.

В связи с этим результаты решения первой геомеханической сопряженной задачи оценивались по сравнению расчетных распределений проницаемости с измеренными в натуре. При постановке экспериментальных работ учитывались следующие обстоятельства. Действующий очистной забой является особо опасным объектом, инструментальные наблюдения в котором производить весьма сложно. Тем более это касается выработанного пространства, которое формируется после выемки угля в зоне активных сдвижений. В этой зоне происходит обрушение непосредственной и основной кровли, что препятствует прямому доступу с измерительными инструментами.

Заметим, что по мере отхода лавы от конкретной точки выработанного пространства происходит его уплотнение под действием увеличивающегося веса подработанного массива. Поэтому характер изменения проводимости зон весьма сложен. Другими словами, по мере подсечки (подработки) определенного участка движущейся лавой объем пород, слагающих этот участок, переходит через ряд различающихся состояний, когда его проводимость сначала увеличивается, а затем несколько понижается по мере уплотнения обрушенных пород. Кроме того, как уже отмечалось, изменяется соотношение коэффициентов общей диффузии вдоль трех основных направлений.

Вначале толща попадает в зону динамического опорного давления, массив сжимается, что приводит к закрытию природных отдельностей и трещин кливажа. Поэтому проницаемость в зоне опорного давления несколько (на 30% для данной глубины разработки) уменьшалась по сравнению с проницаемостью нетронутого массива. Напомним, что проницаемость вдоль напластования в нетронутом массиве и в зоне опорного давления несколько выше, чем в направлении нормали к напластованию. Причем проницаемость вдоль нормали к напластованию становилась выше, чем вдоль напластования. Этому содействовали субвертикальные трещины горного давления. Однако по мере отхода лавы происходило уплотнение обрушенных пород и подработанной толщи, что опять приводило к закрытию трещин и уменьшению проницаемости массива.

При определении величины коэффициента общей диффузии трещиноватого массива горных пород как функции горного давления использовались хорошо известные зависимости проницаемости массива горных пород от величины горного давления по данным [6]. Так, увеличение глубины в три раза понижает проницаемость угольного пласта в 11 раз. Для нагнетания воды в данный пласт необходимо

повышать рабочее давление жидкости в шесть раз. Это означает, что закрытие трещин и отдельностей в результате уплотнения обрушенных пород приведет к аналогичному снижению проницаемости и возможному повышению остаточного газового давления в отработанной области.

С удалением от плоскости пласта вниз и вверх по нормали меняется не только величина проницаемости, но и ее распределение, что обусловлено свойствами отдельных породных слоев, слагающих характерные зоны проницаемости, и особенностями процесса сдвижений. Кроме того, распределения проницаемости в одном и том же месте расчетной области изменяются во времени, т. е. по мере подвигания очистного забоя [7]. Так, после отхода лавы от фиксированного места обрушения проницаемость постепенно уменьшается в силу уплотнения ранее обрушенных пород. Это означает, что на каждом из этапов подвигания лавы распределение проницаемости изменялось для каждой из 8 зон. Другими словами, для 10 этапов в качестве исходных данных для моделирования было задано 80 индивидуальных распределений проницаемости.

Согласно [8], коэффициент общей фильтрации метана представляет собой обобщенную характеристику процесса фильтрации, составляющими которого являются молекулярная, конвективная диффузии и другие виды массопереноса. Важно лишь то, что все эти составляющие процессы массопереноса подчиняются закону Фика, что позволяет очень сложный физический процесс фильтрации метана через слоистый трещиноватый массив формально описывать уравнением ламинарной фильтрации. Метан фильтруется через поры горных пород, по граням зерен породообразующих минералов, через микротрещины, отдельности и, наконец, макротрещины и плоскости расслоения [9].

Порядок величины коэффициента диффузии при молекулярной диффузии приближается к величинам коэффициента диффузии молекул через твердое тело, который составляет примерно 10^{-12} м²/с. Диффузия через трещины уже характеризуется коэффициентами диффузии газа в газ (метана в воздух), порядок которых согласно [8,10] составляет 10^{-4} м²/с. Основная доля метана, таким образом, диффундирует в сторону призабойного пространства при коэффициенте общей фильтрации порядка 10^{-6} – 10^{-4} м²/с. Характерное время фильтрации метана вокруг очистного забоя согласно опытным данным эксплуатации дегазационных скважин составляет от 1 до 24 месяцев и более. Площадь фильтрации не изменяется, поэтому принимается равной 1 м². Тогда безразмерный критерий в виде произведения меньших величин обоих диапазонов, деленного на единичную площадь, составит ~ 2,6, а больших – 6240. Это значит, что при характерном времени процесса в модели, равном ~ 1 с, коэффициент общей фильтрации должен изменяться в пределах от единиц в нетронутом массиве до десятков тысяч в зоне полных обрушений.

Прирост остаточного газового давления в ранее отработанном пространстве носит временный характер, обусловленный неравномерностью процесса фильтрации метана.

В процессе подработки и обрушения толщи ее проницаемость увеличивается практически мгновенно, а давление падает постепенно. Поэтому после под-

работки (и надработки почвы) из массива, прилегающего к действующей лаве, возникает интенсивный газовый поток, который направлен в сторону градиента давления. Главный поток ориентирован в сторону только что образованного выработанного пространства 16 западной лавы. Однако часть газа перетекает в ранее выработанное пространство, проводимость которого выше, чем проводимость нетронутого массива, а остаточное давление там минимально. Некоторая доля перетекающего потока возвращается назад в выработанное и рабочее пространство действующей лавы.

Результаты моделирования позволили установить еще один эффект, который заключается во временном частичном восстановлении газового давления в выработанном пространстве действующей лавы. Тот факт, что среднее давление в зоне активных сдвижений и даже в зоне установившегося сдвижения падает постепенно, подтверждается многими экспериментальными данными. Природа естественной дегазации разрушенных пород весьма сложна и носит выраженный нестационарный характер. Доказано, что в измельченном угле или кусках газосодержащих пород самопроизвольная дегазация протекает десятки или сотни часов. При этом ведущую роль в снижении газосодержания выполняет физический процесс фильтрации [11].

В результате обрушения крупных блоков пород размером порядка метра и более и дальнейшем их уплотнении процесс газоистощения длится 1000 суток и более. При этом произвольное снижение газосодержания происходит в равной мере за счет физических процессов фильтрации и твердотельной диффузии. Согласно данным, опубликованным в [11] в стесненных условиях крупные блоки метаносодержащих пород и углей способны в течение 1000 суток удерживать до 30 % первоначального объема газа. Известно множество экспериментальных результатов, как в отечественных, так и в зарубежных публикациях, подтверждающих длительный процесс самопроизвольной дегазации (а, следовательно, и постепенного падения давления) из блоков угля и углесодержащих пород. Так, по данным [12], интенсивная дегазация из керна угля диаметром 61 мм была зафиксирована в условиях атмосферного давления в течение месяца. Даже через месяц скорость выделения метана составляла 12-15 мл/сутки.

Подпитывающую роль выполняет и граница области полных сдвижений, расположенная в непосредственной близости к ранее выработанному пространству предыдущей лавы. Именно этими источниками объясняется достаточно длительное поддержание повышенного газового давления в ранее выработанном пространстве у границы с действующей лавой и в выработанном пространстве действующей лавы. В силу этого градиент перепада давлений больше, что дает возможность заметить временное повышение остаточного газового давления как в подработанной, так и в надработанной толще. Другими словами, эффект временного повышения остаточного давления в смежном ранее выработанном пространстве имеет симметричную форму и определяется единым механизмом, причины которого обсуждались выше.

Таким образом установлено, что движение газа не является двумерным, а обладает явно выраженной трехмерностью [13]. Это означает, что нельзя про-

цессы фильтрации газа рассматривать только в плоском сечении. Существуют интенсивные обменные потоки между соседними вертикальными сечениями, проведенными как вдоль лавы, так и вдоль линии ее подвигания [14].

Установленные закономерности перераспределения метана имеют важное практическое значение. Так, переток метана в ранее выработанное пространство объясняет экспериментально обнаруженный факт меньшей газообильности примыкающих лав по сравнению с одиночными, отрабатываемыми в аналогичных горно-геологических условиях.

В связи с тем, что часть перетекшего газа возвращается назад в действующую лаву, появляется реальная возможность снизить газообильность ранее выработанного пространства за счет улавливания возвращающегося газа через специальные скважины, буримые на ранее выработанное пространство. В связи с этим был проведен анализ доли перетоков при разных скоростях подвигания примыкающей лавы. Количество газа, перетекающего в ранее выработанное смежное пространство определено путем интегрирования в вертикальной плоскости, проходящей через вентиляционный штрек. При этом нормальную составляющую градиента газового давления к указанной плоскости умножали на проницаемость. Интегрирование осуществлялось на высоту 120 вынимаемых мощностей от разрабатываемого пласта и на участке простирания пласта от 50 м впереди лавы до 300 м позади нее, то есть в пределах зоны активных сдвижений.

Результаты обработки данных моделирования в диапазоне скоростей подвигания от 50 до 250 м/мес. показали, что процент перетока газа из зоны активных сдвижений в смежное, ранее выработанное пространство изменяется от 5 до 25 %. При этом от 37 до 70 % величины общего перетока возвращается назад в вентиляционную выработку действующей лавы. Величины перетоков и возвратов газа описываются логарифмическими зависимостями при достоверности аппроксимации, равной 0,94-0,97.

Затухающий характер зависимостей имеет геомеханический смысл и хорошо согласуется с общими закономерностями сдвижений подрабатываемой толщи пород. Так увеличение скорости подвигания очистного забоя с 50 до 250 м/мес. изменяет характер сдвижений подрабатываемого массива. При малых или умеренных скоростях подвигания происходит регулярная посадка основной кровли и обрушение непосредственной. При этом создаются интенсивные зоны трещиноватости в подрабатываемых породных слоях. Эти зоны обуславливают высокую проницаемость массива в области активных сдвижений, что обеспечивает возможность фильтрации почти всего выделяющегося из подрабатываемой толщи газа в действующую лаву и ее выработанное пространство.

Однако, по мере увеличения скорости подвигания, зависания породных слоев увеличиваются, а степень разрушения пород кровли снижается. Это затрудняет процесс разрушения подрабатываемого массива, хотя газ выделяется в полостях расслоений. В связи с тем, что путь миграции выделяющегося газа в сторону рабочего пространства действующей лавы затрудняется, он ищет другие направления, в том числе и через ранее выработанное пространство, кото-

рое обладает неограниченной поглотительной способностью в силу практически полного газоистощения.

Таким образом, рост скорости подвигания лавы приводит к увеличению доли перетока газа в смежное выработанное пространство. Увеличивается и его возврат назад в вентиляционный горизонт действующей лавы, поскольку ранее выработанное пространство обладает значительным гидродинамическим сопротивлением и не успевает поглощать весь перетекший газ в силу установленной выше зависимостью процесса фильтрации от времени и проявлением его неравновесности при больших скоростях подвигания очистных забоев. Вместе с тем, бесконечное увеличение перетока газа в смежное выработанное пространство невозможно, оно стабилизируется при скоростях подвигания лавы более 200 м/мес. по причине стабилизации процесса активных сдвижений подрабатываемого массива. То есть дальнейшее увеличение скорости подвигания уже практически не меняет процесс активных сдвижений и не может увеличить проницаемость толщи. Этим объясняется затухающий характер перетока и возврата газа.

Если сравнить расчетное суммарное газовыделение с экспериментальным, полученным на основании фактических измерений газовыделения, можно сделать вывод о весьма удовлетворительной согласованности результатов моделирования с натурными замерами. Так, максимум газовыделения расположен на расстоянии порядка 40 м позади лавы, а уровень газовыделения на расстоянии 150 м за лавой составляет 0,32 от максимума для натуральных данных и 0,28 – для результатов моделирования. Такое совпадение данных свидетельствует в пользу достоверности результатов моделирования.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что интенсивность газовыделения падает с удалением от кровли отрабатываемого пласта. При увеличении расстояния с 10 до 30 м интенсивность газовыделения уменьшается почти в три раза. Это означает, что близлежащие газоносные породные слои и угольные спутники дегазируются быстрее, чем удаленные от пласта в кровлю и тем более почву. В принципе это согласуется с известными представлениями о газодинамике угленосного массива горных пород. Однако данный факт позволяет по-новому взглянуть на процесс частичного восстановления газового давления в выработанном пространстве, формируемом действующей лавой. Именно удаленные газоносные слои после обрушения и уплотнения подработанной толщи могут вносить главный вклад в процесс частичного восстановления газового давления, поскольку их газоносность уменьшается медленнее, следовательно, запасы сорбированного газа больше.

Отметим еще одну особенность, которая состоит в сдвиге пика газовыделения в сторону, противоположную направлению подвигания очистного забоя, по мере удаления газоносного слоя от кровли отрабатываемого угольного пласта. Причина этого эффекта заключается в особенностях процесса обрушения, когда граница полных сдвижений формируется в виде консолей, зависающих таким образом, что процесс сдвижений подработанной толщи начинается тем позже,

чем выше породный слой залегает над обрабатываемым пластом. Интенсивная дегазация газоносного слоя начинается только после его обрушения.

Третья особенность состоит в том, что кривые газовыделения на разных горизонтах пересекаются на расстоянии 180–200 м позади лавы. Это является следствием запаздывания процесса дегазации подработанных газоносных слоев по мере удаления от кровли обрабатываемого пласта. Поэтому ближе расположенные газоносные слои истощаются быстрее, в результате чего интенсивность газовыделения из вышележащих начинает с определенного момента превышать скорость газовыделения из нижележащих слоев. Указанные особенности являются прямым следствием нестационарности процесса дегазации и фильтрации метана вокруг действующего очистного забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросян, А.Э. Зависимость газообильности очистных выработок от способа управления кровлей / А.Э. Петросян // Рудничная аэрология. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 98 – 102.
2. Скляр, Л.А. О давлении газа в массиве пласта / Л.А. Скляр // Изв. ВУЗ Горн. журнал. - 1960. - № 8. - С. 51 – 53.
3. Кузнецов, С.В. О давлении газа в угольных пластах / С.В. Кузнецов // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. Ископаемых. - 1966. - № 5. - С. 28 – 37.
4. Бокій, Б.В. Моделювання фільтрації метану навколо очисного вибою, що рухається / Б.В. Бокій, В.В. Назимко // Форум гірників. - Дніпропетровськ, 2005. -Т.1(А-Г). - С. 96-110.
5. Современные проблемы шахтного метана: Сб. научн. трудов / МГГУ.- М.: МГГУ, 1999.- 324 с.
6. Малышев, Ю.Н. Комплексная дегазация угольных шахт / Ю.Н. Малышев, А.Г. Айруни . -М.: Академия горных наук, 1999. -321 с.
7. Экспериментальная оценка газопроницаемости подработанного угленосного массива / А.Ф. Булат, Е.Л. Звягильский, В.В. Лукинов, А.П. Клец, И.А. Ефремов, Б.В. Бокий, Д.П. Гуня, В.В. Фичев, В.П. Иванов, А.А. Тихонов, В.В. Чередников // Наука и образование: Сб. науч. тр. / НГУ.- Днепропетровск, 2004.- Т. 3, № 19.- С. 123-128.
8. Рудничная вентиляция: Справочник / Под ред. К.З. Ушакова.- М.: Недра, 1988.- 144 с.
9. Исследование утечек через выработанное пространство и возможностей управления ими / Н.В. Безкровный, Б.В. Бокий, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, С.Г. Ирисов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины.- Днепропетровск, 2002. -Вып. 37 -С. 122-128.
11. Tarnowsky, J. Calculations concerning coal and gas outbursts / J. Tarnowsky // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. -Wollongong, Australia , 1995.- P. 49-61.
12. Айруни, А.Т. Проблемы разработки метаноносных угольных пластов, промышленного извлечения и использования шахтного метана в Карагандинском бассейне / А.Т. Айруни.- М.: РАН, 2002.- 320 с.
13. Gillies, A. Measurement of coal permeability using large samples / A. Gillies, I. Gray // Int. Symp. on management and control high gas emission.- Wollongong, Australia, 1999.- P. 317-321.
14. Бокий, Б.В. Трехмерное перераспределение давления метана в окрестности двигающегося очистного забоя / Б.В. Бокий // XV научная школа им. академика С.А. Христиановича "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках" - Алушта, 2005. -С. 17-26.
15. Экспериментально-аналитический метод прогноза направлений и интенсивности газовых потоков / А.Ф. Булат, С.А. Курносков, И.Н. Слещев, И.А. Ефремов, Б.В. Бокий // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины.- Днепропетровск, 2006. - Вып. 55. - С. 10 -21.