

компьютерном моделировании с привлечением численных методов, таких как метод конечных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1947.
2. Руппенейт К.В. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1956. –
3. Свойства горных пород и методы их определения / Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
4. Трумбачёв В.Ф., Мельников Е.А. Распределение напряжений в междукамерных целиках и потолочинах. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 106 с.
5. Трумбачёв В.Ф., Мельников Е.А. Исследование влияния мелких прослоек на напряжённое состояние междукамерных целиков и потолочин // Методы определения размеров опорных целиков и потолочин. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 133-139.
6. Zern E.N. Coal Miners' Pocketbook. McGraw – Hill Book Co, New-York, 1928.
7. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Взамен ГОСТ 21153.2-75; введ. 19.06.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 10 с.
8. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Расчёт несущих элементов подземных сооружений. – К.: Наук. дум-ка, 2001. – 168 с.
9. Методы расчёта целиков и потолочин камер рудных месторождений / А.М. Ильштейн, Ю.М. Либерман, Е.А. Мельников и др. – М.: Наука, 1964. – 141 с.
10. Ерофеев Н.П. Прогнозирование устойчивости горных выработок. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1977. – 81 с.
11. Усаченко Б.М. Геомеханические основы технологии подземной разработки месторождений гипса и охраны выработанных пространств. Автореф. дис. ...докт. техн. наук. – Днепропетровск, 1986. – 31 с.
12. Методика определения параметров системы разработки / согласно научно-исследовательской работе по теме №21 ВНИИСоль / для условий Артёмовской гипсовой шахты.
13. Серая А.Р., Левицкий П.Д., Щёголь А.С. Исследование прочностных свойств каменной соли Илецкого и Солотвинского месторождений / Техника и технология добычи и переработки каменной соли // Труды ВНИИСоль. – Артёмовск, 1971. – Выпуск 17 (25). – С. 25-30.
14. Бенявски З. Управление горным давлением: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 254 с.
15. Шевяков Л.Д. О расчёте прочных размеров и деформаций опорных целиков // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1941. – №7, 8. – С. 3-13.
16. Усаченко Б.М. Геомеханика подземной добычи гипса. – К., Наук. дум-ка, 1986. – 216 с.
17. Слесарев В.Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. – М.: Углетехиздат, 1984. – 196 с.

УДК 622.411.332:533.17

В.В. Круковская

К РАСЧЕТУ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Дано огляд методів розрахунку фільтрації метану навколо гірських виробок. Приводиться їхній короткий опис. Розглянуто умови й області їх ефективного застосування.

TO CALCULATION OF GAS FILTRATION IN THE CRACK-POROUS NON-UNIFORM ENVIRONMENT

Methods of calculation of methane filtration around of excavation are analyzed. Their brief description is resulted. Conditions and areas of their of their effective application are considered.

При решении различных задач, связанных с проблемами метановыделения в угольных шахтах, дегазации и добычи метана из газосодержащих пород угленосного массива в зоне влияния очистной выработки, необходимо знать границы области фильтрации метана и характер его движения в этой области.

Кроме этого большое значение имеет информация о возможных местах скопления метана, так называемых техногенных газовых ловушках, образующихся в кровле разрабатываемого пласта после отхода лавы.

В естественном состоянии, несмотря на природную неоднородность состава и свойств, деформированность и нарушенность в результате различных геологических и тектонических воздействий, массив горных пород находится в статическом равновесии, с установившимся начальным полем напряжений. В результате производственной деятельности человека по проведению горных выработок и извлечению полезных ископаемых нарушается равновесное состояние породного массива. Вследствие чего происходят сложные геомеханические процессы, вызывающие возникновение дополнительного поля напряжений. Под его действием начинается выход и движение (фильтрация) метана, содержащегося в угольных пластах и газоносных песчаниках.

При изучении фильтрации газа в трещиновато-пористом горном массиве следует учитывать массу условий. Это и геометрические особенности отработки конкретной лавы, и слоистость вмещающего массива, обуславливающая различия геомеханических и фильтрационных свойств каждого слоя, зависимость проницаемости пород от напряженно-деформированного состояния массива и многое другое.

Существуют аналитические, численные и экспериментальные методы решения подобных задач.

Сразу можно сказать, что система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая изменение напряженно-деформированного состояния слоистого углепородного массива с проведенными в нем выработками и связанной с этим процессом фильтрации метана, в подавляющем большинстве случаев не имеет аналитического решения.

Что касается экспериментальных исследований, то на сегодняшний день получено достаточно большое количество данных:

1) о напряжениях в различных точках массива в окрестности горных выработок, которые измерялись методом локального гидроразрыва [1, 2], методом возмущения поля [3], методом буровых скважин [4] и др.

2) О давлении метана в угольных пластах [5], для измерения которого в пласт под различными углами бурятся скважины, герметизируются, кроме той части (измерительной камеры), куда поступает газ из пласта.

3) О проницаемости, пористости образцов горных пород, в том числе и крупногабаритных (различных углей, выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников, других пород), в условиях гидростатического и разнокомпонентного трехмерного напряженного состояния [6 - 11]. В этих исследованиях установлено, что проницаемость пород скачкообразно возрастает при достижении разностью максимальной и минимальной компоненты тензора напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) предела прочности; что при увеличении гидростатической нагрузки на образец от 0 до 60 МПа его проницаемость падает практически до нуля по экспоненциальной зависимости; и сделано множество других важных выводов.

4) О различных типах природных газовых ловушек [8, 12], образование которых обусловлено разнообразными геологическими факторами.

Однако полной картины происходящих в породной толще процессов эти данные не дают. С их помощью невозможно с достаточной точностью получить распределение давления метана в массиве, направления и скорости его перемещения, размещение возможных техногенных коллекторов газа, так как, во-первых, эмпирические зависимости, установленные на основе этих исследований, справедливы только для того диапазона условий и факторов, в которых они были получены. При изменении условий (увеличении глубины, разработке нового месторождения, изменении технологических параметров и др.) требуется проведение повторных исследований. Во-вторых, опережающий прогноз характера и параметров геомеханических и фильтрационных процессов осуществить практически невозможно вследствие недостаточного количества требуемой информации и необходимых эмпирических зависимостей, из-за большой трудоемкости и длительности натурных исследований. В-третьих, натурные исследования не позволяют получить наиболее важные для практики предельные состояния объектов (например, минимальное сопротивление крепи в выработке, при котором она разрушается), так как это приводит к недопустимым нарушениям безопасности горных работ или экономическому ущербу.

Численные методы представляют собой наиболее приемлемый путь решения поставленной задачи. Их суть заключается в аппроксимации сплошной среды некоторой дискретной моделью, а исходных дифференциальных уравнений – системой линейных уравнений, которые могут быть решены с применением компьютера.

Для решения уравнений геомеханики и гидрогазодинамики можно использовать множество численных методов. Наиболее применяемые из них – метод конечных разностей (МКР) [13 - 16] и метод конечных элементов (МКЭ) [17 - 20]. Одной из разновидностей МКЭ является метод суперэлементов (МСЭ) [21]. Существуют и другие – метод граничных элементов (МГЭ) [22], метод спектральных схем, но их использование ограничено специальным классом задач.

Первым из численных методов появился метод конечных разностей. С его помощью был решен ряд задач горной геомеханики и гидродинамики. Решение начинается с того, что исследуемая область покрывается конечно-разностной сеткой, в узлах которой и будут находиться искомые неизвестные величины. Затем в узлах задаются начальные, приближенные значения функций. Далее начинается вычислительный цикл, когда для приближенного определения неизвестных используется некоторый конечно-разностный аналог дифференциального уравнения. Вычислительный цикл повторяется до тех пор, пока решение не выйдет на стационарное с заданной степенью точности.

Но настоящий «инструмент» для проведения теоретических исследований был получен лишь с появлением МКЭ. По этому методу интересующая исследователя область заменяется дискретной, состоящей из конечных элементов (прямоугольных, треугольных, стержневых и др.), связанных между собой в узлах. Сначала рассматривается каждый элемент по отдельности, и изучаются его

свойства независимо от других. Затем элементы объединяются, и удовлетворяются условия непрерывности внутри области и глобальные граничные условия на ее границе. Таким образом, применительно к задачам геомеханики и газодинамики, появляется возможность учитывать форму поперечного сечения горных выработок, сложные граничные условия и разнообразные геомеханические и фильтрационные свойства материалов.

МСЭ основывается на создании многоуровневой последовательно-параллельной процедуры рассмотрения равновесия заданной области. На первом этапе исследуется исходный объект, состоящий из нескольких укрупненных частей – суперэлементов, обладающих значительно меньшим, чем в МКЭ, количеством степеней свободы. Полученные в результате решения данные служат исходными граничными условиями для второго этапа расчета, в котором крупный элемент разбивается на более мелкие. Таким образом, метод суперэлементов позволяет дискретизировать достаточно большие области. Данные расчеты весьма актуальны при расчетах взаимного влияния нескольких выработок и выемочных полей.

Наиболее общей моделью среды, отвечающей шахтным условиям, является неоднородная трещиновато-пористая слоистая анизотропная среда, фильтрационные и коллекторные свойства которой характеризуются пористостью и проницаемостью. При продолжительном движении забоя с некоторой постоянной скоростью течение метана относительно подвижной системы координат, связанной с забоем можно считать установившимся и плоским [13]. Дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее фильтрацию метана, имеет вид:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + q = 0, \quad (1)$$

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

Как показано в работах [8, 23], в угле содержится до 90% сорбированного газа, а в газоносных песчаниках Донбасса – до 10%. Десорбцию метана из угольных пластов и газоносных песчаников можно представить как действие равномерно распределенных источников метана [5]. Причем мощность этих источников $q = q(p, t)$ на единицу объема угля или песчаника можно определить как [13]:

$$q = \frac{\partial}{\partial t} (q_{своб} + q_{сорб}), \quad (2)$$

где $q_{своб}(t, p, x, y)$ – количество свободного газа в единице объема углепородного массива, $q_{сорб}(t, p, x, y)$ – количество сорбированного газа в этом же объеме.

С учетом выражения (2) уравнение (1) переписывается в следующем виде:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\frac{\partial}{\partial t} (q_{своб} + q_{сorb}). \quad (3)$$

Подобная задача с соответствующими начальными и граничными условиями была решена многими авторами. Одномерная нестационарная задача фильтрации в угольном пласте – Кузнецовым С.В. и Трофимовым В.А. [24]; Христиановичем С.А., Коваленко Ю.Ф. и Каревым В.П. [5, 25]; Садохиным В.П., Жирновой Т.С., Кудряшовой В.Д. [26] и другими. Плоская задача нестационарного движения метановоздушной смеси в зоне выработанного пространства была решена Абрамовым Ф.А., Фельдманом Л.П., Святным В.А. [27] методом крупных частиц; плоская задача неустановившейся фильтрации метана в слоистом массиве – Мясниковым А.А., Садохиным В.П., Жирновой Т.С. [13] при помощи метода конечных разностей.

Кроме этого существует множество решений похожих задач гидромеханики, где рассматривается фильтрация жидкости в пористых средах [15-17, 19, 20], которые можно перенести, с некоторыми поправками, на случай фильтрации газа.

Но во всех вышеперечисленных работах можно выделить несколько существенных недостатков. Во-первых, в них не учитывается тот факт, что область фильтрации имеет конечные границы, что нетронутый массив, в котором поры не соединены между собой системой трещин, – непроницаем [24, 25]. Область фильтрации расположена в зонах начала трещинообразования, интенсивной трещиноватости и разрушения, куда входит и зона самоподбуртовки разрушенных пород. Определить эти зоны можно, только решив соответствующие задачи геомеханики с учетом пластики, разупрочнения и разрушения.

Во-вторых, как известно, фильтрационные свойства угля и различных горных пород зависят от напряжено-деформированного состояния, в котором они находятся [6]. То есть коэффициент проницаемости в каждой точке углепородного массива определенным образом зависит от величины компонент тензора напряжений в этой точке, а точнее, от разности максимальной и минимальной компоненты тензора главных напряжений [28]:

$$k_{II} = \begin{cases} 0, & \text{при } \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma^{ynp}; \\ f(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{k_{max}}{\sigma^{nl} - \sigma^{ynp}} (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma^{ynp}), & \text{при } \sigma^{ynp} < \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma^{np}; \\ k_{max}, & \text{при } \sigma_1 - \sigma_3 > \sigma^{np}; \end{cases}$$

где σ^{ynp} – предел упругости породы, σ^{np} – предел прочности.

В-третьих, из-за отсутствия непроницаемой границы области фильтрации становится невозможным определение возможных мест скопления метана при расчете расходов метана в каждой точке исследуемой области. То есть все вы-

шеперечисленные подходы к решению задачи фильтрации свободного и сорбированного газа в трещиновато-пористой слоистой среде не позволяют находить размещение возможных техногенных коллекторов газа.

Сравним результаты численного моделирования фильтрации метана в зоне влияния очистной выработки при помощи метода конечных элементов без учета и с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива. Для этого получим распределения давлений метана, скоростей фильтрации и расходов метана в исследуемой области.

Для расчетов примем следующие начальные условия: слоистая изотропная среда (уголь, песчаник, аргиллит, алевролит), размер исследуемой области – 300 x 150 x 50 м, длина лавы – 200м; мощность пласта – 2 м; глубина H – 1200м. В результате получим поле распределения параметра $Q = \sigma_1 - \sigma_3 / \gamma h$, которое представлено на рис. 1.

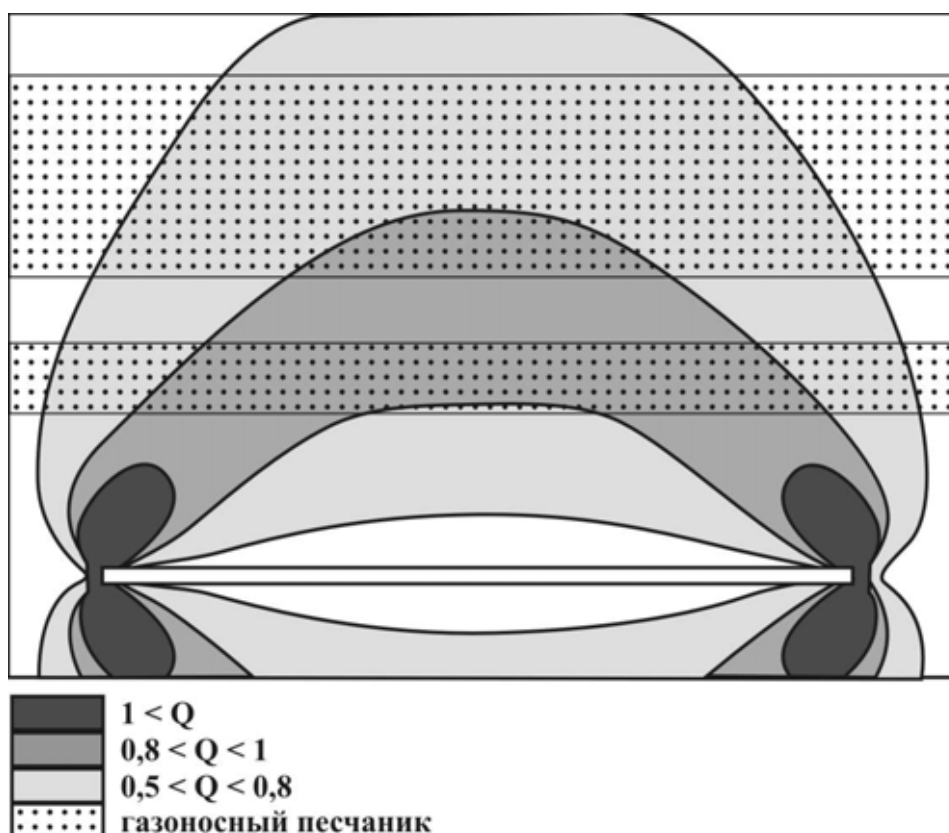
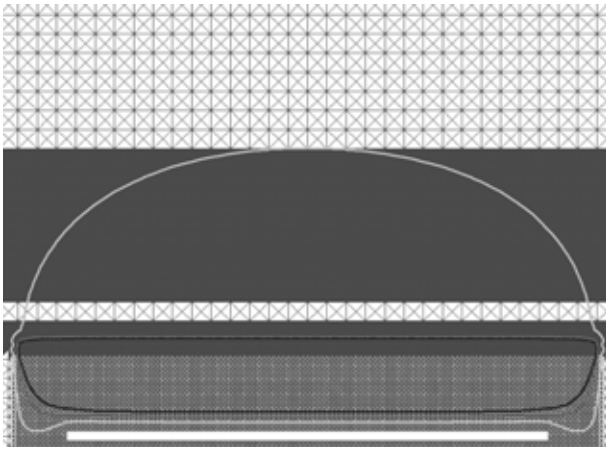
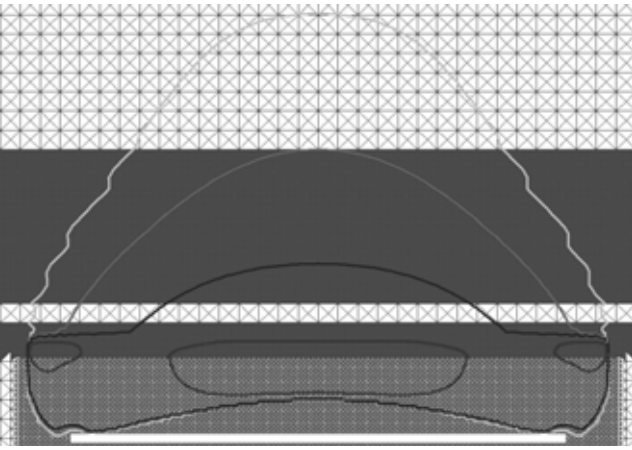
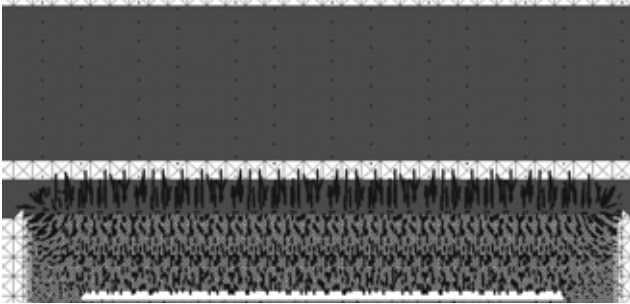
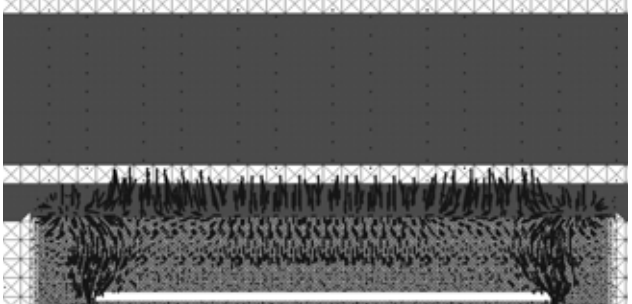
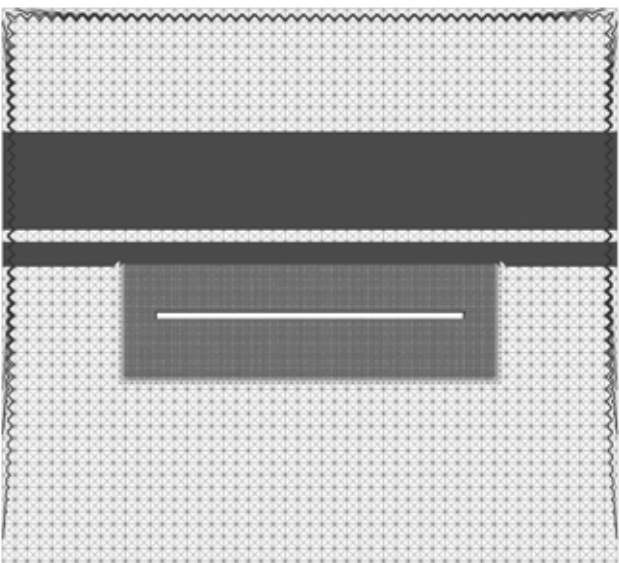
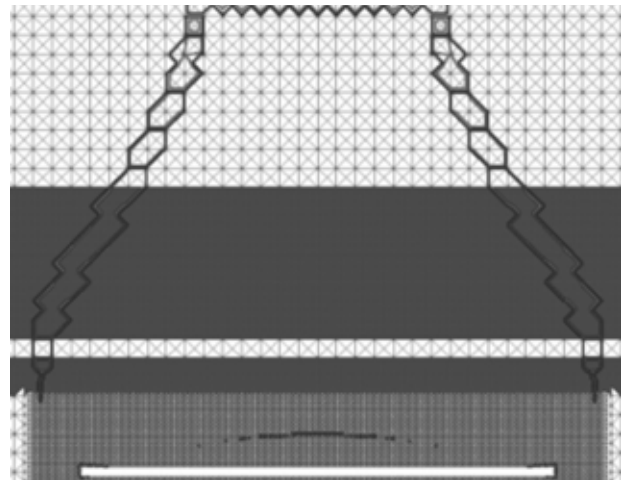


Рис. 1 – Распределение параметра Q .

В таблице 1 представлены результаты численного моделирования фильтрации метана в зоне влияния очистной выработки. При проведении расчетов было принято, что в кровле на расстоянии 17 и 30 м от разрабатываемого угольного пласта расположены два пласта песчаника мощностью 7 и 30 м соответственно, газоносностью $7\text{ м}^3/\text{т}$, проницаемостью $k_{\text{max}} = 0,2$ мДа (на рисунках в табл. 1 показаны сплошным серым цветом). В расчете с учетом напряженно-деформированного состояния считается, что область начала микрорастрескивания соответствует зоне, где $0,5 < Q < 0,8$, а область интенсивного трещинообразования – зоне $0,8 < Q < 1$.

Таблица 1 – Отличия в результатах расчета фильтрации метана без учета и с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива

Напряженно-деформированное состояние углепородного массива не учитывается	Напряженно-деформированное состояние углепородного массива учитывается при расчете области фильтрации и коэффициента проницаемости
<p style="text-align: center;">1.</p> 	<p style="text-align: center;">1а.</p> 
Распределение относительного давления $p=p/p_0$	
<p style="text-align: center;">2.</p> 	<p style="text-align: center;">2а.</p> 
Распределение поля скоростей фильтрации	
<p style="text-align: center;">3.</p> 	<p style="text-align: center;">3а.</p> 
Распределение расходов метана	

Как видим, распределения давления и скоростей фильтрации в первом и втором случаях сильно отличаются. Что же касается распределения расходов, то в расчете без учета напряжений метан расходится к границам исследуемой области, какой бы ее ни задали, а в расчете с учетом напряжений (рис. 3а) видны зоны скопления метана на границе области фильтрации.

Из рисунков 2а и 3а также видно, что метан из газоносных песчаников кровли с наибольшей скоростью будет выделяться по контуру свода обрушения в очистной забой. Кроме этого, постепенно, с малой скоростью, газ будет концентрироваться у границ области фильтрации, в кровле выработки, образуя там техногенные зоны скопления метана. Это подтверждает теорию о «быстром» и «медленном» газе, выдвинутую доктором геолого-минералогических наук Лукиновым В.В. [29]. В ней говорится, что наибольший приток газа в лаву будет осуществляться за счёт его быстрого выделения из разрушенных, разрыхленных и расчленённых на блоки пород. Верхняя же часть области фильтрации является зоной аккумуляции газа, и её формирование по времени происходит позже.

Из всего вышеизложенного следует, что задача о фильтрации метана в углепородном массиве, нарушенном проведением горных выработок, неотделима от решения задач горной геомеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулинич С.В., Перепелица В.Г., Шматовский Л.Д., Кулинич С.В. Теоретические и экспериментальные аспекты определения параметров геомеханического состояния газоносного углепородного массива. В сб.: Геотехническая механика, №48. – Днепропетровск, 2004. – с. 133-142.
2. Кулинич С.В. Оценка напряженного состояния газоносного породного массива. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 311-314.
3. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. – М. Наука, 1983. – 128 с.
4. Курлень М. В., Аксенов В. К., Леонтьев А. В., Устюгов М. Б. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах. – Новосибирск: Наука СО, 1975. – 150 с.
5. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №3. – с. 3-23.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М. Недра, 1985. – 272 с.
7. Кулинич В.С., Кулинич С.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на газоотдачу метаносных горных пород. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 152-156.
8. Куц О.А., Кирюков В.В. Перспективы освоения газо-угольных месторождений Донбасса. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 23-29.
9. Шевелев Г.А. Горная аэрогазодинамика – фундаментальная наука. – В сб.: Геотехническая механика, №48. – Днепропетровск, 2004. – с. 51-55.
10. Лукинов В.В., Гончаренко В.А., Бурчак А.В. О возможности оценки сорбции выбросоопасных углей Донбасса методом электронного парамагнитного резонанса. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 104-109.
11. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Курносов С.А., Иванчишин С.Я и др. Газовая проницаемость горных пород в разнокомпонентном поле сжимающих напряжений. В сб.: Геотехническая механика, № 42. – Днепропетровск, 2003. – с. 18-24.
12. Іванців О.Е., Явний П.М., Гальміз М.П. До пошуків пасток метану у вугленосних відкладах вугільних басейнів України. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 115-119.
13. А.А.Мясников, В.П.Садохин, Т.С.Жирнова. Применение ЭВМ для решения задач управления метано-выделением в шахтах М: Недра, 1977.- 248 с.
14. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М. Мир, 1980. – 612 с.
15. Wesseling P. Principles of Computational Fluid Dynamics. – Berlin. Springer, 2001. – 644 p.
16. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. – Berlin. Springer, 2002. – 424 p.
17. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.

18. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.
19. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. Мир, 1979. – 392 с.
20. Connor J.J., Brebbia C.A. Finite Element Techniques for Fluid Flow. – London-Boston. Newnes-Butterworths, 1977. – 264 p.
21. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. В.А. Постнов, С.А. Дмитриев, Б.К.Елтышев, А.А.Родионов. - Л.: Судостроение, 1979. - 287 с.
22. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М.: Высшая школа, 1990. - 400 с.
23. Шевелев Г.А. Метаноємкость песчаников, вмещающих угольные пласты. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 204-207.
24. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1999, №5. – с. 13-18.
25. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №6. – с. 47-55.
26. Садохин В.П., Жирнова Т.С., Кудряшова В.Д. Фильтрация метана в подготовительные выработки, проводимые по мощным угольным пластам. – В кн.: Борьба с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах. – Кемерово, 1973. – с. 5-23 (ВостНИИ).
27. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. – К. Наук. Думка, 1981. – 284 с.
28. Круковский А.П., Круковская В.В. Учет напряженно-деформированного состояния угленородного массива при расчете фильтрации газа в зоне влияния очистной выработки. – В сб.: Геотехническая механика, № 50.– Днепропетровск, 2004.
29. Лукинов В.В., Клец А.П., Ильюшенко В.Г. и др. Методика расчета извлекаемых запасов метана из подработанного и надработанного угленородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 37. – Днепропетровск, 2002. – с. 62-69.

УДК 622.234.5(088.8)

В.Г. Золотин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ СВЯЗИ ВОДЫ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМ УГЛЕМ³

На основі термографічного методу дослідження енергії зв'язку води з поверхню диспергованого вугілля підтверджено можливість створення навколо присвердловинної зони непроникливого для води та газу шару, що є причиною кольматації.

DEFINITION OF A POWER LEVEL OF CONNECTION OF WATER WITH DESTROYED COAL

On the basis of a thermal and graphic method of research of energy of connection of water with a surface destroyed coal the opportunity of formation of a zone around of a chink, impenetrable for water and gas is confirmed

В процессе гидродинамического воздействия на газонасыщенные угольные пласты происходит интенсивное разрушение угля, вследствие чего через его трещиновато-пористую структуру после некоторого числа рабочих циклов фильтруется не чистая вода, а суспензия, содержащая значительное количество угольных и породных частиц, что делает процесс гораздо более сложным, чем классическая фильтрация жидкости через пористое тело.

Движение суспензии через уголь прискважинной зоны приводит к посте-

³ - работа выполнена под научным руководством доктора технических наук, профессора Софийского К.К.