

7. Белошицкий М. В. Использование шахтного метана в качестве энергоносителя / М. В. Белошицкий, А. А. Троицкий // Турбины и дизели. – 2006. – № 6. – С. 2 – 9.

8. Бакхаус К. Опыт внедрения и эксплуатации мобильных ТЭС, работающих на шахтном метане / К. Бакхаус, В. А. Безпflug, Е. В. Мазаник // Глюкауф. – 2010. – № 1. – С. 76 – 79.

УДК 622.324.5

Чл. - корр. НАН Украины А. Д. Алексеев  
(ИФГП НАН Украины)

### **МЕТАН УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ. ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ.**

У роботі приділена увага формам знаходження метану у викапному вугіллі, прискоренню процесу видалення метану з вугілля. Представлено модель вугільної речовини, що розроблена в ІФГП НАНУ, на підставі якої досліджена внутрішня газодинаміка метану в макроскопічному вугільному масиві. Розгляд ведеться в рамках запропонованої моделі двох характерних часів десорбції, що враховує спільне протікання процесів дифузії й фільтрації. Запропоновано шляхи активізації виходу метану з вугільних пластів з урахуванням його фазового стану.

### **COALBED METHANE. EXISTENCE FORMS AND EXTRACTION PROBLEMS**

We have paid attention to the forms of methane in fossil coals and to the acceleration of methane extraction from the coal. The model of the coal substance was developed in IFGP NASU. The internal gas dynamics of methane in coal macroscopic array was investigated based upon this model. The examination was made based on our “two-time” model taking into account joint processes of diffusion and filtration. The ways to enhance the output of methane from coal seam were proposed taking into account its phase state.

Необходимость создания технологии утилизации метана определяется экологическими проблемами, поскольку потеря этого газа в атмосферу приводит к усугублению глобального потепления климата на планете Земля. Согласно известному Киотскому соглашению индустриально развитые страны обязаны сокращать производство, при котором в земную атмосферу выбрасываются химические составляющие, способствующие созданию парникового эффекта.

Сорбционные свойства углей, газоносность угольных пластов определяется, прежде всего, свободным пространством, которое содержится в угольном веществе. Объем пор и трещин, их распределение по размерам при изменяющихся условиях углефикации определяют изменение общего содержания газа в угле. Метан и двуокись углерода – наиболее распространенные составляющие газовой компоненты флюидов, заполняющих поры и трещины. Наибольшую опасность при добыче угля создает метан, который при внезапных выбросах вспышках и взрывах, к огромному сожалению, приводит к смертельным случаям.

Следует выделить следующие формы состояний метана по степени связи его с угольным веществом: 1) свободный метан, содержащийся в объеме трещин и пор; 2) метан, адсорбированный на стенках порового пространства, количество которого определяется удельной поверхностью стенок порового пространства и активными центрами сорбции молекул этого адсорбата; 3) метан, молекулы которого встроены в сложную структуру угля, по типу твердого раствора, и заполняют

пустоты, объем которых сравним с объемом самой молекулы метана. В последнем случае молекула испытывает силовое поле молекул твердотельной составляющей угля. Сорбционная емкость угля определяется трещиновато – пористой структурой угля и сложным комплексом физико-химических взаимодействий в системе «уголь – газ – жидкость».

Наиболее удачно объясняет формы нахождения метана в угле теория закрытых пор [1]. Поровая емкость характеризуется размером, формой и числом пор. Пory углей, как и прочих твердых веществ, подразделяются на открытые – полости или каналы, связанные с внешней поверхностью твердого тела и закрытые – полости и каналы, не связанные с внешней поверхностью. Такое деление становится правомерным после сравнения коэффициента диффузии газа в самых узких фильтрационных каналах с коэффициентом твердотельной диффузии; разница между ними составляет 4-5 порядков. Таким образом, открытые поры соединяются системой трещин с внешней поверхностью, что позволяет газам и жидкостям быстро проникать в угольное вещество и так же быстро покидать его. Проникновение флюидов в закрытую пористость, несвязанную с внешней поверхностью, может осуществляться исключительно путем твердотельной диффузии, что обуславливает существенную продолжительность процесса. Такой подход позволил объяснить значения пористости до  $0,3 \text{ см}^3/\text{г}$  получаемые сорбцией газов под давлением, в то время как практически все остальные методы дают значения пористости до  $0,1 \text{ см}^3/\text{г}$ . Закрытые поры играют роль аккумуляторов и долговременных хранилищ газа. Согласно полученным результатам, закрытые поры составляют свыше 60 % порового объема.

Таким образом, структуру угля на макро- и мезоуровнях можно представить себе в виде твердотельного каркаса, контактирующего с фильтрационным объемом. Многочисленные экспериментальные данные [2] и теоретические представления приводят к однозначному выводу о том, что метан проникает из фильтрационного объема в твердотельный каркас. Внутри каркаса молекулы метана встраиваются в наиболее энергетически выгодные места. К таковым относятся, прежде всего «бахрома» угольных кристаллитов, то есть алифатика угля. Встраивание молекул метана в угольный каркас обычно происходит путем их внедрения в поры различных размеров. Если речь идет о микропорах размером порядка 10 нм, то вполне естественно говорить о твердом растворе метана в угле. Метан, внедренный в поры размером 10 нм и более, подразделяется на свободный и адсорбированный. Для пор промежуточных размеров вопрос о состоянии метана в них является дискуссионным и здесь не рассматривается. Результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют, что выделения метана из добытого угля могут продолжаться довольно продолжительное время и являются одной из причин образования взрывоопасной среды при хранении и транспортировке угля. [3, 4]. Фактически это выделение происходит через твердотельный каркас угольного вещества по каналам, сравнимым с диаметром молекулы флюида, в то время как сами закрытые поры могут иметь достаточно большие размеры и содержать большое количество газа. Подобное модельное представление позволяет достаточно хорошо объяснить высокую метаноемкость угля и массоперенос флюидов в пористых средах.

Основными характеристиками твердого раствора метана в угле являются энергия связи молекул метана с углем и количество «посадочных мест» для метана в расчете на единицу объема твердотельного материала (обратная величина – объем, приходящийся на одну молекулу метана в твердом растворе). В крупных закрытых, то есть не сообщающихся с фильтрационным объемом, порах метан находится в основном в виде свободного газа. Для метана, адсорбированного на поверхности как открытых, так и закрытых пор, определяющими характеристиками являются энергия связи молекулы метана с поверхностью угля и площадь, приходящаяся на одну молекулу адсорбированного метана. Энергии связи, являются, конечно, усредненными величинами ввиду сложности иерархической структуры угля. Актуальные теоретические представления и расчеты наводят на мысль, что связь метана с углем – это сочетание Ван-дер-Ваальсовой, то есть наведенной диполь-дипольной, собственно дипольной и водородной связей. Калориметрические измерения качественно подтверждают эту мысль, давая для энергии связи значения 8-35 кДж/моль в зависимости, прежде всего, от марки угля.

Уголь состоит из блоков, «погруженных» в систему открытых пор, трещин и каналов. Такая система называется фильтрационным объемом. Метан в этом объеме находится в свободном газообразном состоянии. Внутри блока располагаются закрытые поры. В этих порах метан также находится в газообразном состоянии. В тело блока метан входит помолекулярно, образуя твердый раствор. При нарушении равновесия пласта создаются условия для массопереноса метана. Истечение метана происходит следующим образом. Сначала газ из фильтрационного объема устремляется из блока в не занятый углем объем, и давление газа внутри блока снижается, благодаря чему стартует процесс диффузионного массопереноса сорбированного метана из блока в фильтрационный объем. Происходит фильтрация газа с одновременной подпиткой фильтрационного объема метаном, растворенным в блоках.

Массоперенос метана внутри блока осуществляется путем твердотельной диффузии, т.е. путем перескоков молекул метана из одних «посадочных мест» в другие, соседние. Разумеется, в действительности картина массопереноса значительно сложнее, чем в идеальном кристаллическом твердом растворе в следствие сложности строения угля не только на мезоуровне, но и на микроуровне. Говоря о твердотельной диффузии, мы опираемся на установленную на эксперименте сильную, экспоненциальную зависимость соответствующего коэффициента диффузии от температуры, что характерно именно для твердотельной диффузии, а не для просачивания через узкие каналы. При рассмотрении внутриблочной диффузии важно принять во внимание наличие закрытых пор, распределенных по блоку. Для того чтобы молекуле метана выйти за пределы блока, ей необходимо вначале выйти из закрытой поры в твердый раствор и затем продиффундировать по твердому телу к границе блока. Газ в закрытых порах служит источником, увеличивающим его концентрацию в твердом растворе.

Предварительное извлечение метана (до начала выемки угля) с целью его утилизации и безопасности проведения горных работ только частично решает вопросы безопасности, так как лишь 30 % метана, так называемый «быстрый» метан, - метан из фильтрационных каналов, удается извлечь таким образом. Основное же

количество метана, до 70 %, остается в угольном пласте и «выходит» из него очень медленно, за счет твердотельной диффузии. Существует несколько путей управления выходом метана из угля, связанных с различным воздействием на угольное вещество:

- изменением температуры пласта – понижение или повышение;
- воздействием на пласт различных полей: электромагнитных и механических полей напряжений;
- путем нагнетания в пласт поверхностно-активных веществ.

Рассмотрим каждый из видов воздействия подробнее. Понижение температуры ведет к сильному росту растворимости, что можно использовать на практике, например, для борьбы с выбросами угля и газа. В связи с тем, что в выбросах принимает участие свободный и адсорбированный метан, то охлаждая угольный массив, мы уменьшаем количество метана в упомянутых состояниях за счет перехода его в абсорбированное, т.е. растворяя его в угле. Повышение температуры увеличивает экспоненциально коэффициент твердотельной диффузии, тем самым ускоряя диффузионный выход метана из закрытых пор.

Одним из способов воздействия на угольный пласт для ускорения эмиссии метана может служить электромагнитное воздействие в радиочастотном диапазоне. Эксперименты по воздействию достаточно сильного электромагнитного излучения на уголь с амплитудой электрической составляющей  $E > 10^4$  V/m в интервале 1-7 МГц показали, что происходит образование трещин, облегчающее фильтрацию газа из угля [5].

Нам удалось воздействием высокочастотных резонансных электромагнитных колебаний ускорить процесс десорбции метана без изменения структуры среды [6]. Генерация импульсов приводит к пульсациям давления в среде (обратный сейсмо-электромагнитный эффект). Для того чтобы инициировать выход метана из «твердого раствора», необходима энергия на уровне 45 КДж/моль. Идея метода основана на физических представлениях о том, что диффузия молекул метана в угольном веществе определяется градиентом химпотенциала, а при наличии электромагнитного поля в среде возникают поляризационные эффекты, приводящие к дополнительному потоку молекул метана. Как показали лабораторные эксперименты, скорость десорбции после электромагнитного воздействия увеличилась до 2,5 раз.

Воздействие механических полей напряжений ускоряет процесс выхода метана из угля за счет превращения пор в трещины с дальнейшим их прорастанием под действием волны разгрузки. Установлено, что с повышением степени газонасыщенности угольного массива при его разгрузке происходит изменение в напряженном и деформационном состояниях, характеризующихся обобщенным растяжением со сдвигом, а поскольку разрушение сдвигом не превалирующее, то резко возрастает вероятность разрушения части угольного массива отрывом. Структурные повреждения и разрушения, как правило, интенсифицируют десорбцию метана, повышая его давление на стенки развивающихся трещин, и способствуют измельчению угля при разрушении.

Полученные нами результаты свидетельствуют, что скорость разгрузки угольного пласта [7] существенно влияет на глубину распространения волны разгрузки.

При этом резко интенсифицируется процесс, связанный с раскрытием изолированных пор, соединением их с трещинами и сменой механизма десорбции метана от диффузии к фильтрации. Принципиальное значение имеет оценка степени изменения трещиновато-пористой структуры углей в зависимости от скорости разгрузки, которое можно оценить на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия, в условиях, моделирующих состояние призабойной зоны пласта на современных глубинах разработки [8].

В ИФГП НАН Украины разработаны и давно применяются на шахтах мероприятия, основанные на введении в угольный массив водных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9]. Т.к. сила связи водных растворов ПАВ с углем сильнее, чем у метана, последний будет вытесняться по транспортным каналам и порам. Применение этого процесса совместно с традиционной дегазацией ускоряет извлечение свободного и адсорбированного метана. Можно подобрать такие поверхностно-активные среды, ввод которых в массив на основании эффекта Ребиндера заставит развиваться трещины за счет сил горного давления. Так как трещины в нетронутом выработками угольном пласте расположены хаотически и нет преобладающего опорного давления, развитие их будет равновероятным во всех направлениях.

Динамика газовыделения определяется в первую очередь фазовыми состояниями метана в угольном пласте. Естественным образом возникает вопрос о соотношениях между количествами метана в этих трех фазовых состояниях. Для решения этого вопроса необходимо рассмотреть равновесие между газообразным и сорбированным метаном. В статистической физике и термодинамике доказывается, что в рассматриваемой системе в равновесии должны быть однородны температура и химический потенциал. В нашем случае это означает, что химпотенциал свободного газа совпадает с химпотенциалом твердого раствора. Сразу же обратим внимание на то, что растворимость чрезвычайно сильно зависит от температуры, причем таким образом, что с уменьшением температуры, как уже говорилось, она возрастает.

Из проведенных оценок следует, что при комнатной температуре наибольшее количество метана, порядка 60-70 %, находится в закрытых порах, а остальной метан распределен между открытыми порами (фильтрационным объемом) и твердым раствором в сопоставимых количествах. При комнатных температурах растворимость, как показывают расчеты, меняется в пределах  $10^{-3}$ - $10^{-1}$ , в то время как адсорбция на поверхности на два-три порядка меньше, из-за ограниченности числа посадочных мест на поверхности даже при большой поверхностной концентрации метана. С понижением температуры метан во все возрастающем количестве входит в твердый раствор, так что при температурах порядка 0 °С вполне заметная часть метана, порядка десятка процентов, может перейти в твердый раствор.

Содержание метана в пласте возрастает с глубиной в связи с ростом пластового давления и некоторым ростом энергии связи, а значит, и растворимости. Основной проблемой полного извлечения метана из угля является разработка промышленных способов ускорения процесса твердотельной диффузии метана в угле. Только таким путем можно ускорить извлечение 70 % метана, находящегося в изолированных угольных блоках.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закрытые поры ископаемых углей / А. Д. Алексеев, В. В. Синолицкий, Т. А. Василенко [и др.] // ФТПРПИ, 1992. – № 2. – С. 99 – 106.
2. Van Krevelen D. W. Coal-typology, chemistry, physics, constitution. (Third completely revised ed.) / D. W. Van Krevelen // Amsterdam: Elsevier, 1993. – 1000 p.
3. Alexeev A. D. Alternation of methane pressure in closed pores of fossil coals / A. D. Alexeev, E. P. Feldman, T. A. Vasilenko // Fuel. – 2000. – Vol. 79, N.8. – P. 939 – 943.
4. Alexeev A. D. Closed porosity in fossil coals / A. D. Alexeev, T. A. Vasilenko, E. V. Ulyanova // Fuel. – 1999. – V. 78, N. 6. – P. 635 – 638.
5. Mingju Liu. Electromagnetic response of outburst-prone coal / Liu Mingju, He Xueqiu // International Journal of Coal Geology. – 2001. – V. 45. – P. 155 – 162.
6. Электромагнитное воздействие на угольный пласт для активации процесса дегазации / А. Д. Алексеев, А. К. Кириллов, А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов // Физико-технические проблемы горного производства, 2006. – № 9. – ИФГП, Донецк. – С. 5 – 19.
7. Алексеев А. Д. Численное моделирование выхода метана из угля с учетом волны разгрузки и раскрытие пористости при изменении напряжений / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, А. Э. Филиппов // В сб. Проблеми гірничого тиску. – Вып. 9. – Донецк : ДонГУ. – 2003. – С. 120 – 151.
8. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / А. Д. Алексеев. – К. : Наукова думка, 2010. – 425 с.
9. Обработка выбросоопасных пластов водным раствором ПАВ / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, М. Г. Малюга, О. С. Аносов. – К. : Техника, 1988. – 84 с.

**УДК 552.122:552.574:514.8**

Д-р геол.-минерал. наук В. В. Лукинов,  
м.н.с. В. И. Барановский,  
д-р геол. наук Л. И. Пимоненко  
(ИГТМ НАН Украины),  
главный геолог Л. Д. Кузнецова  
(«Укруглегеология»)

### **ФРАКТАЛЬНОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ**

Розглянуте вугілля різних пластів (марки Ж), яке було відібране з непорушених ділянок різних пластів шахт Донбасу. По чисельних характеристиках дисперсного складу і форми мікрочасток в діапазоні від 0-1000 мкм. проведений розрахунок фрактальної розмірності мікроструктури вугілля. Запропонована фрактальна модель мікроструктури вугілля.

### **FRACTALITY OF COAL MICROSTRUCTURE**

Coal, selected from unstrained zones of varied seams (Fat 60 als) from Donbas mines, were examined. According to the computational characteristics of the dispersed composition and shapes of microparticles over the range 0 – 1000 m analyse of Fraktal dimension of the coal microstructure was done. Fraktal model of coal microstructure was offered.

Теория фракталов и ее приложения широко используются в геологии. Практическое значение теории, заключается в том, что полученные результаты позволяют строить модели и формировать гипотезы о возможных механизмах генезиса изучаемых объектов. Согласно существующей на сегодня классификации [1], фрактальные объекты разделяются на два основных типа: детерминистические и стохастические. К детерминистическим фрактальным объектам относятся те, которые точно конструируются на основе некоторых базовых законов. Для них характерны неограниченные интервалы самоподобия и возможность точного расчета фрактальной размерности. Стохастические фракталы порождаются в результа-