

УДК 622.029

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ И ЕГО ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ К ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ



В. А. БОБИН,
заведующий отделом,
д-р техн. наук



О. Н. МАЛИННИКОВА,
заведующая лабораторией,
д-р техн. наук



В. Н. ОДИНЦЕВ,
ведущий научный сотрудник,
д-р техн. наук,
odin-vn@yandex.ru



В. А. ТРОФИМОВ,
ведущий научный сотрудник,
д-р техн. наук

*Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия*

Введение

Природная горно-геологическая система «угольный пласт – метан» много лет является предметом фундаментальных и прикладных исследований. В ИПКОН РАН ведутся систематические исследования различных аспектов состояния метана в угольном пласте, условий его выхода из угля и участия метана в газодинамическом разрушении угля, что важно для понимания механизма таких опасных газопроявлений, как внезапные выбросы угля и газа [1–4].

В газонасыщенном угольном пласте метан находится преимущественно в связанном состоянии (до 90 %) в виде сорбированного и растворенного в твердом веществе газа. Один из принципиальных вопросов взаимодействия метана и угля, по которым среди специалистов существуют различные взгляды [4–15], – степень возможного участия в газодинамическом разрушении угля связанного метана. Считается, что вследствие относительно большого времени перехода его в свободное состояние (десорбции и диффузии через вещество угля до фильтрационного канала [16]) он не может участвовать в динамическом разрушении угольного пласта при выбросах угля и газа.

В экспериментальных и теоретических исследованиях установлено, что микроструктура угля в масштабе нескольких микрон определяет возможность участия связанного метана в динамическом разрушении угля. В отличие от действия свободного метана, изначально находящегося в угольном пласте, разрушение угля за счет связанного метана неизбежно должно перейти на более крупные масштабные уровни. Детали состояния связанного метана в угле (сорбированный или растворенный метан) не имеют большого значения для газодинамического разрушения угля. Проведенные исследования подтверждают вывод о том, что анализ структуры нарушенности угля на микроуровне может быть эффективным методом прогноза выбросов угля и газа в угольных пластах.

Ключевые слова: микроструктура угля, связанный метан, угольный пласт, разрушение угля, фрактальный анализ, трещина, газовыделение.

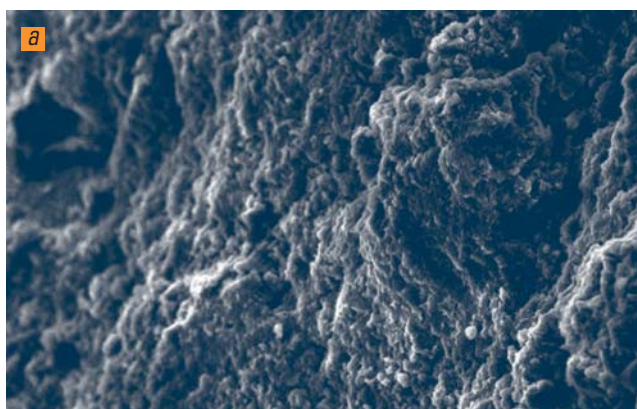
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.04

В исследованиях авторов данной статьи развивается концепция определяющей роли микроструктуры угля в механизме быстрого перехода части метана из связанного состояния в свободное и участия свободного метана в газодинамическом разрушении, начиная с микромасштабного уровня. В этой концепции два определяющих момента – переход молекул метана из связанного состояния в свободное и способность свободного метана разрушать уголь в микротрещинах. Ниже рассмотрены оба эти момента.

Методика и результаты исследования

В аналитических и экспериментальных исследованиях установлено [2], что микросорбционное пространство угольного вещества можно представить в виде множества сорбционных частиц размером менее 1 мкм, включающих порядка 10^8 нанопор на 1 г угля. Доминирующим физическим процессом выделения сорбированного метана из сорбционной частицы является диффузия. Группы сорбционных частиц образуют суперсорбционные частицы размером несколько микрон. Эти частицы окружены порами и каналами и формируют реальную микроструктуру угольного вещества с фильтрационным механизмом миграции молекул метана.

Изначально понятие суперсорбционных частиц возникло в рамках физико-химических представлений об угле. Позже оно нашло подтверждение в проведенных исследованиях структуры нарушенности угля с помощью электронного микроскопа [17]. Многомасштабные цифровые изображения поверхности образцов



угля в диапазоне от 0,1 мкм до 1 мм были получены начиная с 2009 г. с помощью растрового электронного микроскопа JSM 5910-LV с разрешающей способностью около 100 нм. Многочастотные изображения были необходимы, с одной стороны, для выбора наиболее представительных фрагментов неоднородного угля, с другой – для применения фрактальных методов в количественных оценках природной нарушенности углей.

Рассматривались угли из выбросоопасных (пласт i_3 в Донбассе и пласт XXVII в Кузбассе) и невыбросоопасных пластов (пласты g_2 , m_3 и k_2 в Донбассе). На **рис. 1** показаны типичное изображение поверхности выбросоопасного угля с увеличением в 370 раз (*a*) и характерная частица с размером порядка 0,1 мкм (*б*). Видимая на **рис. 1, a** нарушенность угля, включающая отдельные микротрещины и границы структурных фрагментов, обусловлена природными факторами. Она косвенно отражает возможную степень дробления угля и размеры характерных десорбирующих фрагментов угольного вещества. Частица на **рис. 1, б** не содержит видимых микротрещин, пор и других каналов для миграции метана. Эту частицу можно охарактеризовать как суперсорбционную.

Следует отметить, что частицы угля на **рис. 1, a** достаточно прочно сцеплены между собой, кусочки угля не рассыпаются при механическом воздействии. На рисунке видно также, что частицы угля имеют вид вытянутых эллипсоидов, поперечный размер которых примерно в 5–10 раз меньше максимального продольного размера. Интересно, что такую же структуру имеет выбросоопасный уголь из зоны тектонического нарушения на шахте Pingdingshan (Китай) [7].

Изображение на **рис. 1, a** отражает неоднородность угля в рассматриваемом масштабе, которую можно интерпретировать как нарушенность угля на этом иерархическом (масштабном) уровне. Сравнивая неоднородности изображений угля на различных масштабных уровнях, можно, во-первых, узнать присутствует ли самоподобие (фрактальность) в нарушенности угля, и, во-вторых, дать количественную оценку этого самоподобия.

Фрактальный анализ изображений угля на различных масштабных уровнях выполнялся известным методом box-counting [18]. С использованием этого метода рассматривались изображения поверхности угля в масштабе 500, 200, 100, 20, 10, 5, 1 мкм. Это дало возможность установить диапазон проявления

Рис. 1. Структура выбросоопасного угля:

a, б – в масштабе 50 и 0,2 мкм соответственно

фрактальных свойств неоднородности (нарушенности) углей и определить их фрактальную размерность.

Из проведенного анализа изображений следует, что диапазон проявления фрактальных свойств выбросоопасных углей из пластов XXVII и i_3 составляет 1–100 мкм, в то время как для невыбросоопасных углей этот диапазон 10–500 мкм. Фрактальные размерности D структуры природной нарушенности (дезинтеграции) углей (в случае плоских изображений) составляют: для угля из пласта g_2 – $1,33 \pm 0,18$, пласта m_3 – $1,37 \pm 0,24$, пласта k_2 – $1,45 \pm 0,19$, пласта XXVII – $1,82 \pm 0,06$, пласта i_3 – $1,71 \pm 0,19$. Таким образом, для фрактальной размерности микронарушенности углей, предрасположенных к газодинамическим явлениям, справедливо соотношение $D > 1,5$. Это соотношение может быть критерием в предварительном прогнозе выбросоопасности углей по структурному фактору.

В компьютерном анализе цифровых изображений поверхности углей были использованы современные методы анализа мультифрактальных, линейных и кольцевых структур [19, 20], которые позволяют учесть особенности качественного различия объектов на изображениях. Цель мультифрактального анализа состоит в детальном анализе неоднородности изображения и построении скейлинг-спектра (спектра сингулярностей) неоднородности. На основании этого анализа было установлено, что спектры неоднородности образцов выбросоопасных углей гораздо шире спектров, характеризующих невыбросоопасные угли. Поэтому ширина скейлинг-спектра может также служить показателем предрасположенности углей к газодинамическим явлениям. Угли могут быть отнесены к неопасным по газодинамическим явлениям, если ширина спектра $\Delta < 1,5$, и к опасным, если $\Delta > 1,5$. По результатам проведенных исследований можно заключить, что по фрактальным свойствам микроструктуры угля можно судить о возможности опасных газодинамических явлений при отработке угольных пластов.

Результаты структурных исследований размеров и формы частиц угля использованы в оценках скорости выхода метана из угольного вещества. При этом считалось, что такого рода процесс обусловлен диффузионным массопереносом метана в пределах

частиц. Сначала решалась задача теории диффузии для шаровой частицы с использованием изотермы сорбции Ленгмюра, описывающей соотношение между количеством связанного метана в частице и давлением свободного метана в окружающем поровом пространстве в равновесном состоянии при постоянной температуре [21].

Выражение для доли газа $\delta^B(t)$, выделившейся за время t из частицы угля при нарушении исходного равновесного сорбционного состояния, имеет вид

$$\delta^B(t) = \frac{Q^0 - Q(t)}{Q^0 - Q^k} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{R^2} n^2 t\right),$$

$$\tau = \frac{\pi^2 D}{R^2} t, \quad (1)$$

где Q^0 – природная сорбционная насыщенность угольного вещества, Q^k – количество абсорбированного газа в единичном объеме угольного вещества, соответствующее установившемуся давлению свободного метана в трещинно-поровом пространстве, D – коэффициент диффузии, R – радиус частицы, τ – безразмерный временной параметр, включающий геометрические и диффузионные свойства частиц. Выход газа в конечном итоге зависит только от величины $\tau = D/R^2$.

Выражение (1) позволяет оценить [22], за какое время из угля выйдет заданное количество газа, имея в виду последнюю стадию, когда процесс десорбции практически завершается (т. е. при выполнении условия $\tau > 1$). При этом доля вышедшего газа Δ_r должна составлять 0,9–0,99 от количества газа в угле до начала десорбции. Например, при $\Delta_r = 0,9$ (т. е. когда выйдет 90 % газа) имеет место соотношение

$$t_{90} = \frac{R^2}{\pi^2 D} \tau_r = 0,182 \frac{R^2}{D}. \quad (2)$$

Это универсальное соотношение в рамках диффузионной модели, справедливое для любых углей, различающихся величиной кинетического параметра D/R^2 . Кроме того, время дегазации до уровня, заданного величиной Δ_r , не связано с природной газонасыщенностью. Имеется в виду дегазация, обусловленная только десорбцией и не осложненная фильтрационными процессами, т. е. дегазация раздробленного или сильно нарушенного угля с развитой системой каналов фильтрационного пространства.

Оценка показывает, что при $D = 10^{-11}$ см²/с для шарообразной частицы радиуса 1 мкм время выхода 90 % метана составляет $t_{90} \sim 180$ с. Таким образом, если суперсорбционные частицы имеют примерно шарообразную форму с радиусом порядка микрона, то время выхода метана соответствует минутам. В этом случае связанный метан не может активно участвовать в быстротечном процессе динамического разрушения угля и разрушение идет с участием свободного метана, изначально находившегося в угле.

Однако частицы выбросоопасного (перемятого) угля имеют вид уплощенных фрагментов. Поэтому в оценках времени диффузии молекул из структурных фрагментов, изображенных на

рис. 1, б, в качестве характерного геометрического параметра частиц целесообразнее использовать другое значение условного радиуса частицы, равное по порядку поперечному размеру частицы угля. В этом случае время для выхода 90 % молекул связанного метана из микрочастиц с характерным размером 0,1 мкм в наведенное трещинно-поровое пространство составляет $t_{90} \sim 1,8$ с, т. е. время выхода большей части метана соответствует первым секундам, что коррелирует с продолжительностью выброса угля и газа и объясняет бурное и масштабное разрушение угля при выбросах.

Таким образом, для адекватной оценки времени выхода связанного метана из микроструктурных фрагментов угля следует учитывать не только распределение частиц по размеру, определяемое при просеивании частиц, но и реальную форму частиц, определяемую по фотоснимкам микроструктуры угля. Различие во времени выхода связанного метана предопределяет особенности газодинамических явлений при отработке выбросоопасных участков угольного пласта.

Вторым определяющим фактором в природе газодинамических явлений является процесс трещинообразования в угле [23, 24]. С целью исследования особенностей трещинообразования на микроструктурном уровне проведены расчеты напряженно-деформированного состояния среды с микроструктурой, для которой характерно контактное взаимодействие фрагментов, как это следует из рис. 1, а.

Конфигурация неоднородностей в расчетной схеме соответствовала одному из снимков поверхности перемятого угля в масштабе нескольких микрон. Для оценки распределений напряжений использовался метод конечных элементов. Цель модельных расчетов состояла в выявлении возможности образования областей растяжения в структурных фрагментах и заполняющем материале, т. е. в выявлении областей возможного микротрещинообразования при перераспределении напряжений в сжатом материале с контактным взаимодействием структурных фрагментов. В расчетах модуль упругости структурных фрагментов на порядок превышал модуль материала, заполняющего пространство между фрагментами. Рассматривались различные соотношения для компонент внешней нагрузки σ_1^0, σ_2^0 .

Из расчетов следует, что состояние растяжения среды по некоторому определенному направлению может реализоваться даже при сжимающей боковой нагрузке σ_2^0 в широком диапазоне ее изменения. На рис. 2 показаны изолинии главного напряжения σ_2 при различном соотношении компонент внешней нагрузки. Области, в которых главное напряжение σ_2 является растягивающим, показаны белым цветом. Из представленных данных становится ясным, что размеры локальных областей одностороннего растяжения в материале, состоящем из контактирующих частиц, зависят от величины сжимающих напряжений σ_2^0 , возрастая с их уменьшением. В этих областях растяжения могут зарождаться микротрещины отрыва.

Для оценки возможности развития микротрещины размера микроструктурных фрагментов использована модель классической теории трещин Гриффитса – Ирвина. Например, для диско-

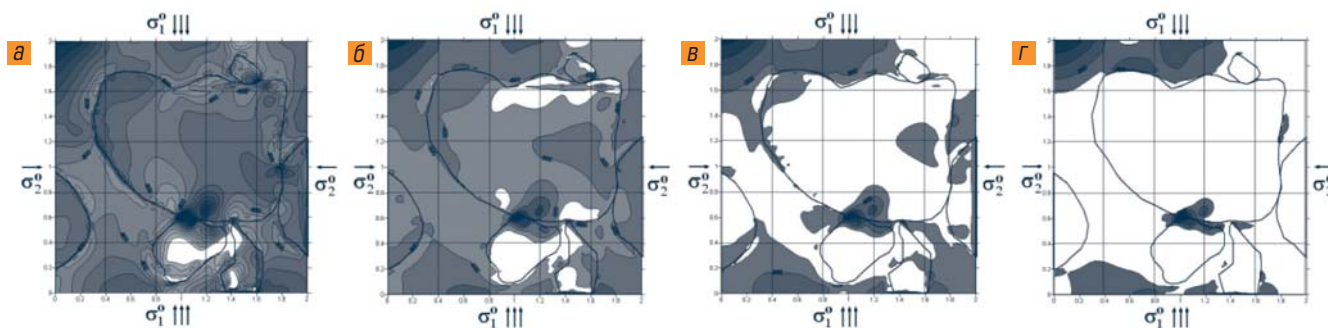


Рис. 2. Изолинии главного напряжения σ_2 при различном соотношении главных компонент нагрузки σ_2^0/σ_1^0 :
 а – 1; б – 0,67; в – 0,33; г – 0

образной трещины начало развития трещины радиуса a определяется соотношением $K_{1c} = 2\sigma_n(a/\pi)^{1/2}$, где K_{1c} – трещиностойкость материала; σ_n – нормальное напряжение растяжения. Точная количественная оценка величин, входящих в это соотношение, не имеет решающего значения, поскольку данная модель, как и многие другие математические модели, построена с упрощениями и допущениями, поэтому достаточно определить порядок входящих в соотношения величин.

В работе [25] отмечается, что значения трещиностойкости углей сильно различаются. Если исходить из результатов, приведенных в этой работе, то в оценках следует рассмотреть следующий диапазон значений трещиностойкости: $K_{1c} = (0,006-0,44)$ МПа·м^{1/2}; при этом нужно учесть вывод работы [26] о том, что в природном газонасыщенном угле эффективная трещиностойкость примерно в полтора-два раза ниже трещиностойкости полностью дегазированного образца угля. Таким образом, чтобы микротрещина могла начать расти, как показывает оценка, величина растягивающих напряжений для различных углей должна составлять по порядку величины от 1 до 150 МПа.

В условиях внешнего сжатия пласта даже растягивающие напряжения величиной 1 МПа, как следует из рис. 2, могут сформироваться лишь локально, на границах структурных фрагментов и в самих отдельных фрагментах. Таким образом, рост микротрещин за счет механического фактора – растягивающих напряжений возможен только для углей с предельно низкой трещиностойкостью, причем в локальных областях за счет влияния неоднородности среды. В общем случае развитие микротрещин за счет только механического фактора невозможно.

Однако микротрещина может развиваться, если в нее будет выходить сорбированный метан и в свободном состоянии поддерживать развитие микротрещины. Для оценки возможности такого развития разработана модель, в которой считается, что весь свободный метан в микротрещине до ее образования находился в абсорбированном и растворенном состоянии. При этом учитывается, что за короткий промежуток времени, определяемый скоростью роста микротрещины, этот метан может выйти в пространство трещины только из тонкого поверхностного микрослоя по берегам трещины.

Состояние берегов микротрещины благоприятно для выхода молекул метана. Как показано в ряде работ, вблизи кончика тре-

щины происходят необратимые изменения, например, в композитном материале с метастабильным наполнителем вблизи развивающейся трещины происходят фазовые изменения наполнителя. Известно также явление выброса наночастиц (фрактоэмиссия) в развивающуюся трещину [27]. Вследствие продвижения кончика трещины изменениям подвержены все берега трещины.

Максимальное значение толщины измененного микрослоя на берегах трещины можно грубо оценить по размеру наведенной локальной пластической зоны (зоны необратимых изменений) вблизи кончика трещины. Из теории трещин следует, что характерный размер пластической зоны можно оценить с помощью соотношения $0,05K_1c^2/\sigma_T^2$, где σ_T – предел текучести материала. При этом толщину микрослоя h , из которого в трещину могут выйти молекулы связанного метана, можно принять на порядок меньше ширины зоны необратимых изменений (пластической зоны).

«Мгновенный» выход молекул связанного метана в трещину целесообразно описать простой линейной зависимостью $(d_0 - d)/d_0 = \alpha(p_0 - p)/p_0$, которая соответствует закону Генри для выхода растворенного газа из жидкости. Здесь p_0 – давление насыщения связанного метана, которое в нетронутом пласте соответствует состоянию фазового равновесия свободного метана в макропорах и напряжения в угле; p – текущее давление свободного метана в микротрещине; d_0 – содержание растворенного метана (число граммов в единице объема нетронутого угля, в котором давление насыщения равно p_0); d – содержание растворенного метана в угольном веществе при давлении p ; α – коэффициент пропорциональности (постоянная модели, зависящая от температуры и микроструктуры), который показывает, какая часть растворенного метана останется в угольном веществе, если давление насыщения упадет до нуля.

Другие соотношения модели включают уравнение состояния свободного газа в трещине, связывающее объем трещины, давление, температуру и количество газа. Энергетическим условием развития трещины является достижение значений коэффициента интенсивности напряжений в кончике трещины K_1 (находится из решения соответствующей задачи теории упругости для трещины) величины трещиностойкости материала K_{1c} ; в частности, для дискообразной трещины $K_1 = 2(p + \sigma_n)(a/\pi)^{1/2}$, где σ_n – напряжение, действующее нормально плоскости микротрещины. Энергетическое условие развития трещины означает, что для продви-

жения конца трещины должна затрачиваться определенная энергия, которая зависит от трещиностойкости. Кроме того, в модель входят параметры и константы: модуль упругости E ; коэффициент Пуассона материала ν ; температура T ; число Авогадро; молекулярная масса метана μ ; газовая постоянная R . В модель входят также главные компоненты действующих в материале напряжений σ_1 и σ_2 .

В ходе преобразования и анализа системы уравнений модели можно получить оценочное соотношение, определяющее возможность развития микротрещины отрыва за счет выхода в нее молекул связанного метана:

$$\frac{\alpha h d_0}{K_{1c}^2} > \frac{2(1 - \nu^2)\mu}{3ERT}. \quad (3)$$

Условие развития микротрещин (3) зависит от природного содержания метана в угле d_0 и в значительной степени от трещиностойкости угольного вещества K_{1c} , от которой также зависит толщина микрослоя h , эмитирующего молекулы метана в развивающуюся трещину. В это условие не входит геометрический параметр — длина трещины. Следовательно, если трещина начнет расти за счет выхода в нее связанного метана, то условия ее роста сохраняются при увеличении размера трещины. Таким образом, трещинообразование в метанонасыщенном угле, начавшееся на одном масштабном уровне, должно перейти на более крупные масштабные уровни. Оценка показывает, что при значении трещиностойкости $K_{1c} \approx 0,05$ МПа·м^{1/2} диаметр фрагментов, на

которые может дезинтегрироваться уголь при действии связанного метана, имеет порядок 10^{-5} м. Это значение соответствует размеру фрагментов «бешеной муки» при крупных выбросах угля и газа.

Заключение

Из совместного анализа условий десорбции метана и разрушения угля следует, что значение микроструктуры угля, как одного из определяющих факторов в предрасположенности угля к газодинамическим проявлениям, физически объясняется тем, что именно на этом уровне проявляется возможность участия связанного метана в разрушении угля. При этом трещины, начавшись развиваться на этом масштабном уровне, должны перерасти в макротрещины другого уровня. Для трещин, в которых действует только свободный метан, изначально находящийся в угольном пласте, это невозможно. Состояние связанного метана в угле (сорбированный или растворенный метан) не имеет большого значения для газодинамического разрушения угля. Проведенные исследования подтверждают вывод о том, что анализ структуры нарушенности угля на микроуровне может быть эффективным методом прогноза внезапных выбросов угля и газа в угольных пластах.

Библиографический список

См. англ. блок. [73](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 22–27
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.04

Analysis of the connection between the microstructure and gas-dynamic fracture susceptibility in coal

Information about authors

V. A. Bobin¹, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences
O. N. Malinnikova¹, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences
V. N. Odintsev¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences, odin-vn@yandex.ru
V. A. Trofimov¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences

¹ Academician Melnikov Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The concept of the governing role of coal microstructure in the mechanism of fast transition of methane between the bound and unbound states and on participation of methane in gas-dynamic fracture of coal, starting from micro-scale, is developed. The concept contains two determinative factors – transition of methane molecules between bound and unbound state and ability of free methane to disintegrate coal in micro-fractures. The studies used the methods of fractal analysis of multi-scale images of damage obtained in outburst-hazardous and outburst-non-hazardous coal using a scanning electron microscope with the resolving power around 100 nm; analytical estimation of time of bound methane molecule liberation from coal particles by the mechanism of diffusion; assessment of stress state of coal particles after contact interaction between them and the theory of tensile micro-fracturing due to release of methane molecules in the fracture space.

It follows from the joint analysis of methane desorption and coal fracture conditions that the governing role of coal micro-structure is conditioned by the possibility to determine participation of bound methane in the dynamic fracture of coal at a micro-level. Moreover, by contrast to unbound methane initially occurring in coal, disintegration of coal by bound methane should unavoidably transfer to larger scales. Peculiarities of bound methane conditions in coal (occluded or dissolved methane) are of no high importance for gas-dynamic fracture of coal. The undertaken research supports the conclusion that the analysis of coal damage at a micro-scale can be an efficient method to predict coal and gas outbursts in coal beds.

Keywords: coal microstructure, bound methane, coal bed, coal fracture, fractal analysis, fracture, gas release.

References

- Malyshev Yu. N., Trubetskoy K. N., Ayruni A. T. Fundamentally applied methods of solving the coal layer methane problems. Moscow : Izdatelstvo Akademii gornykh nauk, 2000. 519 p.
- Bobin V. A. Sorption processes in natural coal and its structure. Moscow : IPKON AN SSSR, 1987. 135 p.

- Ettinger I. L. Diffusion field in coal layer. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1991. No. 4. pp. 109–111.
- Ulyanova E. V. Structural and composite reconstructions in fossil coals. Connection of microstructure with kinetics of mining processes. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2012. 304 p.
- Khristianovich S. A., Salganik R. L. Sudden emissions of coal (rock) and gas. Stresses and strains. *Preprint Instituta problem mekhaniki AN SSSR*. 1980. No. 153. 75 p.
- Litwinyshyn J. Rarefaction Shock Waves, Outbursts Consequential Coal Damage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 1990. 27, Iss. 6. pp. 535–540.
- Huoyin Li. Major and minor structural features of bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield, northern China. *International Journal of Coal Geology*. 2001. Vol. 47, Iss. 2. pp. 101–113.
- Fan Chaojun, Li Sheng, Luo Mingkun, Du Wenzhang, Yang Zhenhua. Coal and gas outburst dynamic system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. Vol. 27, Iss. 1. pp. 49–55.
- An F. H., Cheng Y. P. An explanation of large-scale coal and gas outbursts in underground coal mines: the effect of low-permeability zones on abnormally abundant gas. *Natural Hazard Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14. pp. 2125–2132.
- Guan P., Wang H., Zhang Y. Mechanism of instantaneous coal outbursts. *Geology*. 2009. Vol. 37, No. 10. pp. 915–918.
- Sidorenko A. A., Sishchuk J. M., Gerasimova I. G. Underground mining of multiple coal seams: Problems and solutions. *Eurasian Mining*. 2016. No. 2. pp. 11–15. DOI: 10.17580/em.2016.02.03
- Wang S., Elsworth D., Liu J. Rapid decompression and desorption induced energetic failure in coal. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 7, Iss. 3. pp. 345–350.
- Feldman E. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A. Physical kinetics of coal-methane system: Mass transfer, pre-outburst events. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 3. pp. 46–65.
- Bazhin V. Yu., Feshchenko R. Yu., Ramana G. V., Shabalov M. Yu. Extreme low-grade coal treatment coupled with X-ray testing. *CIS Iron and Steel Review*. 2016. No. 1. pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisir.2016.01.01
- Dyrdin V. V., Smirnov V. G., Shepeleva S. A. Parameters of methane condition during phase transition at the outburst-hazardous coal seam edges. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013. No. 6. pp. 78–82.
- Alekseev A. D., Vasilenko T. A., Gumennik K. V., Kalugina N. A., Fel'dman E. P. Diffusion-filtration model of methane escape from a coal seam. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2007. Vol. 77, No. 4. pp. 65–74.
- Trubetskoy K. N., Ruban A. D., Viktorov S. D., Malinnikova O. N., Odintsev V. N. et al. Fractal structure of deformed coal beds and their susceptibility to gas-dynamic failure. *Doklady Akademii nauk*. 2010. Vol. 431, No. 6. pp. 818–821.

18. Smith T. G., Lange G. D., Marks W. B. Fractal methods and results in cellular morphology – dimensions, lacunarity and multifractals. *Journal of Neuroscience Methods*. 1996. Vol. 69, Iss. 2. pp. 123–136.
19. Malinnikova O. N., Malinnikov V. A., Uchaev D. V., Uchaev D. V. About the effect of noises, caused by coal sample images SEM on the assessment of coal inclination to sudden emissions. *Deformation and destruction of defected materials and dynamic phenomena in rocks and excavations : thesis of reports of the XXVI International scientific school named by Academician S. A. Khristianovich*. Alushta, 2016. pp. 134–139.
20. Savinykh V. P., Malinnikov V. A., Uchaev D. V., Uchaev D. V. Automated technology of decoding and analysis of linear and ring structures on space images. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*. 2012. No. 6. pp. 53–65.
21. Malinnikova O. N., Odintsev V. N., Trofimov V. A. Assessment of conditions of coal methane yield on microstructure level. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2009. Special issue No. 11. Methane. pp. 189–204.
22. Kuznetsov S. V., Trofimov V. A. Gasdynamics in a coal seam. Part 1: Mathematical description of the desorption kinetics. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2009. No. 1. pp. 6–14.
23. Nazarova L. A., Nazarov L. A. Evolution of stresses and permeability of fractured-and-porous rock mass around a production well. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016. No. 3. pp. 11–19.
24. Nazarova L. A., Nazarov L. A. Inverse Problems in Geomechanics: Diagnostics and Prediction of the State of Rock Masses with Estimating Their Properties. *Applied Inverse Problems: Select Contributions from the First Annual Workshop on Inverse Problems : Conference proceedings*. New York : Springer, 2013. Vol. 48. pp. 95–103.
25. Atkinson B. K. *Fracture Mechanics of Rock*. London : Academic Press, 1987. 546 p.
26. Bobin V. A., Zimakov B. M., Odintsev V. N. Assessment of energy of inter-molecular repulsion of sorbate molecules in coal micropores. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1989. No. 5. pp. 48–56.
27. Urakaev F. Kh. Theoretical and applied aspects of mechanochemistry of inorganic substances. Modelling of mechanochemical processes. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 408 p.

УДК 539.213.2:622.272.63

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА*



О. Н. МАЛИННИКОВА,
заведующая лабораторией,
д-р техн. наук,
olga_malinnikova@mail.ru



Е. В. УЛЬЯНОВА,
ведущий научный сотрудник,
д-р техн. наук



М. О. ДОЛГОВА,
ведущий инженер



И. В. ЗВЕРЕВ,
ведущий инженер

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Практика ведения горных работ показывает, что существуют два феномена, связанные с процессами метановыделения из угольных пластов. С одной стороны, известно, что угольные пласты весьма трудно отдают газ и поддаются дегазации. С другой стороны, при разработке угольных пластов самопроизвольно могут происходить внезапные выбросы, при которых с разрушенным углем выбрасывается огромное количество метана, зачастую

На основе статистического анализа данных по внезапным выбросам угля и газа показано, что основное количество метана при выбросе, часто существенно превышающее газоносность пласта, выделяется непосредственно из выброшенного угля, а не из полости выброса. Применение ИК и ¹³C ЯМР-спектроскопии угля позволило сделать заключение, что разрушение угля при внезапном выбросе происходит на внутримолекулярном уровне, с разрывом наиболее слабых связей в алифатической части, в том числе отрывается большое количество метильных групп. Полученные результаты дают основание считать, что во время выброса происходит образование дополнительного метана. Сделаны количественные оценки возможного метанообразования в процессе двух реальных внезапных выбросов.

Ключевые слова: ископаемый уголь, внезапные выбросы угля и газа, метан, микроструктура, спектроскопические методы.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.05

многократно превышающее природную газоносность угольных пластов.

Причины повышенного газовыделения, часто наблюдаемого при внезапных выбросах угля и газа, обсуждаются уже давно. Авторам гипотез образования метана из угля при разрушении [1–12] или «дополнительной активационной десорбции метана под действием механоэмиссии горных пород при их разрушении» [13, 14] противостояли авторы гипотез, утверждающие, что дополнительное количество газа выделяется при дегазации угля и пород вокруг полости выброса [15–17].

Для выяснения физической природы источника этого дополнительного газа был выполнен комплекс исследований, включивший анализ фактических данных о газодинамических явлениях (ГДЯ), геомеханические и физико-химические исследования с использованием методов спектроскопии.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00584.