

УДК 539.26: 539.971

Т.А. Василенко¹, А.К. Кириллов¹, В.В. Соболев², А.С. Дорошкевич³,
Е.А. Пронский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕЙ ДОНЕЦКОГО БАСЕЙНА МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

¹ Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр ул. Симферопольская, 2-а.

² Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»,
49005 г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19

³ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,
03680, Киев, пр. Науки, 46

Целью исследования является определение фрактальных характеристик иерархической структуры ископаемых углей с помощью такого неразрушающего метода, как малоугловое рассеяние тепловых нейтронов, позволяющего изучать структуру в объеме образцов.

В работе определены фрактальные размерности и получены их корреляционные связи с удельной поверхностью порового пространства, степенью углефикации, глубиной залегания и склонностью пластов к выбросам угля и газа для углей Донецкого угольного бассейна. Полученные фрактальные размерности и удельные поверхности дают представление о полной пористости в отличие от метода низкотемпературной адсорбции азота, характеризующего только открытую пористость.

Впервые показано, что структура углей выбросоопасных пластов характеризуется поверхностным фракталом D_f с размерностью, близкой к значениям 2,9 – 3,0 или массовым фракталом, который образован конгломератами различных минеральных включений, содержащих железо и серу. В угрожаемых пластах структура угля характеризуется более «гладкими» поверхностями порового пространства при значениях $D_f < 2,9$ и повышенным содержанием кремния и алюминия.

Ключевые слова: выбросоопасный пласт, закрытая пористость, малоугловое рассеяние, минеральные включения, нейтрон, уголь, удельная поверхность, фрактальная размерность.

Введение

Иерархическая структура гетерогенной среды предполагает соподчиненность различных уровней организации вещества, оказывающих взаимное влияние при внешнем воздействии на среду, а также существенно изменяет теоретические представления о процессах переноса массы и зарядов, развитых для однородной среды [1]. Описание движения частицы в средах с фрактальной организацией требует привлечения уравнений переноса с дробными производными [2].

Сложная структура пористых сред может быть описана в представлении фрактальной геометрии. В соответствии с одним из свойств фрактального агрегата, средняя массовая плотность вещества в сфере радиуса R равна:

$$\rho(R) = \rho_0 (r_0/R)^{3-D_f},$$

где: ρ_0 – плотность материала частиц, составляющих агрегат, r_0 – средний радиус частиц, образовавших агрегат, D_f – фрактальная размерность агрегата. Размерность может быть дробной величиной, если получившаяся структура окажется фракталом – самоподобным множеством с нецелой размерностью. Если для трехмерного пространства, определяемая экспериментально фрактальная размерность находится в пределах $1 < D_f < 2$, то формируется цепочечная разветвленная структура. Если ее значение попадает в диапазон $2 < D_f < 3$, то образуется пористый ажурный каркас. Величина фрактальной размерности $D_f \cong 2$, указывает на образование слоистых структур [3].

Исследование фрактальных структур в физике конденсированных сред является актуальной задачей. Основные представления о фрактальных кластерах получены при моделировании их образования методом Монте-Карло [4]. Одним из примеров такого фрактала является агломерат полидисперсных сфер, образованный несколькими уровнями линейных масштабов [5]. Представление о фрактальности пористого пространства ископаемых углей позволило объяснить изменение электропроводности образцов при их газонасыщении [6].

Постановка задачи исследования

При исследовании таких гетерогенных пористых объектов, как ископаемые угли, необходимо применение неразрушающих методов, позволяющих получать характеристики среды не только на основе данных о поверхности, но и из всего объема образца. Получение характеристик интерфейсов (границ) порового пространства и распределения пор по размерам возможно с помощью таких методов, как рентгенография и нейтронное рассеяние. Исследования такого рода выполнены для углей из угольных бассейнов США, Польши, Канады, Китая и Австралии [7-11].

Ранее мы исследовали фрактальные характеристики иерархической структуры ископаемых углей Донецкого бассейна методами импедансной спектроскопии, атомной силовой микроскопии, одноосного нагружения высоким давлением до 2 ГПа, и малоуглового рентгеновского рассеяния. Анализировались отдельные образцы, принадлежащие различным стадиям метаморфизма [12–15].

Цель нашего исследования – определить фрактальные характеристики иерархической структуры ископаемых углей с помощью малоуглового рассеяния тепловых нейтронов.

Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей (МУРР) и нейтронов (МУРН) позволяет оценить фрактальную размерность из наклона кривой рассеяния, если выполняется степенная зависимость:

$$I(q) = A \cdot q^{-\alpha} + B, \quad (1)$$

где $I(q)$ – интенсивность рассеяния при значении модуля вектора рассеяния $q = 4\pi \sin \theta / \lambda$, 2θ – угол рассеяния. Постоянные A , B и α определяют из графика, построенного в двойных логарифмических координатах для зависимости $I(q)$:

$$\lg(I) = -\alpha \cdot \lg(q) + \lg(A) \quad (2)$$

Тангенс угла наклона α связан с фрактальной размерностью: 1) если $\alpha < 3$, то $\alpha = D_m$; 2) если $3 < \alpha < 4$, то $\alpha = 6 - D_s$. Первый вариант соответствует структурной организации в виде массового фрактала, второй вариант – поверхностному фракталу [16, 17] или степенной зависимости распределения объектов по размерам [9, 16] $dN(r)/dr \sim r^{-\tau}$, где $\tau = D_s + 1$.

1. Условия проведения эксперимента

Измерения рассеяния нейтронов проводилось на малоугловом спектрометре YuMO импульсного реактора IBR-2 Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна. Использовали образцы углей из ряда шахт Донбасса.

Особенностью спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов на ИБР-2 является аксиально-симметричная геометрия коллиматоров и детекторов нейтронов с центральным отверстием, а также использование ванадиевых стандартов. Аксиально-симметричная геометрия существенно упрощает учет функции разрешения установки. Наличие центрального отверстия в детекторах обеспечивает возможность одновременных измерений с использованием сразу трех детекторов, что позволяет при одном измерении перекрыть широкий диапазон значений векторов рассеяния. Ванадиевые стан-

дарты позволяют с высокой точностью извлекать значение дифференциального сечения рассеяния в абсолютных единицах.

В предположении изотропного распределения изучаемых неоднородностей выражение для дифференциального сечения рассеяния нейтронов описывается формулой Дебая:

$$\left\langle \frac{d\sigma}{d\Omega} \right\rangle = \iint_{VV'} \rho(r)\rho(r') \frac{\sin q|r-r'|}{q|r-r'|} drdr', \quad (3)$$

где q – волновой вектор рассеяния. Из выражения (3) следуют следующие предельные случаи. Если неоднородности имеют характерный размер L , то для $qL \ll 1$ $\sin(qL)/qL \approx 1$, и сечение рассеяния оказывается пропорциональным $\rho^2 V^2$, т.е. не зависящим ни от формы, ни от внутреннего строения изучаемого объекта. При $qL \gg 1$ осциллирующий характер функции $\sin(x)/x$ приводит к быстрому затуханию сечения рассеяния с ростом q , которое в предельном случае пропорционально $(qL)^{-4}$. Наиболее информативной является область $qL \sim 1$, анализ которой позволяет получить данные о характерных размерах, форме и молекулярной массе изучаемых объектах. Малоугловому рассеянию соответствует предельный случай $qL \gg 1$ [18].

Образцы измельчались до фракций размером 0,1 – 0,5 мм и помещались в линейной кассете спектрометра малоуглового рассеяния с круговыми ячейками, имеющими диаметр 12 мм. Внутри ячеек образцы фиксировались лентой скотч. Регистрация интенсивности рассеянных нейтронов для каждого образца проводилась в течение 20 мин.

Получены кривые рассеяния нейтронов в интервале векторов рассеяния $q = (0,051 - 1,36 \text{ нм}^{-1})$ для 27 образцов углей различных стадий метаморфизма в каждой из партий, доставленных из шахт Центрального Донбасса. Первая партия содержала угли ранних стадий метаморфизма Г, ДГ, Д и Ж. Вторая (ГП «Макеевуголь») и третья (ГП «Артемуголь») партии включала в основном угли К, ОС и Т, а четвертая – А (антрациты) ГП «Торезантрацит».

При построении кривых рассеяний данные от трех детекторов приводились в единую шкалу по оси ординат и строились кривые рассеяния в координатах $\lg(I)$ от $\lg(q)$ (рис. 1), где $I = (d\sigma/d\Omega)/V$ – поток рассеянных нейтронов (см^{-1}), q – модуль вектора рассеяния (нм^{-1}), V – объем образца.

2. Основные результаты и их обсуждение

Аппроксимация кривых рассеяния степенными зависимостями в виде (1) позволила сделать заключение о наличии фрактальности поверхности пор или фрактального распределения пор по размерам для углей средних и поздних стадий метаморфизма. Получены статистические зависимости, позволяющие проследить изменение показателя степени α в экспериментальных кривых рассеяния нейтронов от характеристик углей.

Рассматривались зависимости таких параметров, как полная и закрытая пористость, глубина залегания пласта, удельная поверхность пор, стадии метаморфизма исследованных углей от поверхностной фрактальной размерности $D_f = (6-\alpha)$ [21, 22].

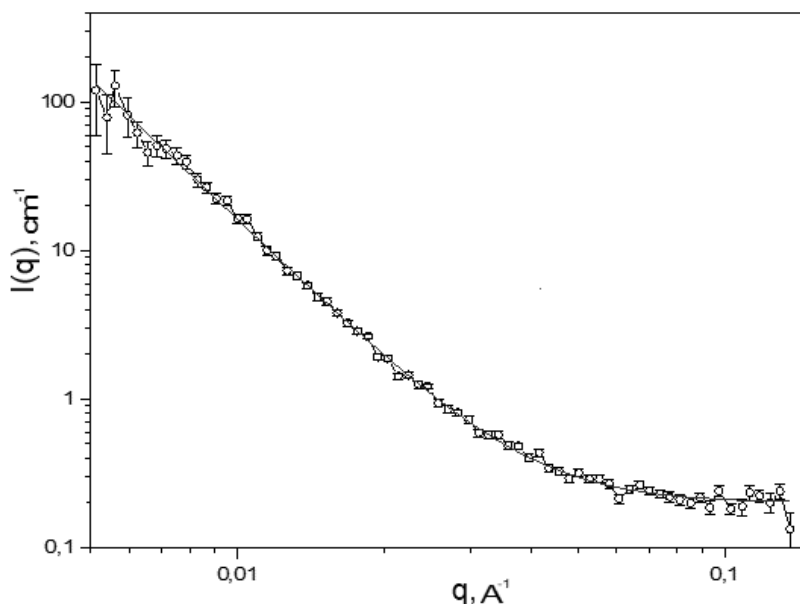


Рис. 1. Экспериментальная кривая рассеяния нейтронов для образца угля марки Т (ГП «Макеевуголь» ш. им. С.М. Кирова, пласт H^B_{10}), построенная в двойных логарифмически координатах

Получено, что для углей ранних стадий метаморфизма (ДГ и Г) показатель степени α не превышает значения три. То есть, эти угли можно рассматривать как массовые фракталы. К массовым фракталам следует отнести также отдельные образцы углей марок Ж и К. Из двух антрацитов один из них также можно рассматривать как массовый фрактал.

Данные, полученные из изотерм низкотемпературной адсорбции азота, не дают полного представления о распределении пор и удельной поверхности порового пространства, поскольку относятся только к открытым порам. Метод МУРН позволяет изучать полную пористость и определить удельную поверхность всех пор, поскольку кривая рассеяния $I(q)$ получается в результате взаимодействия нейтронов с веществом во всем объеме образца.

Для удельной поверхности пор, имеющих линейный масштаб r с учетом фрактальности их поверхности, выполняется равенство [7, 9]

$$S(r)/V = I(0)r^{2-D_f} / (2\pi\Delta\rho^2 F(D_f)),$$

где $I(0)$ – коэффициент в выражении для интенсивности рассеяния $I(q)=I(0)q^{-\alpha}$, $F(D_f) = \Gamma(5-D_f) \cdot \sin[(3-D_f)\pi/2]$, Γ – гамма-функция, V – объем об-

разца, $\Delta\rho = \rho_{\text{solid}} - \rho_{\text{pore}}$ – разность между плотностями длины рассеяния нейтронов (SLD – scattering length density) для твердой фазы образца и пор [19]. Для пустых пор $\Delta\rho = \rho_{\text{solid}}$. Для углерода $\rho = 5,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а для ископаемых углей ρ изменяется в пределах $(2-3,5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

После проведения необходимых вычислений получены значения удельной поверхности. Они соответствуют минимальным значениям r_{min} , связанным с максимальными значениями вектора рассеяния q_{max} , для которого выполняется степенная зависимость интенсивности рассеяния $I(q_{\text{max}})$, равенством $r_{\text{min}} = 2\pi/q_{\text{max}}$ (рис. 1).

Представляет интерес получить зависимость фрактальной размерности от некоторых параметров углей. При дальнейшем анализе из всего набора исследованных углей рассматривались только угли с поверхностной фрактальной размерностью, для которых показатель степени α кривой рассеяния заключен в пределах $3 < \alpha < 4$.

Зависимость между D_f и удельной поверхностью A ($\text{м}^2/\text{г}$), вычисленной из измерений МУРН (рис. 2), с высокой точностью ($R^2 = 0,938$) аппроксимируется методом наименьших квадратов (МНК) логарифмической зависимостью вида $D_f = a \cdot \lg(bA)$ с коэффициентами $a = 0,256$ и $b = 1,18 \cdot 10^{11}$. Подобная зависимость между D_f и удельной поверхностью была получена для углей из сорбционных экспериментов авторами работы [20].

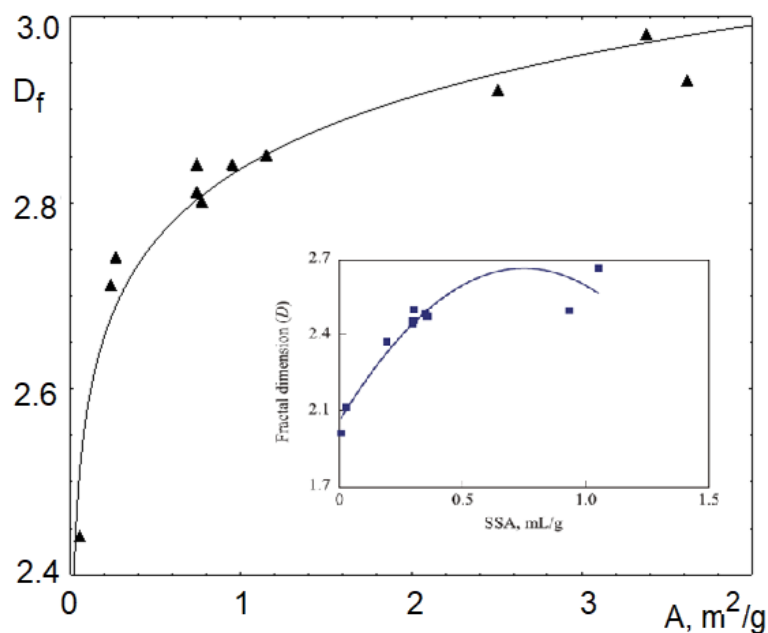


Рис. 2. Связь поверхностной фрактальной размерности с удельной поверхностью углей по данным МУРН. На врезке для сравнения приводится рисунок из статьи [20]

Анализ принадлежности каждой точки на графике к типу углей показал, что три точки, лежащие в правом верхнем углу, относятся к углям марки ОС из выбросоопасных пластов. Точка в нижнем левом углу соответствует антрациту. Выше расположены две точки для углей ОС (невыбросоопасные – ш. Ясиновская-Глубокая). Показательны данные для углей ОС из ш. им. А.И. Гаевого. Первый из них – выбросоопасный пласт k_3 , имеет наибольшее значение удельной поверхности $A = 3,6 \text{ м}^2/\text{г}$, в то время как, точка для угля из угрожаемого пласта k_3 занимает среднее положение ($D_f = 2,84, A = 0,95 \text{ м}^2/\text{г}$).

Таким образом, наблюдается зависимость удельной поверхности пор от фрактальной размерности. Угли из выбросоопасных пластов имеют более высокие значения D_f , чем угли из пластов, отнесенных к угрожаемым. Действительно, по данным МУРН без учета углей, в которых структура характеризуется массовым фракталом, получены средние значения $D_f = 2,892$ и $D_f = 2,74$, где последнее значение относится к угрожаемым пластам.

Имеется различие и в удельных поверхностях углей для указанных категорий пластов. При вычислениях средних значений S/V воспользуемся данными МУРН. Получено: $S/V = 2,68 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{см}^3$ ($n = 6$) для выбросоопасных и $S/V = 9,77 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{см}^3$ ($n = 8$) для невыбросоопасных пластов. Можно утверждать, что удельная поверхность пор в углях из выбросоопасных пластов более чем в 2,5 раз превосходит S/V в углях из угрожаемых пластов. Достаточно большая статистическая выборка исследуемых углей позволила получить зависимость фрактальной размерности от глубины залегания угольного пласта. Вследствие большой вариативности физико-механических свойств углей не удалось получить статистически значимую зависимость для всех образцов. Наиболее показательной является такая зависимость для углей марки ОС (рис. 3). Максимум распределения характеризует выбросоопасные пласты, содержащие угли с фрактальной размерностью $D_f > 2,8$. Еще более показательна зависимость $D_f(H)$ для углей, прошедших метаморфизацию в одинаковых горно-геологических условиях (ш. им. А.И. Гаевого). Уменьшение D_f с глубиной указывает на хаотизацию структурной организации порового пространства угольного вещества.

Тектоническая нарушенность угольных пластов. Для понимания механизмов развязывания внезапных выбросов необходимо обоснование структурных особенностей углей, расположенных в выбросоопасных пластах. Имеющиеся в нашем распоряжении образцы углей из шахт Донецкого угольного бассейна позволили сделать выводы, касающиеся этой проблемы. Оказалось, что она связана с деформируемостью углей в процессе метаморфизма на геологических масштабах времени, а также с особенностями структуры углей в зонах геологических нарушений. Согласно [11] в общем количестве пор и распределении пор по размерам преобладают закрытые поры. «Влияние тектонических деформаций способствует увеличению количества закрытых пор, что отражается в гораздо большем объеме пор и

удельной поверхности в сильно деформированных углях, чем это наблюдается в слабо деформированном угле.» [11].

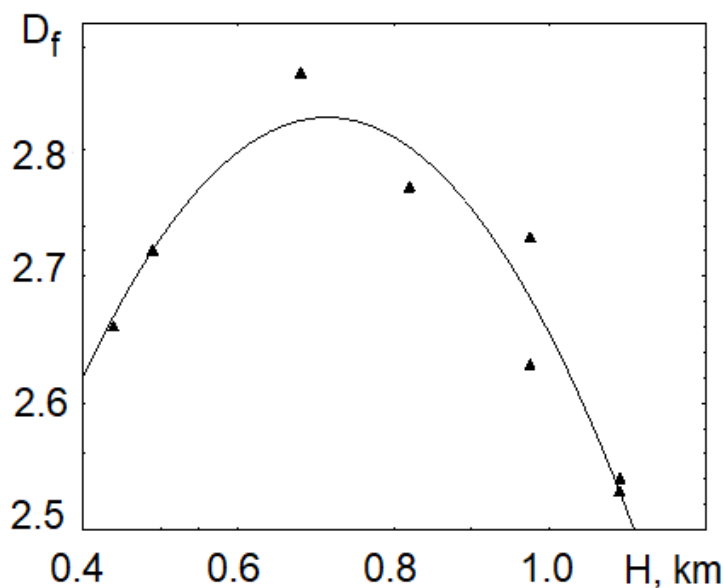


Рис. 3. Зависимость D_f от глубины залегания угольного пласта для углей марки ОС

Воспользуемся данными МУРН для выбросоопасных и угрожаемых углей. При вычислении открытой и закрытой пористости были использованы результаты, полученные для образцов серии 2 и 3, подвергавшимся одноосному деформированию (см. [14], таблица 1). Рисунок 4 дает представление о зависимости полной и закрытой пористости от фрактальной размерности, полученной методом МУРН. Вклад закрытой пористости в ряду метаморфизма показан на рисунке 5. Аппроксимация экспериментальных значений квадратичной зависимостью показала наличие максимума для углей средней стадии метаморфизма.

Из имеющихся данных вычислены значения относительного содержания закрытой пористости для выбросоопасных и угрожаемых пластов. Получены средние значения содержания закрытых пор 0,577 для угрожаемых и 0,780 для выбросоопасных. Т.е., закрытых пор больше в образцах из выбросоопасных пластов. Такая же тенденция наблюдается для двух образцов углей ОС, которые мы анализировали выше: для выбросоопасного угля закрытая пористость составляет 0,167, в то время как для угля из угрожаемого пласта – 0,044. То есть, в состав выбросоопасных пластов входит уголь, который по представлениям авторов [11] можно отнести к «деформированному». Для таких углей характерно повышенное содержание закрытой пористости и удельной поверхности пор. С позиций иерархической организации структуры в этих пластах уголь имеет более высокие значения поверхностной фрак-

тальной размерности. По этому параметру угольные пласты можно характеризовать, как склонные к выбросам угля, породы и газа.

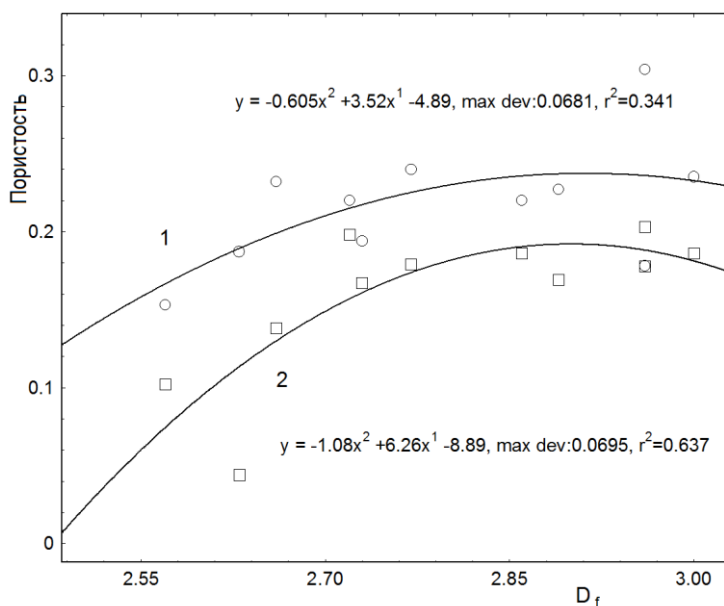


Рис. 4. Зависимость пористости углей от фрактальной размерности: 1 - полная, 2 - закрытая пористость

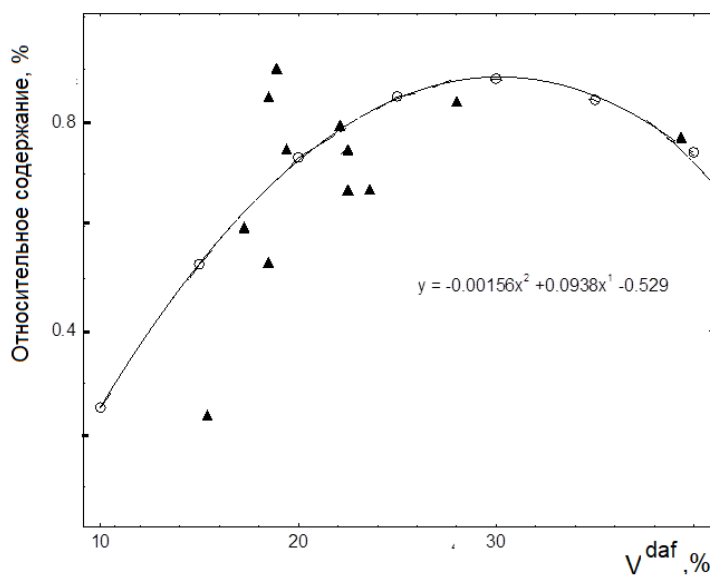


Рис. 5. Зависимость относительного содержания закрытой пористости от выхода летучих

Текстура и химический состав. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, в состав выбросоопасных угольных пластов входит

уголь, содержащий железо- и серосодержащие соединения (табл. 1). Обязательным условием выбросоопасности пласта является наличие зон с повышенным содержанием железа (достигающим 26%) и серы (до 20%). Минеральные включения в виде пирита FeS_2 образуют агрегаты, которые при МУРН характеризуются массовыми фракталами.

Таблица 1

Данные о химическом составе, измеренные на сканирующем электронном микроскопе из микрофотограмм для образцов углей

Марка	C, %	V^{daf} , %	Fe_{max}	S_{max}	D_f	Пласт
Ж	91,3	31,0	17,3	18,5	2,91(D_m)	выбросоопасный
ОС	93,7	18,5	24,3	0,43	2,98	выбросоопасный
К	87,0	25,2	26,0	17,9	2,98(D_m)	выбросоопасный
ОС	94,5	18,9	0,3	0,60	2,71	угрожаемый
ОС	93,5	19,4	23,3	23,2	2,92	выбросоопасный
Г	84,5	39,4	1,1	0,96	2,03(D_m)	угрожаемый

Для угрожаемых пластов характерны другие виды минеральных включений, содержащие оксиды кремния SiO_2 и алюминия Al_2O_3 с содержанием кремния до 18% и алюминия до 14%. Области, в которых отсутствуют эти включения соответствуют витринитам с содержанием углерода (80–86) %. Согласно данным МУРН иерархическая структура таких углей рассматривается как поверхностный фрактал с размерностью $D_s = 2,71$.

Можно сделать вывод: структура угольного вещества выбросоопасных пластов характеризуется поверхностным фракталом с фрактальной размерностью D_s , близкой к значению 2,9 – 3,0 или массовым фракталом, который образован конгломератами различных минеральных включений. В угрожаемых пластах структура угля характеризуется более «гладкими» поверхностями порового пространства при значениях $D_s < 2,9$.

Наиболее надежно такие закономерности удается выявить при сравнении двух типов структуры углей одной стадии метаморфизма, которые образовались в одних и тех же горно-геологических условиях. Это означает, что возможно предсказать наличие зон опасных по выбросам угля и газа, анализируя иерархическую структуру образцов углей, полученных из опережающих и разгрузочных скважин при отработке пласта.

Выводы

Показано, что (1) структура углей ранних стадий метаморфизма может быть рассмотрена в виде массового фрактала с массовой фрактальной размерностью $D_f = \alpha$, равной тангенсу угла наклона кривой рассеяния, построенной в двойных логарифмически координатах; (2) значения удельной поверхности A (или S/V), полученные нами из данных МУРН, соответствуют

полной пористости образцов и обеспечивают высокую надежность корреляции ($R^2 > 0,9$) для зависимости $A = f(D_f)$; (3) Высокие значения поверхностной фрактальной размерности и повышенное содержание минеральных включений, содержащих железо и серу, могут служить критерием тектонической нарушенности структуры углей и признаком выбросоопасности угольного пласта.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность А.И. Куклину и А.Х. Исламову за техническое обеспечение экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов и за обсуждение результатов исследования.

1. Sokolov I.M. (2009) Anomalous Diffusion on Fractal Networks. In: Meyers R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer, New York, NY, 13-25. Doi:10.1007/978-0-387-30440-3
2. Zelenyi, L.M., & Milovanov, A.V. (2004). Fractal topology and strange kinetics: From percolation theory to problems in cosmic electrodynamics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 174(8), 809. doi:10.3367/ufnr.0174.200408a.0809
3. Kudryavtsev P., Figovskiy O. (2015) Zol'-gel' tekhnologiya poristyykh kompozitov. LAP Lambert Academic Publishing, 2015, ISBN 978-3-659-78529-0, 466 p.
4. Smirnov B.M. (1991) Fizika fraktal'nykh klasterov. Nauka, Moscow, 136 p.
5. Eggersdorfer, M.L., & Pratsinis, S.E. (2012). The Structure of Agglomerates Consisting of Polydisperse Particles. *Aerosol Science and Technology*, 46(3), 347-353. doi:10.1080/02786826.2011.631956
6. Astakhov A.V., Belyi A.A., Shirochin D.L., Ekonomova L.N. (1998) Osobennosti dielektricheskikh svoystv gazonasyschennogo uglya i fraktal'nost' ego strukturnoi organizatsii. *Khimiya tverdogo topliva*. 5, 37–42.
7. Bale, H.D., & Schmidt, P.W. (1984). Small-Angle X-Ray-Scattering Investigation of Submicroscopic Porosity with Fractal Properties. *Physical Review Letters*, 53(6), 596-599. doi:10.1103/physrevlett.53.596.
8. Radlinski, A., Mastalerz, M., Hinde, A., Hainbuchner, M., Rauch, H., Baron, M., Thiyagarajan, P. (2004). Application of SAXS and SANS in evaluation of porosity, pore size distribution and surface area of coal. *International Journal of Coal Geology*, 59(3-4), 245-271. doi:10.1016/j.coal.2004.03.002
9. Snook, I., Yarovsky, I., Hanley, H. J., Lin, M.Y., Mainwaring, D., Rogers, H., & Zulli, P. (2002). Characterization of Metallurgical Chars by Small Angle Neutron Scattering. *Energy & Fuels*, 16(5), 1009–1015. doi:10.1021/ef010107n
10. Melnichenko, Y.B., He, L., Sakurovs, R., Kholodenko, A.L., Blach, T., Mastalerz, M., Mildner, D.F. (2012). Accessibility of pores in coal to methane and carbon dioxide. *Fuel*, 91(1), 200–208. doi:10.1016/j.fuel.2011.06.02
11. Niu, Q., Pan, J., Cao, L., Ji, Z., Wang, H., Wang, K., & Wang, Z. (2017). The evolution and formation mechanisms of closed pores in coal. *Fuel*, 200, 555–563. doi:10.1016/j.fuel.2017.03.084

12. Alekseev A.D., Konstantinova T.E., Kirillov A.K., Doroshkevich A.S., Caprykina A.V. (2010). Dielektricheskie svoystva uglei v intervale chastot do 1 MHz. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, Donetsk, Vyp.13, 22–31.
13. Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Kirillov A.K. (2008). Svyaz' fraktal'noi razmernosti strukturnoi organizatsii ugol'nogo veshchestva s parametrami diffuzii metana // *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Metan. – Moskva: Gornaya kniga. – Vyp. 4, 76–84.
14. Vasilenko T.A., Kirillov A.K., Slyusarev V.V. (2015). Issledovanie ierarkhicheskoi struktury iskopaemykh uglei metodom pressovaniya. Opredelenie polnoi poristosti. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 25(1–2), 133–142.
15. Kirillov A.K. (2011). Issledovanie uglei Donetskogo ugol'nogo basseina metodom malouglovogo rentgenovskogo rasseyaniya. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, Donetsk, Vyp. 14, 20–32.
16. Cherny, A.Y., Anitas, E.M., Osipov, V.A., & Kuklin, A.I. (2017). Scattering from surface fractals in terms of composing mass fractals. *Journal of Applied Crystallography*, 50(3), 919–931. doi:10.1107/s1600576717005696
17. Hurd, A.J., Schaefer, D.W., & Martin, J. E. (1987). Surface and mass fractals in vapor-phase aggregates. *Physical Review A*, 35(5), 2361–2364. doi:10.1103/physreva.35.2361
18. Sinha S. (1999). Small-angle scattering from porous materials. In: Wong P.Z (ed.) *Methods in the physics of porous media*. San Diego, London: Academic Press; 223–262.
19. Melnichenko, Y.B. (2015). *Small-angle scattering from confined and interfacial fluids: Applications to energy storage and environmental science*. Berlin: Springer.
20. Xinhul M., D.L (2014). Experimental research on pore structure and gas adsorption characteristic of deformed coal. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology Scientific Research*, 16(4), 55–64.

Т.А. Василенко, А.К. Кірілов, В.В. Соболев, О.С. Дорошкевич, Е.О. Пронський

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЄРАРХІЧНОЇ СТРУКТУРИ ВУГІЛЛЯ ДОНЕЦЬКОГО БАСЕЙНУ МЕТОДОМ МАЛОКУТОВОГО РОЗСІЮВАННЯ НЕЙТРОНІВ

Метою дослідження є визначення фрактальних характеристик ієрархічної структури вкопного вугілля за допомогою такого неруйнівного методу, як малокутове розсіювання теплових нейтронів, що дозволяє вивчати структуру в об'ємі зразків.

В роботі визначені фрактальні розмірності і отримані їх кореляційні зв'язки з питомою поверхнею порового простору, ступенем вуглефікації, глибиною залягання і схильністю пластів до викидів вугілля і газу для вугілля Донецького вугільного басейну. Отримані фрактальні розмірності і питомі поверхні дають уявлення про повну пористість на відміну від методу низькотемпературної адсорбції азоту, що характеризує тільки відкриту пористість.

Вперше показано, що структура вугілля викидонебезпечних пластів характеризується поверхневим фракталом D_f з розмірністю, близькою до значень 2,9 – 3,0 або масовим фракталом, який утворений конгломератами різних мінеральних вклю-

чень, що містять залізо і сірку. У загрозованих пластах структура вугілля характеризується більш «гладкими» поверхнями порового простору при значеннях $D_f < 2,9$ і підвищеним вмістом кремнію і алюмінію.

Ключові слова: викидонебезпечні пласти, закрита пористість, малокутове розсіювання, мінеральні вclusions, нейтрон, вугілля, питома поверхня, фрактальна розмірність.

T.A. Vasilenko, A.K. Kirillov, V.V. Sobolev, A.S. Doroshkevich, E.A. Pronsky

INVESTIGATION OF THE HIERARCHICAL STRUCTURE OF DONETS FIELD COALS BY THE SMALL-ANGLE SCATTERING OF NEUTRONS

The investigation of fractal structures in the physics of condensed matter is an urgent task. An example of a geometric fractal is the complex hierarchical organization of the pore space of fossil coals, represented as fractal clusters containing elements of different scales. The determination of the fractal dimension of such objects makes it possible to explain the dependence of the physical and mechanical characteristics of the coals under external influences.

The aim of the study is the determination of the fractal characteristics of hierarchical structure of fossil coals by means of a non-destructive method such as small-angle scattering of thermal neutrons, which makes it possible to study the structure in the volume of samples.

Fractal dimensions and their correlation links with the specific surface of the pore space, the degree of coalification, the depth of coal seam and with the propensity of the seam to coal and gas outbursts for coals of the Donetsk coal basin are determined. The resulting fractal dimensions and specific surfaces gives the total porosity, in contrast to the method of low-temperature adsorption of nitrogen, which characterizes open porosity only.

The photomicrographs obtained with the scanning electron microscope made it possible to conclude that the structure of the coal of the outburst hazardous layers is characterized by a surface fractal D_f with a dimension close to 2,9–3,0 or by the mass fractal that is formed by conglomerates of various mineral inclusions containing iron and sulfur. In threatened seams, the coal structure is characterized by more "smooth" pore space surfaces at $D_f < 2,9$ and by the higher content of silicon and aluminum.

Keywords: coal, closed porosity, fractal dimension, hazardous seam, mineral inclusions, neutron, small-angle scattering, specific surface.