

6. Алехин В. И. Поля суммарных деформаций и напряжений в разновозрастных породных комплексах Приазовского блока УЩ / В. И. Алехин // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Сер. гірничо-геол. – Донецьк. – 2004. – Вип. 81. – С. 92–97.
7. Юдин В.В. Тектоника Южного Донбасса и рудогенез / В.В. Юдин. – К. : УкрГГРИ, 2006. – 58 с.
8. Новейшая тектоника и геодинамика: область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты / В. И. Макаров, Макарова Н. В., С. А. Несмеянов и др. – М. : Наука, 2006. – 206 с.
9. Лукинов В. В. Тектоника метаноугольных месторождений Донбасса / В. В. Лукинов, Л. И. Пимоненко. – К. : Наук. Думка, 2008. – 352 с.
10. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений / В. И. Старостенко, А. Е. Лукин, В. П. Коболев и др. // Геофизический журнал. – 2009. – Т 31. – № 4. – С. 44 – 68.
11. The Donets Basin (Ukraine / Russia): coalification and thermal history / R.F. Sachsenhofer, V.A. Privalov, M.V. Zhykalyak et. al. // International journal of coal geology. – 2002. – V. 49, Issue 1. – P. 33 – 55.
12. Обґрунтування вибору перспективної на нафтогазоносність ділянки для проведення сейсморозвідувальних робіт та глибокого параметричного буріння / В. В. Лукинов, Л. И. Пимоненко, А. В. Поливцев и др. // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск – Вып. № 80. – 2008. – С. 307–312.

УДК 552.57 547.211:005

Д-р геол.-минерал. наук В. В. Кирюков (СПбГГУ),
канд. геол. наук Н. В. Жикаляк (ДРГП),
канд. геол.-минерал. наук О. А. Куш (ДПТУ),
Л. А. Новгородцева (УкрНИМИ),
В. Н. Новикова (СПбГГУ)

**ПОРИСТОСТЬ И НАДМОЛЕКУЛЯРНОЕ ПРОСТРАНСТВО УГЛЕЙ
ДОНБАССА И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМАМИ
КЛАССИФИКАЦИИ УГЛЕЙ И ПРОГНОЗА МЕТАНОНОСНОСТИ**

Розглянуто за даними досліджень растрової електронної мікроскопії (РЕМ) параметри і закономірності розвитку порожнинного простору донецького вугілля у ряді метаморфізму.

**POROSITY AND NADMOLEKULYARNOE UHLEY SPACE OF
DONBASS AND THEIR CONNECTION WITH CHANGES IN
CLASSIFICATION UHLEY PROBLEMS AND FORECAST
METANONOSNOSTY**

Considered according to research options and REM porozhynnoho laws of space in some of the Donetsk coal metamorphism.

Полостное пространство угля - физическое состояние твёрдого тела угля, возникающее при углеобразовании и метаногенерации, поэтому рассматривается как среда метанонасыщения и метаноотдачи. Теория формирования внутриугольного полостного **пространства сейчас рассматривается на нескольких иерархических уровнях**, а их характеристики обоснованы данными растровой электронной микроскопии (РЭМ) донецких углей [1, 2].

Полостные пространства в твёрдом теле угля именуется порами [1] и характеризуются показателями дифференциальной пористости как отношение объема порового пространства к общему объему среды или удельной внутренней

поверхностью пор, т.е. отношением внутренней поверхности твердой фазы к общему её объему (размерность обратная длине). Наиболее обоснованная классификация природных угольных пор приведена в [2].

Существуют две теории метаногенерации твердых газовых растворов и метастабильных процессов изменения углей при углеобразовании и метаногенерации, имеются веские основания в пользу каждой теории. Доказанными являются факты сохранения закрытости микропор и их измельчение при геологической нагрузке, что способствует вертикальной миграции газов в доинверсионный период. С другой стороны, укрупнение и объединение пор при геологической разгрузке обуславливает пластово-слоевую миграцию газов. Следовательно, теория метастабильного генерирования угольных газов объясняет формы нахождения метана в углях, роль макромолекулярного и надмолекулярного пространства в углях, развитие надмолекулярной пористости в углях в процессе геологической нагрузки и разгрузки, а также миграцию газов вкrest и по слоению.

Пространство углей, в котором размеры пор и молекул газа соизмеримы, является областью действия сорбционных процессов [2]. Природные угольные поры, имеющие диаметр более 100 мкм, вместе с микротрещинами образуют в угольном массиве сложную пористую систему.

Углефикационные процессы сопровождаются также образованием пористости типа газоотделения - особого вида поровых структур в виде «губчатых» систем (систем вычитания).

Полостное пространство ископаемых углей как физическое состояние представлено полостями, унаследованными с исходным веществом и вновь образовавшимися в процессе литогенеза порами и микротрещинами (агрегирование, внутри- и межслойная упаковка, неравномерное уплотнение и др., с отделением водно-газовой фазы).

Изучения в растровом электронном микроскопе (РЭМ) раскрывают фрактальную надмолекулярную и полостную (поровую, трещинную) структуру углей как генератора и коллектора метана. Изучаются взаимосвязанные процессы углеобразования и метаногенерации витринита умеренных и глубоко метаморфизованных углей. Витринит является главным компонентом углей, чутко реагирующим на действие геостатических и геодинамических факторов, создающих и изменяющих сверхвысокое напряженное состояние горного массива. Метод РЭМ позволяет изучать при различных увеличениях (от 10-20 до 80 тыс. раз) строение надмолекулярных агрегатов структуры углей как микромоделей всех следствий газодинамических явлений, происходящих в зерне витринита при его подготовке к изучению. РЭМ имеет существенные преимущества перед другими методами изучения полостного пространства ископаемых углей, так как позволяет наблюдать практически малоизмененный объект с последовательным переходом увеличений от небольших до нескольких десятков тысяч раз. Таким образом, с изменением масштаба наблюдений РЭМ выявляются разные типы надмолекулярных структур. Не всегда представления и показатели

одного иерархического уровня или метода исследований находят себе аналогов на других уровнях и в других методах.

Наиболее часто применяются геометрические модели пористых структурных систем (системы пор): параллельные пластинчатые слоистые, плотно упакованные сферы-глобулы, упакованные агрегаты, межслойные трещинно-диспергированного пространства и модели физических преобразований структуры: коллоидальные, гомогенные и квазигомогенные агрегированные и флокулированные, турбулентно-и ламинарно-микрослоистые. По функциональному соотношению и размерности частиц структуры могут быть однородными, разнородными, беспорядочными и ориентированными, матричными, изометричными и анизометричными.

По размерам и уровням наблюдений различают поры: молекулярные- менее 0,0006 мкм, недоступные для РЭМ; ультрамикropоры - 0,0006- 0,01 мкм, условно распознаваемые в РЭМ; мезомикropоры- 0,01-0,1 мкм; 0,1-1,0 мкм; 1,0-10,0 мкм; микropоры - более 10 мкм и макropоры чётко фиксируемые на РЭМ. С ростом увеличения раскрываются новые, не наблюдаемые при малых увеличениях, уровни пор различной размерности. Приняты глобулярно-губчатая (поровая) и щелевидная (трещинная) модели полостного пространства каменных углей.

По М. М. Дубинину размеры пор определяют характер развития сорбционных процессов. При соразмерности пор и молекул сорбата систему «сорбент-сорбат» можно считать однофазной. Адсорбционное поле занимает весь объём микropоры, т.е. происходит её объёмное заполнение. Эквивалентный радиус поры равен $2,5 d_{\text{пор}}$. Основное количество микropор находится в интервале эквивалентных радиусов от 0,5 до 1,51 – 6 нм.

В сравнительной геометрии пор - строения, расположении и их ориентации используется понятие эквивалентной поры, т.е. сферической поры, равной по объёму сложной поре. Фактор формы пор $K_{\text{ф}}$ витринитового угля на глубине 1000 м составляет по стадиям: 1Д-3Г - 1,0-0,7; 4Ж-8Т - 0,8-0,6; 9А-11А - 0,8-0,3. Изменение отношения $K_{\text{ф}}$ от 1 до 0,3 вызвано деформацией пор при метаморфизме. Морфометрические методы последовательных сечений показали, что число пор и их диаметры связаны уравнениями: $N_v = 0,636 (d^{-1}) N_a$ и $D_c = 1,5708 (d^{-1})^{-1}$, где N_v - число пор в единице объёма; d - диаметр случайного сечения пор; N_a - среднее число пор; D_c - средний диаметр пор.

Структура пористой среды (система пор) угля в обобщённом виде как корпускулярная система сложения-упаковки (агрегатная) фрагментарных или атритовых индивидов, или система вычитания-отделения газовой-жидкой фазы (ячеисто-губчатая) существенно различны. Различия наблюдаются в геологически нагруженном и разгруженном состояниях, в направлениях, параллельных наслоению и трещинам; в сложных системах ветвящихся, оперяющихся, выклинивающихся и других трещин. Характеристика угля как пористого агрегата частиц рассматривается не как сумма параметров частиц, а в целом как единый объект изучения.

Полостное пространство углей изменяется с метаморфизмом углей: 1Д - мелкие однородные, фрактальность слабая; 2Г-3Г- укрупняются, стабилизируются по строению, но разнообразны по расположению; 4Ж, 5К, 6ОС - сжатые удлинённые крупные, овальные, на сколах сглаженные, кавернозные поры; 7Т-8Т и 9ПА-10А - одиночные поры, удлинённые поры и поры по наслоению в зонах напряжения.

Полостное пространство углей [1, 3]. При неравномерном распределении во всем объеме угля микропоры образуют объемные структуры.

В неразгруженных от горного давления угольных пластах сорбционные и газодиффузионные свойства определяются структурой и распределением природных пор по размерам. Повышение давления с глубиной сжимает поры, более крупные интенсивнее сравнительно с мелкими, а объем наиболее мелких пор, близких к порам сорбента, практически не изменяется. Пористость угольного пласта с углями одной стадии на одинаковой глубине изменяется незначительно и постепенно в направлении тренда метаморфизма.

Полости в витрините. В зависимости от размеров, формы и строения внутреннего пространства полости пор в углях подразделяются на внутриагрегатные и межагрегатные; вычитания и сложения, поры сложной формы, и полости разрыва сплошности - межслоевые полости и полости трещин – щели. Размеры поперечников молекулярных и микропор по дифрактометрическим измерениям находятся в пределах от 70 до 390 мкм.

На стадиях 1Д-2Г-3Г-4Ж форма молекулярных пор и средних микропор может отождествляться с цилиндром; к коксующимся - поперечники пор резко возрастают, а на стадии 5К ($C = 88\%$) - уменьшаются. В углях низкой стадии метаморфизма поры имеют поперечники 360-400 мкм. Форма пор цилиндрическая. Происшедшая на стадии Ж-К ($C = 85 - 88\%$) структурная перестройка отразилась на увеличении плотности упаковки НМО и изменении форм и параметров молекулярных и микропор в углях 7Т - 8ПА ($C = 89 - 92\%$). В них форма угольных пор становится сферической, а объем молекулярных и микропор уменьшается. Сферические микропоры установлены нами методом РЭМ.

Угли высокой степени метаморфизма и антрациты имеют цилиндрическую форму пор. Поперечный размер пор, их протяжённость и объём уменьшаются. У антрацитов, близких к метаантрацитам, форма молекулярных пор - сферическая, размеры и объём которых возрастают [2].

Характеристика полостного пространства витринита углей Донбасса ранее приведена в ряде работ. По морфологии различаются сферовидные, веретенообразные, цилиндрические, простые и сложные щелевидные полости (пустоты). По условиям их образования выделяются структуры поровости: корпускулярные исходные, гранулярные, седиментационные, литогенетические, литодинамические и техногенные. Следовательно, угли – это монодисперсные сорбенты с узким распределением пор 40 – 50 мкм (диаметр молекул метана 3,8 – 4,16 Å).

При объемном сжатии угля природные поры, благодаря своей конфигурации, проявляют относительную устойчивость под воздействием внешних сил, а

природные трещины служат плоскостями ослабления угля, по которым происходит его разрушение при изменениях напряженного состояния угольного массива и давления газа.

Природные трещины и макропоры, составляющие значительно меньшую часть общего объема пористой структуры ископаемых углей, имеют протяженность, во много раз превышающую их зияние, и поэтому служат каналами диффузии и фильтрации метана по угольным пластам и из них. Общая пористость ископаемых углей малой степени метаморфизма (бурые, длиннопламенные, газовые и коксовые угли) уменьшается по мере увеличения их метаморфизма (до жирных углей), а затем при дальнейшем его росте вновь повышается, достигая максимума у слабометаморфизованных антрацитов. Природные макропористость и трещиноватость углей (в интервале поперечников пор $10^{-3} - 10^7$ мкм) также зависят от их метаморфизма и изменяются по параболе, имеющей максимум в области углей средней степени метаморфизма. Аналогичная зависимость характерна и для величины метаноносности углей.

Наблюдаемое уменьшение относительной деформации мелких пор по сравнению с более крупными объясняется меньшими радиусами их кривизны и увеличением давления заполняющего поры метана.

Макроскопически разрушение угля и трансформация его строения при действии нагрузок от 16 до 200 МПа выражено в микротрещинах и вновь образованных микроблоках.

Модели полостной структуры углей, устанавливаемой на РЭМ, разработаны с учётом формирования полостного пространства углей при нелинейном типе развертывания процесса углеобразования с палеоглубиной - дробление и закрытие пор при нагружении и образование послойно-открытой поровости при снятии нагрузки. Процессы с обострением в узкой области стабильного нарастания давления свойственны трансгрессивным циклам погружения формации. В условиях давлений ниже критической величины процесс идет без расчленения поры. В процессах с уменьшением глубины (регрессивных) с расширением площади давления размер пор увеличивается, и они расчленяются по наложению.

Результаты исследований полостной ёмкости, сорбции и диффузии методами метанонасыщения, в отличие от данных РЭМ раскрывают сорбционные свойства с учётом давления (глубины залегания) и генетического типа угля. На современных глубинах разработки угольных пластов (1000-1200 м) преобладающая часть метана (40-70 %) находится в сорбированном состоянии. Были проанализированы формы нахождения метана в углях методом метанонасыщения в лабораторных условиях. В результате проведенных различными исследователями определений сорбционной способности углей по метану установлена общая закономерность ее увеличения с возрастанием стадии метаморфизма углей [3].

Исследованные угли характеризуются разнообразными свойствами, обусловленными различным генетическим типом, т.е. не одинаковой восстановленностью, стадией регионального метаморфизма от длиннопламенных до антрацитов. Зависимость петрографического типа (состава) углей и сорбционной

метаноемкостью среднекаربоновых углей Юго-Западного Донбасса осталась неясной ввиду их однообразия, но связь сорбционной метаноемкости при $P = 50$ ат с генетическим типом определилась.

Для маловосстановленного угля характерны более высокие значения сорбционной метаноемкости, чем для восстановленного. Угли одинаковых стадий метаморфизма, одного петрографического состава, относящиеся к различным генетическим типам по восстановленности, характеризуются неодинаковой сорбционной метаноемкостью во всем изученном диапазоне марок. Наиболее четко различия в сорбционной способности по метану маловосстановленных и восстановленных углей проявляются при высоких давлениях. Анализ данных при давлениях, соответствующих термодинамическим условиям на глубине $\sim 650-700$ м, полученных в Центральной лаборатории ПО «Укруглегеология» (г. Донецк) для Юго-Западного Донбасса, позволяет прийти к выводу, что маловосстановленные угли в диапазоне от длиннопламенных до антрацитов характеризуются более высокой сорбционной метаноемкостью, чем восстановленные.

Результаты испытаний методом газонасыщения в лаборатории Укруглегеологии (А. А. Козлитин) показали, что маловосстановленные угли от длиннопламенных до антрацитов на глубинах от 200 до более 1000 м имеют повышенную метаноемкость по сравнению с восстановленными и характеризуются более существенным нарастанием метаноносности с глубиной залегания. Повышенная сорбционная метаноемкость маловосстановленных углей наиболее четко проявляется при высоких давлениях на больших глубинах. С глубиной влияние степени восстановленности углей на их сорбционную метаноемкость может проявляться более четко. Метаноносность маловосстановленных углей одной марки выше, чем восстановленных на $5-10$ м³/т с.г.м.; маловосстановленные угли характеризуются повышенной скоростью метаноотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюков В. В. Электронно-микроскопические исследования витринита донецких углей с целью прогноза внезапных выбросов угля и газа / В. В. Кирюков, А. М. Брижанев, Н. П. Очкур. – Уголь. – 1994. – № 5. – С. 44 – 47.
2. Малышев Ю. Н. Фундаментальные прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю. Н. Малышев, К. Н. Трубецкой, А. Т. Айруни. – М. : Изд. Академии горных наук. – 2000. – 519 с.
3. Надмолекулярно-поровая структура и сорбционная способность углей в комплексе геологических и термодинамических факторов прогноза и оценки метаноносности угольных пластов Юго-Западного Донбасса / В. В. Кирюков, О. А. Куш, В. Н. Новикова, Л. А. Новгородцева. – Науч. тр. УкрНИМИ. – 2009. – Горн. геология. Геомеханика и маркшейдерия. II Межд. тех. конф. 80 лет УкрНИМИ. – Т. 2. – С. 274 – 281.