

С.А. Радченко

***СОРБЦИОННЫЕ И ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА УГЛЯ И УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД,
ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОГНОЗА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ***

Целью выполненного автором во время обучения в аспирантуре и докторантуре ИПКОН РАН и научной стажировки в Лидском университете Великобритании комплекса высокоточных экспериментальных исследований газотеплообмена для систем «ископаемый уголь – газ» и «углесодержащие породы – газ» обработки по новой методике [1-5] данных многочисленных экспериментов ряда ученых России, Украины, Великобритании и США является научное обоснование и разработка новых способов и устройств для повышения безопасности и эффективности комплексного освоения угле-метановых месторождений без больших затрат средств и труда и изменений технологии работ за счет обеспечения:

1 - количественной экспресс-оценки в забоях газокинетических свойств призабойной зоны пласта, отбитого угля, бурового штыва и углесодержащих пород, их нарушенности и газоносности методами, позволяющими уменьшить проникновение бурового инструмента в выбросоопасную зону;

2 - повышения оперативности, информативности и практической ценности шахтных и лабораторных исследований угля и горных пород, содержащих частицы угля.

Н. Г. Матвиенко [6] показал на основе анализа геологического строения месторождений, при разработке которых отмечены устойчивые проявления углеводородных газов, что:

- в составе вмещающих горных пород большинства из них есть содержащие уголь отложения от мощных угольных пластов до микровкраплений;

- сорбционная способность горных пород изучена недостаточно в связи со сложностью и изменчивостью состава горных пород.

Преобразование органических материалов в породах происходит по направлениям, сходным с метаморфизмом углемате-

ринских веществ, а газоемкость пород при прочих равных условиях увеличивается с ростом содержания в них органики [7]. Однако нет единой точки зрения по вопросу о возможности достаточно точного определения сорбционной метаноемкости вмещающих горных пород по величине сорбционной емкости угля в разрабатываемом угольном пласте и доле углистых частиц в прилегающих к пласту горных породах. Поэтому уточнение этого вопроса имеет важное значение.

В связи с тем, что на степень углефикации органических остатков в горных породах и их сорбционную емкость могут оказывать влияние история возникновения данного месторождения, глубина залегания горных пород и их температура, горно-геологические условия и многие другие факторы, при получении расчетных формул необходимо использовать образцы горных пород, образованные в практически аналогичных условиях. Для получения надежных зависимостей необходимо использовать достаточно большое количество экспериментальных данных и исследовать максимально возможный диапазон изменения зольности в горных породах при различных давлениях и температурах. Причем места отбора образцов для исследования должны быть сравнительно недалеко друг от друга в близких горно-геологических условиях для устранения влияния различных случайных факторов.

Поэтому автор использовал [4-5] для получения таких зависимостей экспериментальные данные, полученные при разных давлениях и температурах Дж. Р. Баркер-Ридом [8] и П. Е. Грифффином [9] для образцов угля и вмещающих горных пород, отобранных при разработке выбросоопасного угольного пласта Big Vein на шахте «Synheidre», Южный Уэльс, Великобритания, который состоит из антрацита с выходом летучих веществ $V^T = 5,1 \%$. Почвой пласта является типичная огнеупорная глина, а от кровли из пылеватого аргиллита пласт отделен прослойком углистого глинистого сланца.

На рис. 1 и рис. 2 приведены результаты обобщения экспериментальных данных Дж. Р. Баркер-Рида [8] о сорбционной емкости 112 образцов угля и вмещающих горных пород различной зольности, отобранных при разработке угольного пласта Big Vein, при равновесных давлениях 0,1, 0,5, 1,0, 2,0 и 4,0 МПа при постоянной температуре 25°C, поскольку хорошо известно, что сорбционная емкость зависит от давления газа [5].

Уравнения для вычисления сорбционной емкости образцов

горных пород, содержащих органические остатки

Равновесное давление газа, МПа	Температура, °С	Регрессивное уравнение для вычисления сорбционной емкости горной породы, мл/г, по ее зольности A_3 , %	Коэффициент линейной корреляции r	Кол-во точек
0,1	25	$a_0 = 5,22 - 0,05 A_3$	0,992	112
0,1	36	$a_0 = 5,06 - 0,05 A_3$	0,963	41
0,5	25	$a_0 = 16,33 - 0,16 A_3$	0,996	112
0,5	36	$a_0 = 15,85 - 0,15 A_3$	0,966	41
1,0	25	$a_0 = 22,27 - 0,22 A_3$	0,997	112
1,0	36	$a_0 = 21,66 - 0,21 A_3$	0,961	41
1,5	36	$a_0 = 24,97 - 0,24 A_3$	0,962	41
2,0	25	$a_0 = 27,23 - 0,27 A_3$	0,996	112
2,0	36	$a_0 = 26,48 - 0,26 A_3$	0,949	41
4,0	25	$a_0 = 30,58 - 0,30 A_3$	0,998	112
4,0	36	$a_0 = 29,77 - 0,29 A_3$	0,929	41

Рис. 1, 2 и таблица, полученные по экспериментальным данным Дж. Р. Баркер-Рида [8] и П. Е. Гриффина [9], доказывают, что для угольного пласта Big Vein при всех давлениях взаимосвязь является линейной и ее можно описать регрессионными уравнениями с высокими коэффициентами корреляции.

В соответствии с принятыми в Великобритании и других зарубежных странах теоретическими представлениями все показанные рис. 1-3 экспериментальные данные для 153 образцов угля пласта Big Vein и прилегающих к нему углесодержащих горных пород при разных давлениях и температурах были описаны единым уравнением [5], имеющим вид:

$$a_0 = [(AbP)/(1 + bP)] \times (1 - 0,01 A_3), \quad (1)$$

где a_0 - сорбционная метаноёмкость, мл/г; A - константа адсорбции Лэнгмюра, максимальная сорбционная емкость образца при преобладающей температуре, мл/г; b - константа адсорбции Лэнгмюра, называемая коэффициентом адсорбции, характеризующая силу связи между адсорбентом и адсорбентом при преобладающей температуре, МПа^{-1} ; P - давление газа, МПа; A_3 - зольность образца, %. Изменение температуры при использовании формулы (1) учитывается выбором соответствующих величин констант Лэнгмюра.

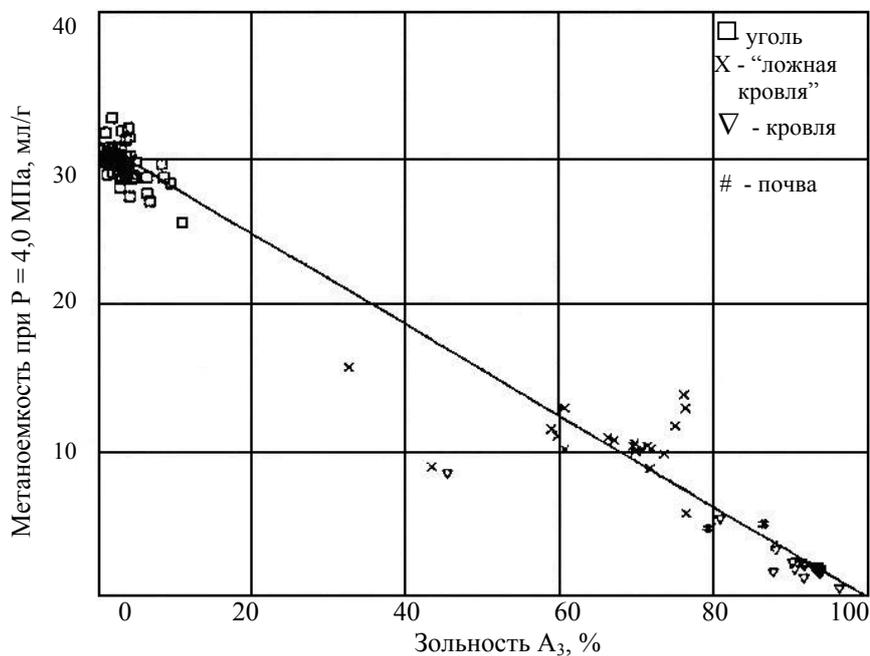


Рис. 1. Влияние зольности на сорбционную метаноемкость образцов угля и горных пород с угольными включениями из пласта *Big Vein* шахты «*Sunheidge*», Южный Уэльс, Великобритания, при давлении 4,0 МПа и температуре 25°С (для обработки использованы эксперименты Дж. Р. Баркер-Рида для 112 образцов)

Проверка возможности применения полученных экспериментально зависимостей для угольных пластов разных стадий метаморфизма выполнена автором на основе экспериментальных данных о сорбционной емкости ненарушенных углей и вмещающих горных пород, полученных Дж. Р. Баркер-Ридом [8] и П. Е. Гриффином [9] с интервалом в 6 лет при разработке различных угольных пластов Южно-Уэльского угольного бассейна Великобритании, имевших выход летучих веществ V^I от 5,1 % до 27,5 %.

В связи с тем, что некоторые экспериментальные данные, приведенные П. Е. Гриффином [9], получены при давлениях, немного отличающихся от давлений, при которых достигалось сорбционное равновесие в аналогичных сорбционных экспериментах Дж. Р. Баркер-Рида [8], для обеспечения возможности корректного их сравнения в необходимых случаях вычислялась

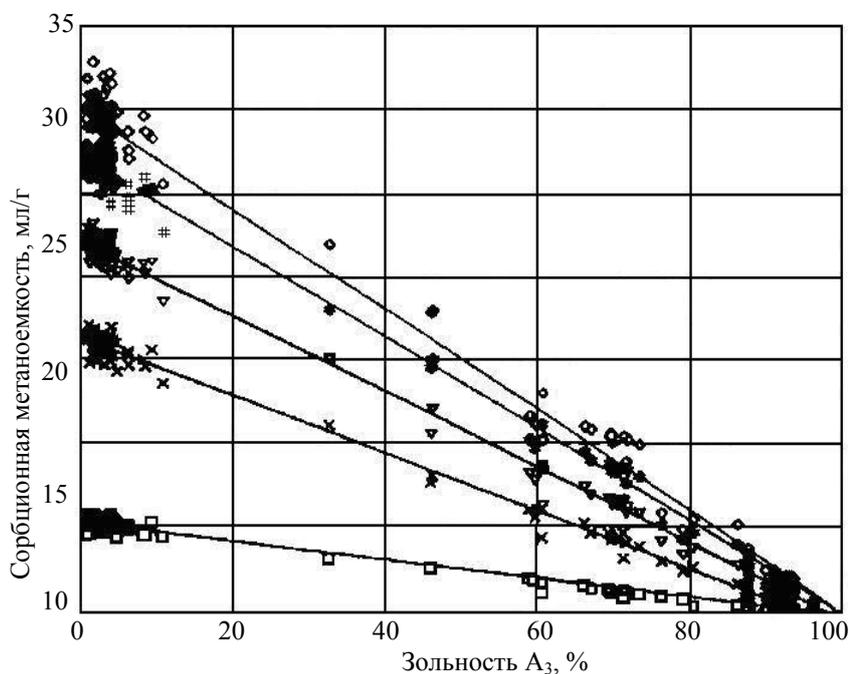


Рис. 2. Влияние зольности на сорбционную метаноемкость образцов угля и горных пород из пласта *Big Vein* при температуре 25°С при давлении: □ – 0,1 МПа; × – 0,5 МПа; ▼ – 1,0 МПа; # – 2,0 МПа; ◇ – 4,0 МПа (для обработки использованы эксперименты Дж. Р. Баркер-Рида для 112 образцов)

сорбционная емкость углей и вмещающих пород при давлениях, использовавшихся Дж. Р. Баркер-Ридом. Полученные автором при этом результаты показаны на рис. 3 и опубликованы [4-5].

Рис. 3 доказывает, что различные линейные зависимости между сорбционной емкостью угля и вмещающих горных пород при давлении 4,0 МПа и их зольностью можно получить для каждой шахты. Линейные зависимости получены и при использовании для построения графиков данных о сорбционной емкости образцов, имеющих разную зольность, при других давлениях.

Рис. 3 показывает, что сорбционная метаноемкость образцов с одинаковым выходом летучих веществ близка несмотря

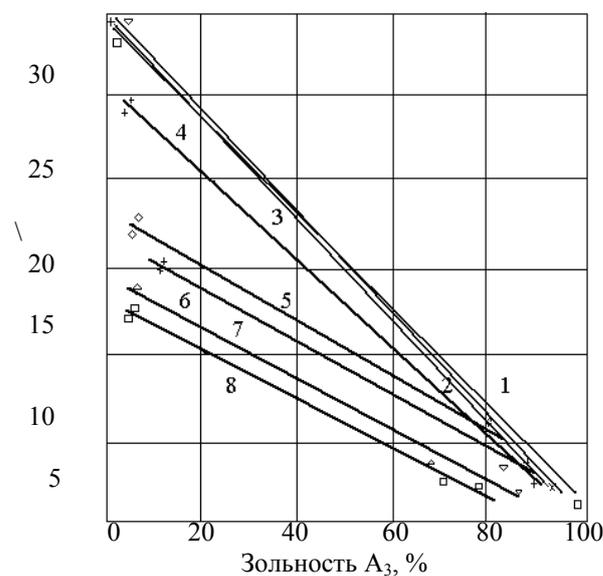


Рис. 3. Влияние зольности на сорбционную метаноемкость образцов угля и горных пород из пластов шахт Южно-Уэльского угольного месторождения Великобритании при температуре 25⁰С: 1, □ - «Cynheidre»; 2, × - «Cynheidre»; 3, ▽ - «Cwmgwili»; 4, + - «Blaengwrach»; 5, ◇ - «Coed-Ely»; 6, + - «Celynen North»; 7, Δ - «Marine»; 8, □ - «Six Bells» (для обработки использованы экспериментальные данные Дж. Р. Баркер-Рида и П. Е. Гриффина)

на то, что две серии образцов были отобраны в разных местах каждой из 7 шахт Южного Уэльса (1, 2 – для шахты «Cynheidre», 3 – для шахты «Cwmgwili», $V^Г = 6,6\%$, 4 – для шахты «Blaengwrach», $V^Г = 9,8\%$, 5 – для шахты «Coed-Ely», $V^Г = 20,2\%$, 6 – для шахты «Celynen North», $V^Г = 21,5\%$, 7 – для шахты «Marine», $V^Г = 21,6\%$, 8 – для шахты «Six Bells», $V^Г = 27,5\%$) и исследованы Дж. Р. Баркер-Ридом [8] и П. Е. Гриффином [9] с интервалом 6 лет. Это доказывает, что установленные для каждой из 7 перечисленных шахт Великобритании зависимости достаточно стабильны и могут использоваться на любой шахте длительное время.

На рис. 3 линии 1 и 2 почти совпадают и имеют практически одинаковый угол наклона. Это доказывает достаточную точность экспериментов, а также что время отбора образцов для исследова-

ния и место отбора не имеют существенного значения, если они проводятся в пределах одной шахты.

Рис. 3 также доказывает, что угол наклона полученных для этих 7 шахт линий зависимости сорбционной метаноемкости угля и вмещающих пород от их зольности определяется, прежде всего, выходом летучих веществ, то есть стадией метаморфизма [4-5]. Это подтверждает распространенное в Великобритании мнение, что при увеличении выхода летучих веществ сорбционная емкость уменьшается, так как она определяется количеством связанного углерода в угле или вмещающих горных породах.

Анализ влияния глубины разработки на сорбционную метаноемкость и этаноемкость угля из разных угольных пластов Великобритании (рис. 4) автор выполнил на основе данных Д. П. Криди [10] и Ф. В. Притчарда [11].

Рис. 4 позволяет сделать для углей Великобритании такие выводы:

1 - какой-либо зависимости сорбционной метаноемкости от глубины разработки не наблюдается, а полученные экспериментально ее значения на одной глубине различаются во много раз;

2 - наблюдается слабое увеличение сорбционной этаноемкости с увеличением глубины разработки, некоторые полученные экспериментально ее значения на одной глубине различаются в несколько раз;

3 - столь значительный разброс величин сорбционной метаноемкости и этаноемкости образцов можно объяснить как особенностями микропористой структуры угольных пластов, так и влиянием зольности;

4 - несмотря на большой разброс величин сорбционной метаноемкости и этаноемкости образцов угля из разных угольных пластов Великобритании, все они десорбируют за время τ похожие доли газов от равновесных величин;

5 - уменьшить показанный на рис. 4 разброс величин сорбционной емкости углей можно, используя установленные зависимости ее от зольности.

Таким образом, исследования автора доказали [4-5], что рассеянное угольное вещество во вмещающих породах обладает свойствами концентрированного угольного вещества.

Данными исследованиями доказана возможность использовать для определения сорбционной метаноемкости угля и

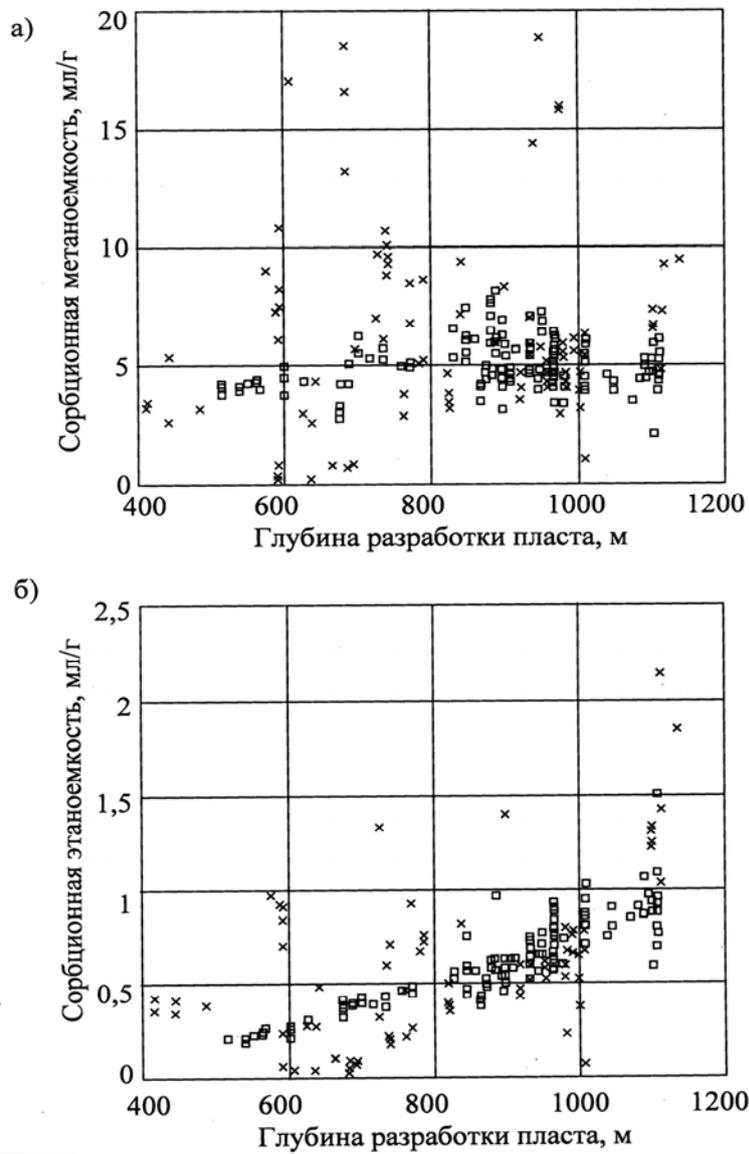


Рис. 4. Результаты обобщения экспериментальных данных о сорбционной метаноемкости (а) и этаноемкости (б) образцов угля из различных угольных пластов Великобритании, разрабатываемых на разных глубинах: \square - данные Д. П. Криди; \times - данные Ф. В. Притчарда

вмещающих горных пород наиболее простые линейные уравнения, что позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с применяемыми в настоящее время в различных странах методами косвенной оценки газоносности. В частности, доказана возможность определять сорбционную емкость образцов угля и вмещающих горных пород для угольных пластов разных стадий метаморфизма, зная содержание в них частиц угля и линейную зависимость сорбционной емкости от зольности. Это позволяет повысить точность определения газоносности угля и вмещающих пород на каждом горнодобывающем предприятии.

Для изучения диапазона возможного изменения величин диффузионного параметра τ , преимущества и методика определения которого описаны в [1-5], и доли газа, десорбированной за время τ , автор обработал по этой методике многочисленные экспериментальные данные ученых Великобритании, полученные для образцов угля и углесодержащих вмещающих горных пород фракции 0,05-0,30 мм из различных угольных пластов Великобритании и имевшие величины константы десорбции Айрея $n \leq 0,5$, в том числе для:

1) 130 образцов угля с выходом летучих веществ $V^{\Gamma} = 5,1 \%$, 24 образца углистого сланца и 19 образцов других горных пород, отобранных при разработке пласта Big Vein на шахте «Cynheidre» [8];

2) 99 образцов угля с выходом летучих веществ $V^{\Gamma} = 5,1 \%$ из этого же пласта Big Vein на шахте «Cynheidre» [12];

3) 20 образцов угля с выходом летучих веществ $V^{\Gamma} = 4,9 \%$ из пласта Pumpquart на шахте «Cynheidre» [8];

4) 12 образцов угля с выходом летучих веществ $V^{\Gamma} = 4,9 \%$ из этого же пласта Pumpquart на шахте «Cynheidre» [12];

5) 23 образца угля с выходом летучих веществ $V^{\Gamma} = 5,1-27,5 \%$, а также углистого сланца и других горных пород из угольных пластов Южно-Уэльс-кого угольного бассейна Великобритании, аналогичных пласту Big Vein [8].

Кроме того, аналогично были обработаны эксперименты, для образцов фракции 25,74-53,3 мкм [13], причем образцы целого угля имели выход летучих веществ $V^{\Gamma} = 29,3-36,3 \%$, а образцы фюзинита – $V^{\Gamma} = 10,8 \%$.

Результаты этих расчетов приведены на рис. 5, показывающем зависимость доли метана, десорбированной за время τ , от величины константы десорбции Айрея n [14]. Автор показал, что рис. 5 можно разделить на 3 зоны.

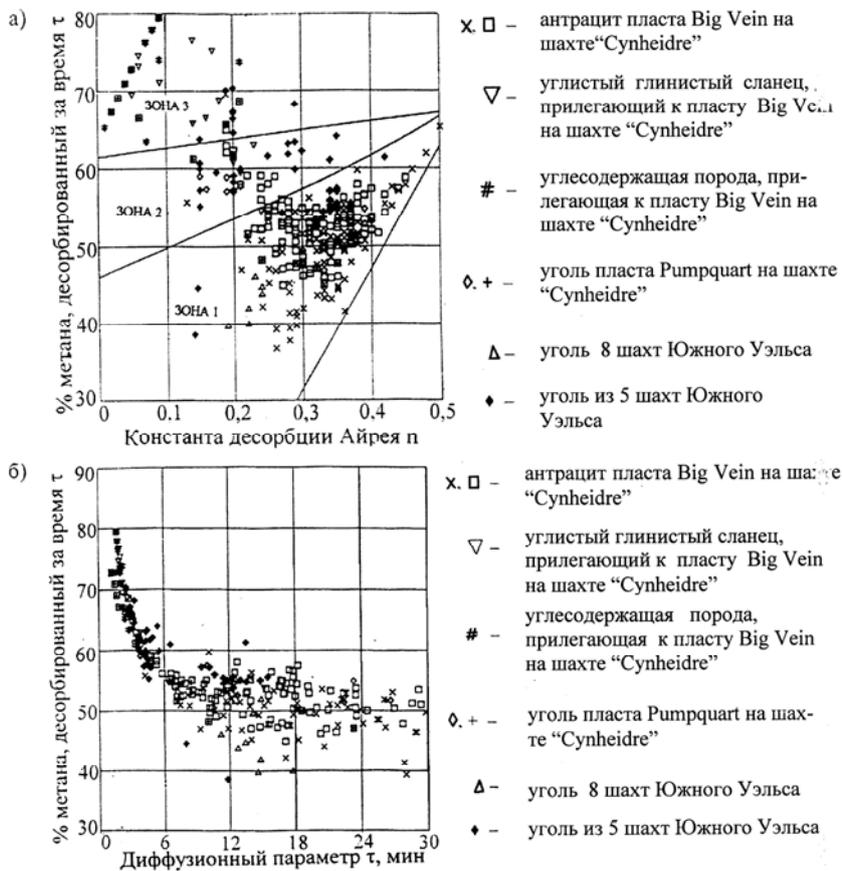


Рис. 5. Взаимосвязь между долей метана, десорбированной за время τ , величиной константы десорбции Айрея p и величиной τ , установленная при обработке данных экспериментов Дж. Р. Баркер-Рида, К. Миддлетона и А. Гринта для 327 образцов угля и углесодержащих пород с 9 шахт Южного Уэльса, Великобритания

Доли метана, десорбированного за время τ образцами угля фракции 0,05-0,30 мм из ненарушенных зон, независимо от стадии их метаморфизма являются наименьшими и попадают в зону 1. Данные для образцов из зон геологических нарушений, выброшенной во время внезапных выбросов массы, большинство исследованных в [13] образцов угля фракции 25,74-53,3 мкм и образцов углистого сланца, имеющих наиболее высокое содержание частиц

угля, попали в зону 2, а зона 3 содержит данные для образцов с самой высокой долей десорбированного метана за время τ , то есть для образцов вмещающих горных пород и углистого сланца, содержащих мало частиц угля.

Рис. 5 доказывает наличие одинаковой взаимосвязи доли десорбированного за время τ метана и размера микропористых частиц угля, входящих в состав любых образцов угля и вмещающих горных пород. Это можно использовать при выполнении различных расчетов для повышения информативности результатов исследований кинетики десорбции газов из ископаемых углей и углесодержащих горных пород.

Таким образом, обработка автором сорбционно-кинетических экспериментов для углей и углесодержащих горных пород России, Украины и Великобритании показала близость их газокинетических свойств [1-5, 15].

Например, в [15] приведены следующие данные для шахты “Таймырская”, полученные по результатам Н. Г. Матвиенко [6]: уголь с выходом летучих веществ $V^r = 22,3 \%$ и зольностью $18,75 \%$ сорбировал при температуре 20°C и давлении $2,0 \text{ МПа}$ $15,6 \text{ м}^3/\text{т}$ метана и имел $\tau = 12,4$ минуты, два образца песчаника из почвы пласта зольностью 80% и 94% сорбировали при данных условиях соответственно $3,1$ и $1,0 \text{ м}^3/\text{т}$ метана и имели $\tau = 1,96$ минуты и $\tau = 1,5$ минуты, а аргиллит из кровли пласта зольностью 82% сорбировал $3,4 \text{ м}^3/\text{т}$ метана и имел $\tau = 3,1$ минуты. Как и ожидалось, и для шахт и рудников России величины диффузионного параметра τ уменьшаются при увеличении зольности угля и углесодержащих горных пород. При анализе этих экспериментальных результатов было сделано предположение [15], что небольшие величины диффузионного параметра τ для высокзолных образцов углесодержащих горных пород из почвы и кровли пласта могут быть объяснены, в основном, более высокой газопроницаемостью минеральной части исследованных образцов.

Таким образом, данное исследование доказало наличие единой взаимосвязи между свойствами угля и содержащих угольные частицы вмещающих горных пород, что позволяет получать больше информации о десорбционно-кинетических характеристиках образцов и эффективнее ее использовать для улучшения прогноза метановыделения из угля и углесодержащих пород и повышения безопасности работ в шахтах.

1. Радченко С.А. Необходимость комплексной оценки опасности внезапных выбросов и взрывов метана в угольных шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 2007. - № 11. – С. 67-70.
2. Радченко С.А. Новые способы и устройства для экспресс-оценки газокинетических свойств призабойной зоны угольного пласта по температуре угля и газовыделению из него: Монография. – Тула: ООО «Промпилот», 2008. – 396 с.
3. Эттингер И.Л., Радченко С.А. Время релаксации как характеристика метано-переноса в углях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1988. - № 4. – С. 97-101.
4. Barker-Read G.R., Radchenko S.A. The relationship between pore structure of coal and gas-dynamic behaviour of coal seams. – Mining Science and Technology, 1989, № 8, p. 109-131.
5. Barker-Read G.R., Radchenko S.A. Methane emission from coal and associated strata samples. - International Journal of Mining and Geological Engineering, 1989, № 7, p. 101-121.
6. Матвиенко Н.Г. Выделение природных газов при освоении рудных месторождений. – М.: Наука, 1988. – 230 с.
7. Зимаков Б.М., Зильберштейн М.И., Флегонтов А.К. Особенности и механизм формирования газоносности антрацитовых месторождений Донбасса // Геологическое строение и разведка полезных ископаемых Ростовской области. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т, 1979. – С. 23-32.
8. Barker-Read G.R. A study of the gas dynamic behaviour of coal measure strata with particular reference to West Wales outburst prone seams. - Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, UK, 1984.
9. Griffin P.E. Methane sorption studies with particular reference to the outburst prone anthracites of West Wales. - M.Sc. Thesis, University of Wales, Cardiff, UK, 1978.
10. Creedy D.P. A study of variations in the gas content of coal seams in relation to petrographic and stratigraphic variations. - M. Sc. Thesis, University of Wales, Cardiff, 1979.
11. Pritchard F.W.P. Some measurements of coal seam gas content from surface boreholes. – NCB, 1978, MRDE Internal Report No. 78/19. – 28 pp.
12. Middleton K. Factors affecting gas-dynamic behaviour in seams liable to outbursts. - Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, UK, 1986.
13. Grint A. Some observations on the gaseous hydrocarbons in some British coal seams. - Ph.D. Thesis, University of Manchester, UK, 1977.
14. Airey E.M. Gas emission from broken coal. An experimental and theoretical investigation // International Journal of Rock Methanics and Mining Science. – 1968. - Vol. 5. - No. 6. - P. 475-494.
15. Матвиенко Н.Г., Радченко С.А. Использование сорбционно-кинетического показателя для оценки скорости газоотдачи углесодержащих пород // Сб.: Газопыле-электробезопасность горных работ. – М.: ИПКОН АН СССР, 1990. - С. 60-68. **ТАБ**

Коротко об авторе

Радченко С.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры машиноведения и безопасности жизнедеятельности Тульского государственного педагогического университета им. Л. Н. Толстого, Тула.