



II РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.81.75.004

УДК 622.831.322

© В.В. Дырдин, Ю.И. Польшгалов, В.С. Лудзиш, С.А. Шепелева, А.Н. Терехов,
П.В. Потапов, А.А. Фофанов, Т.Л. Ким, 2021



В.В. ДЫРДИН

д-р техн. наук, проф.,
профессор кафедры
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: vvd1941@mail.ru



С.А. ШЕПЕЛЕВА

канд. техн. наук,
доцент кафедры
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: shepelevasa@kuzstu.ru



Ю.И. ПОЛЫГАЛОВ

д-р физ.-мат. наук, проф.,
профессор кафедры
КузГТУ, г. Кемерово



А.Н. ТЕРЕХОВ

главный инженер
Шахта «Чертинская-Коксовая»
ООО «ММК-УГОЛЬ», г. Белово
e-mail: terehov.an@mmk-coal.ru



В.С. ЛУДЗИШ

д-р техн. наук, проф.,
научный консультант
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово



П.В. ПОТАПОВ

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово,
e-mail: potapov1953@list.ru

А.А. ФОФАНОВ

старший преподаватель,
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: thunder55@mail.ru



Т.Л. КИМ

канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой физики
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: tanyakim@list.ru



К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ «ЗАКРЫТЫХ» ПОР В КАМЕННОМ УГЛЕ

В статье описан возможный механизм образования «закрытых» пор в каменном угле. Рассмотрена физическая модель взаимодействия молекул метана с функциональными группами угольного вещества, на основании которой рассчитан объем «свободного» газа. Приводятся результаты расчета скорости и объема метана, который фильтруется в скважину барьерной дегазации за счёт градиента газового давления. Проведено сравнение результатов расчёта с данными барьерной дегазации проходческого забоя в вентиляционном штреке 557 шахты «Чертинская – Коксовая» в Кузбассе.

Ключевые слова: МЕТАН, КАМЕННЫЙ УГОЛЬ, УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, БАРЬЕРНАЯ ДЕГАЗАЦИЯ.

Практика разработки угольных пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, показывает, что внезапные выбросы чаще всего происходят в угольных пластах, содержащих пачку разрушенного угля землисто-зернистой структуры, мощность которой достигает определенных размеров. При этом основными факторами, способствующими формированию выбросоопасной ситуации, являются: достаточно быстрое перераспределение напряжений, вызванное воздействием внешних факторов и приводящее к разрушению угля в краевой зоне, высокая скорость выделения метана и его необходимое количество, способное перемещать разрушенный уголь по выработке на определенное расстояние.

Объем выброшенного метана, зафиксированный при выбросах [1], значительно пре-

вышает суммарный объем свободного газа и адсорбированного на поверхности поровой структуры угля, определяющих природную газоносность пласта. В этой связи в ряде статей [2, 3, 4, 5] рассматриваются различные механизмы возникновения при выбросах дополнительных объемов газа. Не вызывает сомнения то, что в определенных условиях те или другие механизмы действительно могут проявиться: выделение метана, растворенного в твердом веществе угля, разложение газовых гидратов, которые формируются в угольных пластах при определенных термобарических условиях, близких к соответствующим параметрам залегания угольных пластов, а также химические реакции, происходящие при разрушении угля, в результате которых возможно отщепление метильных групп CH_3 , CH_2 и

других, взаимодействие которых с водородом из бахромы макромолекулы при определенной температуре приводит к выделению дополнительных объемов метана и других угольных газов [6, 7].

В работе [6] представлены результаты экспериментальных исследований, включающих отбор пробы угля в массиве с глубины 2,0 – 3,0 м, помещение ее в герметичную колбу с манометром и краном, доставку в лабораторию, измерение давления газа через 3–4 часа и выпуск газа в атмосферу после определения его состава на хроматографе. В результате из пробы угля удалялся весь свободный и большая часть адсорбированного газа. После чего проба угля подвергалась разрушению в колбе в несколько циклов с промежуточным контролем объема и состава выделившегося газа. Разрушение образцов угля сопровождалось выделением значительного количества смеси метана и других угольных газов (рис. 1).

Поскольку в экспериментах контролиро-

валась температура, то можно предположить, что большая часть дополнительного объема газа поступила из пористой структуры угля.

Твердотельная диффузия метана из закрытых пор в кристаллической структуре угля характеризуется малой величиной коэффициента диффузии [8], а кроме того, в каменных углях средней стадии метаморфизма, в большей мере подверженных выбросам, имеется только фрагментарно упорядоченная кристаллическая структура, окруженная бахромой. В этой связи твердотельную диффузию как источник поступления дополнительного объема газа при выбросах вряд ли стоит рассматривать. В ряде работ [9, 10] отмечается, что дополнительный объем метана может поступать из «закрытых пор». В то же время не приводятся механизмы их образования и местоположение в макромолекуле угля.

В данной статье рассматривается одна из возможных схем образования «закрытых» пор в структуре каменных углей.

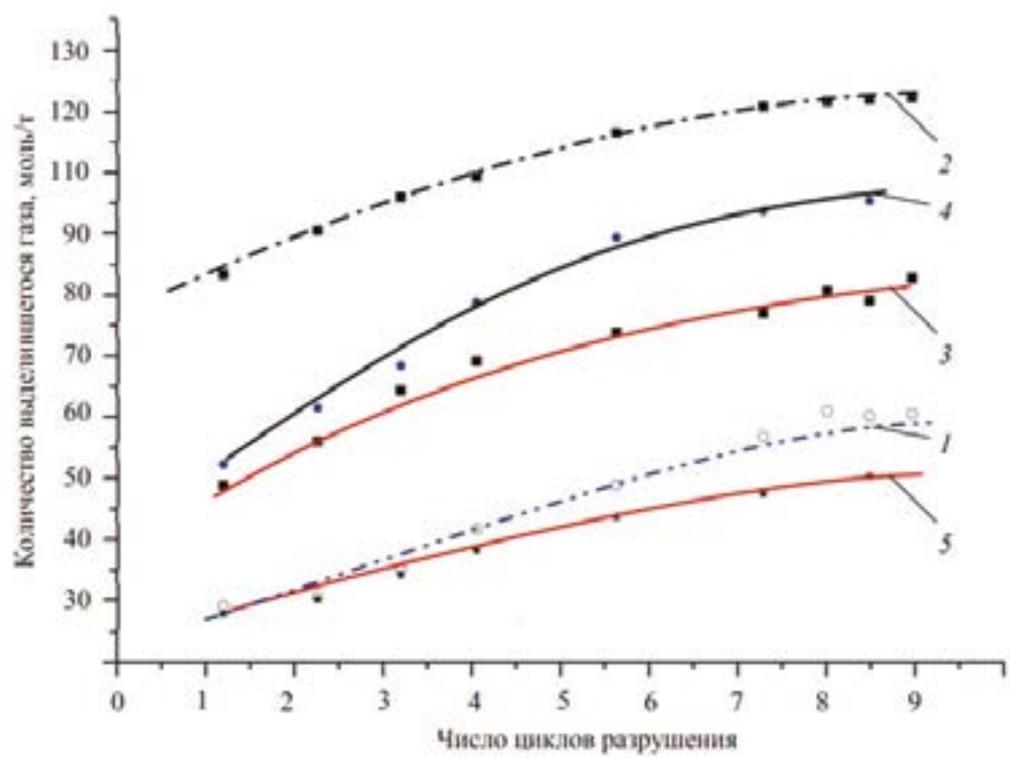


Рис. 1. Зависимость выделившегося метана от числа циклов дробления [1]

1 — пласт 10 шахты «Распадская», г. Междуреченск; 2 — пласт 7-7а шахты «Распадская», г. Междуреченск; 3 — пласт XXIV шахты «Первомайская», г. Березовский; 4 — пласт Толмачевский шахты «Комсомолец», г. Ленинск-Кузнецкий; 5 — пласт Поленовский шахты «Кирова», г. Ленинск-Кузнецкий

Исследования пористой структуры Кузбасских углей показали [11, 12], что удельный объем микропор в углях марки Д составляет порядка 88,9 % от общего объема пор, а в углях марки Г — 80,5 %. Необходимо отметить, что эта тенденция сохраняется и в углях марок СС (93,8 %) и Т (91,8 %). В то же время угли марки Д имеют наибольшую удельную поровую поверхность в диапазоне от 35 до 1220 м²/г, а в углях марки Т она составляет только 15–260 м²/г.

Следовательно, можно предположить, что значительная часть природного метана содер-

жится в микропоровой структуре каменного угля, диаметр пор которой составляет порядка 20·10⁻¹⁰ м. В этой связи рассмотрим физическую картину образования «закрытых» пор на основе взаимодействия молекул метана, находящихся в поре, с молекулами углерода и функциональными группами СООН, находящимися в бахроме макромолекулы угля. На рис. 2 представлена модель микропоры, граничащей, естественно, с макро- или переходной порой. При этом скважина ограждающей дегазации может быть расположена со стороны микропоры или со стороны макропоры.

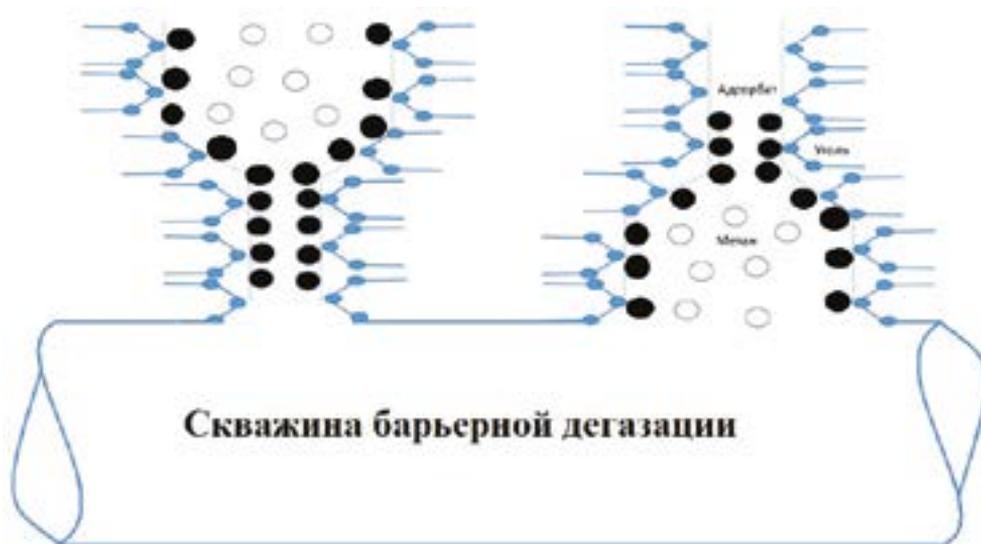


Рис. 2. Модель микропористой структуры угля, граничащей со скважиной барьерной дегазации

Для расчета потенциальной энергии и силы взаимодействия молекул метана с углем используем модель, представленную в [13]. Тогда потенциальная энергия взаимодействия U может быть рассчитана по формуле:

$$U = -\frac{\pi}{6} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} d_B^2 \alpha_A + \frac{3}{2} \alpha_A \alpha_B \frac{I_A I_B}{I_A + I_B} \right) \cdot n_A \frac{\theta_A}{(\alpha_B + Z)^3} \left(1 - \frac{Z}{2\rho} \right)^{-3},$$

где d_B — дипольный момент молекулы адсорбата B , α_A , α_B — поляризуемости молекул A адсорбента и B — адсорбата, I_A , I_B — потенциалы ионизации молекул A и B , ρ — радиус кривизны поверхности адсорбента, Z — расстояние геометрического центра молекулы

адсорбата до поверхности адсорбента, n_A — концентрация молекул адсорбента, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\theta_A = \left[1 - \left(\frac{r_A}{2\rho} \right)^2 \right]^{-2}$ учитывает протяженность молекулы адсорбента в направлении нормали к поверхности, α_B — Ван-дер-Ваальсовский радиус молекулы адсорбата, r_A — радиус молекулы адсорбента.

Сила притяжения молекулы адсорбата к адсорбенту вычислялась по формуле

$$F_Z = -\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\pi}{6} \left(\frac{d_A^2 \alpha_B}{4\pi\epsilon_0} + \frac{3}{2} \alpha_A \alpha_B \frac{I_A I_B}{I_A + I_B} \right) \cdot n_A \left\{ \left[\frac{XX}{(Z + \alpha_B)^3} - \frac{3\theta}{(Z + \alpha_B)^4} \right] \left(1 - \frac{Z}{2\rho} \right)^{-3} + ZZ \cdot YY \right\},$$

$$\text{где } XX = -4 \left[1 - \left(\frac{r_A}{2\rho} \right)^2 \right]^{-3} \frac{r_A^2}{(Z + \alpha_B)^3},$$

$$YY = \frac{3}{2\rho} \left(1 - \frac{Z}{2\rho} \right)^{-4}, \quad ZZ = \frac{\theta}{(Z + \alpha_B)^3}.$$

В табл. 1 приведены необходимые пара-

метры молекул для расчета U и F_z . При этом использовались либо справочные данные [14, 15], либо аддитивные схемы. Расчеты проводились при концентрации атомов углерода (адсорбент) $n_C = 0,534 \cdot 10^{29}$ (1/м³) и молекул метана (адсорбат) $n_{CH_4} = 0,0024 \cdot 10^{29}$ (1/м³).

Таблица 1

Справочные данные для расчета

Потенциал ионизации, $\cdot 10^{-19}$ Дж			Поляризуемость, в 10^{-30} м ³		
CH ₄	COOH	C	CH ₄	COOH	C
20,34	16,59	18,00	2,6	2,64	1,76
Дипольные моменты молекул адсорбата, 10^{-30} Кл·м			Радиус молекулы, 10^{-10} м		
CH ₄	COOH		CH ₄		C
0	4,97		2,22		1,8

Результаты расчетов представлены на рис. 3, 4 и в табл. 2 и 3.

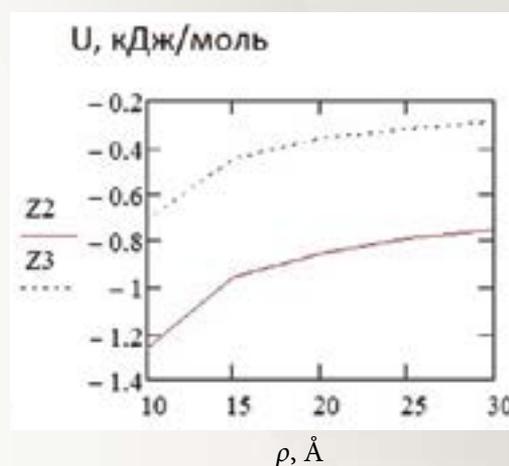
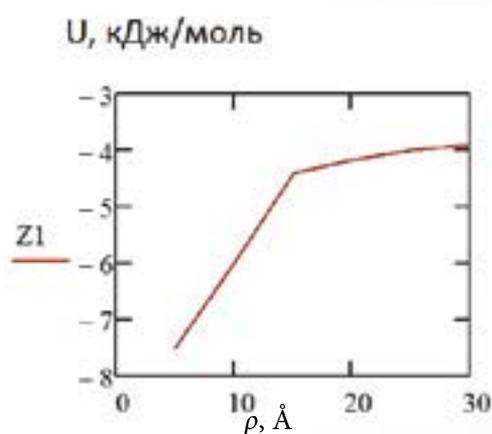


Рис. 3. Зависимость энергии взаимодействия U молекулы метана с молекулой углерода в структуре угля от радиуса микропоры ρ ; $Z_1 = 2,22$ Å; $Z_2 = 4,44$ Å; $Z_3 = 6,66$ Å (Z_1, Z_2, Z_3 — расстояние геометрического центра молекул метана до поверхности угля)

На расстоянии Z_1 расположен первый слой молекул метана, на Z_2 и Z_3 — второй и третий слой. Из рис. 3 следует, что энергия взаимодействия первого слоя (это потенциальная энергия притяжения) молекул метана значительно превосходит энергию их теплового движения при $T = 300$ К (порядка 3 кДж/моль). Энергия взаимодействия молекул метана второго слоя меньше энергии теплово-

го движения примерно в два раза, а третьего слоя меньше в 6-8 раз.

На рис. 4 представлена зависимость силы взаимодействия (притяжения) молекул метана, расположенных в первом ($Z_1 = 2,22$ Å), втором ($Z_2 = 4,44$ Å) и третьем ($Z_3 = 6,66$ Å) слоях, с поверхностью угля в зависимости от радиуса пор.

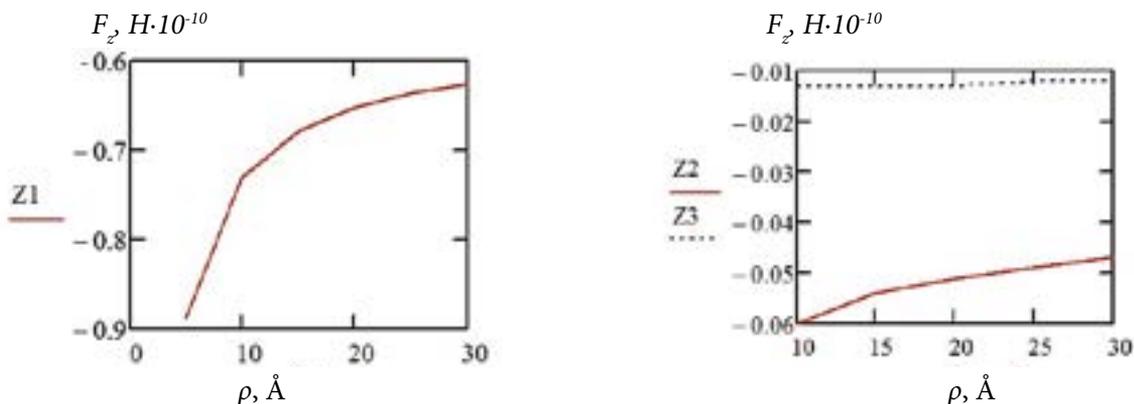


Рис. 4. Зависимость силы взаимодействия молекулы метана с углем от радиуса микропоры ρ ; $Z_1 = 2,22 \text{ \AA}$; $Z_2 = 4,44 \text{ \AA}$; $Z_3 = 6,66 \text{ \AA}$ (Z_1, Z_2, Z_3 — расстояние геометрического центра молекул метана до поверхности угля)

Молекулы метана второго и третьего слоев также взаимодействуют с молекулами первого и второго слоев соответственно. Результаты расчета энергии и силы этого взаимодействия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сила притяжения F_z , энергия взаимодействия U метана (адсорбат) к метану (адсорбент) и добавочное давление на плоской границе адсорбат-адсорбент. P — давление газа в микропоре вследствие сил молекулярного взаимодействия

$Z, \text{ \AA}$	$F_z \cdot 10^{-10}, \text{ Н}$	$U, \text{ кДж}\cdot\text{моль}$	$P, \text{ МПа}$
2,22	-0,00260	-0,016	1,66
4,44	-0,00030	-0,003	0,19
6,66	-0,00008	-0,001	0,09

Получено, что при этом добавки к энергии и силам взаимодействия с угольной поверхностью этих слоев незначительны.

Примерно такие же результаты получены для энергии взаимодействия молекул метана с функциональными группами COOH (табл. 3).

Таблица 3

Сила притяжения F_z , энергия взаимодействия U молекулы COOH (адсорбент) к метану (адсорбат) и добавочное молекулярное давление P на плоской границе адсорбат – адсорбент

$Z, \text{ \AA}$	$F_z \cdot 10^{-10}, \text{ Н}$	$U, \text{ кДж}\cdot\text{моль}$	$P, \text{ МПа}$
2,44	- 0,00230	- 0,014	1,220
4,88	- 0,00020	- 0,003	0,120
7,32	- 0,00006	- 0,001	0,003

Из результатов расчета следует (рис. 4 и табл. 2, 3), что силы взаимодействия молекул метана, расположенных у поверхности угольного адсорбента, на два порядка превосходят по модулю силы притяжения молекул метана следующего слоя. При этом энергия взаимодействия второго и последующих слоев сравнима с энергией теплового движения

при $T = 300 \text{ K}$ ($\sim 3 \text{ кДж}\cdot\text{моль}$). Таким образом, молекулы метана в первом слое оказываются закрепленными на поверхности угольного адсорбента.

Кроме того, результаты расчета, представленные в табл. 2 и 3, показывают, что на плоской границе адсорбат – адсорбент молекулы метана создают добавочное давление $\sim 1 \text{ МПа}$, соизмеримое с давлением газа в пласте.

При падении газового давления в пласте до $0,1 \text{ МПа}$ и меньше в десорбционных процессах могут участвовать только молекулы метана второго и последующих слоев, находящихся в порах, диаметр которых более 20 \AA , то есть это частично молекулы второго, третьего и последующих слоев. Если радиус поры меньше, чем 10 \AA , то в ней может адсорбироваться только один слой метана, «жестко» связанный с поверхностью угля, следовательно — это модель «закрытой поры», из которой газ практически не выхо-

дит при дегазации. Действительно, в первом слое при радиусе поры порядка 10 \AA и удельной поровой поверхности $35\text{--}1220 \text{ м}^2/\text{г}$ может находиться $0,27\cdot 10^{21}\text{--}9,24\cdot 10^{21}$ молекул метана на грамм угля. Во втором и третьем слоях может содержаться $0,29\cdot 10^{20}\text{--}1,03\cdot 10^{20}$ молекул на грамм угля, которые при создании вакуума в скважине ограждающей дегазации порядка 400 мм.рт.ст. подвержены удалению. Это дает объем метана $V_{\text{min}} = 1,73 \text{ м}^3$ и $V_{\text{max}} = 4,11 \text{ м}^3$ на 1 тонну угля.

Используя линейный закон фильтрации Дарси, была рассчитана скорость фильтрации метана и количество отсасываемого метана (табл. 4). Для расчетов принимались следующие параметры: коэффициент динамической вязкости метана $\mu = 9,86\cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ [16], давление в пласте в радиусе 1 м от дегазационной скважины $1,5 \text{ МПа}$, глубина дегазационной скважины 60 м , диаметр дегазационной скважины 76 мм .

Таблица 4

Результаты расчета параметров фильтрации метана при дегазации

Коэффициент проницаемости $k_p, \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$	Скорость фильтрации метана $v, \text{ м/с}$	Кол-во отсасыв. метана, $\text{м}^3/\text{мин}$
250	0,037	1,46
100	0,015	0,59
50	0,0075	0,30
25	0,0037	0,15
10	0,0015	0,06

В табл. 5 представлены результаты откачивания метана из угольного пласта с помощью ПНДУ – 5.2 для барьерной дегазации проход-

ческого забоя в вентиляционном штреке 557 шахты «Чертинская–Коксовая» в Кузбассе.

Таблица 5

Сведения о газоотсасывающей дегазационной установке ПНДУ-5.2

Дата	Вакуум, мм.рт.ст.	Кол-во отсасыв. газовой-душной смеси, $\text{м}^3/\text{мин}$	Концентрация метана в смеси, %	Количество метана в отсасываемой смеси, $\text{м}^3/\text{мин}$
22.09.21	410,4	69,0	1,52	1,04
23.09.21	402,8	70,5	1,66	1,17
24.09.21	402,8	70,5	1,80	1,27
25.09.21	410,4	69,0	1,92	1,33
26.09.21	402,8	70,5	1,35	0,96
27.09.21	380,0	75,0	0,80	0,60
28.09.21	380,0	75,0	0,88	0,66

Сравнение результатов расчёта и эксперимента по дегазации массива впереди проходческого забоя с помощью ограждающей дегазации показало, что действительно в первые несколько суток удаляется из поровой структуры свободный и слабосвязанный (находящийся во втором, третьем и последующих слоях) метан, после чего результативность дегазационного процесса резко падает. Проницаемость выбросоопасных угольных пластов составляет порядка $100 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ [16], поэтому можно считать, что результаты расчёта соответствуют результатам эксперимента. Молекулы метана, находящиеся в первом слое относительно поверхности угля и составляющие большую часть природной газоносности каменного угля, находятся в потенциальной яме (закрытых порах) и не могут быть удалены с помощью процесса дегазации вследствие их достаточно сильной связи с поверхностью угля. В общем случае это соответствует нахождению метана в «закрытых порах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырдин В.В., Ким Т.Л., Фофанов А.А. и др. Газовыделение при механодеструкции угля // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 5. С. 44–53.
2. Дырдин В.В., Смирнов В.Г., Ким Т.Л. и др. Изменение термодинамических параметров системы угольная матрица-газ-влага при сбросе давления и фазовых превращениях газогидратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 2. С. 8–15.
3. Дырдин В.В., Опарин В.Н., Фофанов А.А. и др. О возможном влиянии вторичных осадков основной кровли при отработке угольных пластов на их выбросоопасность при разложении газовых гидратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 5. С. 3–14.
4. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. Киев: Наукова думка, 2010. 425 с.
5. Васильковский В.А. Сорбционный объём и пустотность каменных углей // Физико-технические проблемы горного производства. 2013. Вып. 16. С. 18–32.
6. Малинникова О.Н. Условия образования метана из угля при разрушении // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 5. С. 95–99.
7. Малинникова О.Н., Фейт Г.Н. Эффект «дополнительной сорбции» метана в призабойной зоне угольного пласта // Научные сообщения института горного дела им. А.А. Скочинского. 1997. Вып. 305. С. 36–44.
8. Смирнов В.Г., Дырдин В.В., Исмагилов З.Р. и др. О влиянии форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 1. С. 34–41.
9. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В. и др. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 4. С. 65–74.
10. Алексеев А.Д. Метан угольных пластов. Формы нахождения и проблемы извлечения //

ВЫВОДЫ

1. Показано, что потенциальная энергия и сила взаимодействия молекул метана первого слоя с углеродом в структуре угля обеспечивают достаточно сильную связь, которая не может быть нарушена «тепловым» движением молекул и вакуумированием скважины, что позволяет предполагать, что молекулы метана первого слоя находятся в «закрытых» порах с диаметром «горлышка» порядка $10 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, что и препятствует свободному выходу молекул метана из поры.

2. Анализ результатов лабораторных исследований и параметров внезапного выброса угля и газа при проходке осевого штрека 553 на шахте «Чертинская-Коксовая» показали, что основная масса метана высвобождается из угля при разрушении его микропористой структуры и превышает природную газоносность примерно в 10 раз.

3. Можно предположить, что надежность текущего прогноза выбросоопасности можно повысить путем учета выделения газа из «закрытых» пор, которое происходит только при разрушении микропористой структуры.

ИГТМ НАН Украины. 2010. Вып. 87. С. 10–15.

11. Зыков И.Ю., Звеков А.А., Дудникова Ю.Н. и др. Текстурные характеристики углеродных сорбентов из каменных углей различных стадий метаморфизма // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 4. С. 64–69.

12. Козырева Е.Н., Непеина Е.С., Цуран Е.М. и др. Оценка сорбционной метаноемкости коксующихся углей Кузбасса // Кокс и химия. 2017. № 10. С. 36–41.

13. Сечкарев А.В., Бегер В.Н., Земский В.И. Конфигурационные переходы многоатомных молекул, адсорбированных неоднородной поверхностью диэлектрика // Журнал физической химии. 1993. Т. 67. № 2. С. 400–407.

14. Минкин В.В., Осипов О.А., Жданов Ю.А. Дипольные моменты в органической химии. Издательство «Химия». Ленинградское отделение, 1968. 245 с.

15. Вукс М.Ф. Рассеяние света в газах, жидкостях и растворах. Издательство Ленинградского университета, 1977. 320 с.

16. Борисенко А.А. Условия возникновения и механизм внезапных выбросов и других газодинамических явлений в шахтах // Способы и средства разработки выбросоопасных угольных пластов. Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. 1979. Вып. 182. С. 3–10.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.81.75.004

UDC 622.831.322

© V.V. Dyrdin, Yu.I. Polygalov, V.S. Ludzish, S.A. Shepeleva, A.N. Terekhov, P.V. Potapov, A.A. Fofanov, T.L. Kim, 2021

V.V. DIRDIN

Doctor of Engineering Sciences, Professor
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: vvd1941@mail.ru

Yu.I. POLYGALOV

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor of Department
KuzSTU, Kemerovo

V.S. LUDZISH

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Scientific Consultant
JSC «NC VostNII», Kemerovo

S.A. SHEPELEVA

Candidate of Engineering Sciences
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: shepelevasa@kuzstu.ru

A.N. TEREKHOV

Chief Engineer
Mine «Chertinskaya-Koksovaya»
LLC «ММК-УГОЛ», Belovo
e-mail: terehov.an@mmk-coal.ru

P.V. POTAPOV

Candidate of Engineering Sciences,
Laboratory Head
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: potapov1953@list.ru

A.A. FOFANOV

Senior Teacher,
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: thunder55@mail.ru

T.L. KIM

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Department Head of Physics
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: tanyakim@list.ru

ON THE QUESTION OF FORMATION OF «CLOSED» PORES IN STONE COAL

The article describes a possible mechanism for the formation of «closed» pores in coal. Physical model of interaction of methane molecules with functional groups of coal substance is considered, on the basis of which volume of «free» gas is calculated. The results of calculation of methane velocity and volume, which is filtered into the well of barrier degassing due to gas pressure gradient, are given. The calculation results were compared with the data of barrier degassing of the penetrating face in the ventilation stroke 557 of the Chertinskaya-Koksovaya mine in Kuzbass.

Keywords: METHANE, COAL, SPECIFIC SURFACE AREA, GAS-DYNAMIC PHENOMENA, BARRIER DEGASSING.

REFERENCES

1. Dyrdin V.V., Kim T.L., Fofanov A.A. et al. Gas release during mechanical destruction of coal // Bulletin of higher educational institutions. Mining Journal [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal]. 2019. No. 5. P. 44–53. [In Russ.].
2. Dyrdin V.V., Smirnov V.G., Kim T.L. Changes in the thermodynamic parameters of the coal matrix-gas-moisture system during pressure relief and phase transformations of gas hydrates // Bulletin of higher educational institutions. Physics [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika]. 2017. Vol. 60. No. 2. P. 8–15. [In Russ.].
3. Dyrdin V.V., Oparin V.N., Fofanov A.A. et al. On the Possible Influence of the Secondary Sediment of the Main Roof during the Development of Coal Seams on Their Outburst Hazard during the Decomposition of Gas Hydrates // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2017. No. 5. P. 3–14. [In Russ.].
4. Alekseev A.D. Physics of coal and mining processes. Kiev: Scientific thought, 2010. 425 p. [In Russ.].
5. Vasilkovsky V.A. Sorption volume and voidness of coal // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva]. 2013. Issue 16. P. 18–32. [In Russ.].
6. Malinnikova O.N. Conditions for the formation of methane from coal during destruction // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2001. No. 5. P. 95–99. [In Russ.].
7. Malinnikova O.N., Faith G.N. The effect of «additional sorption» of methane in the bottomhole zone of a coal seam // Scientific reports of the A.A. Skochinsky [Nauchnyye soobshcheniya instituta gornogo dela im. A.A. Skochinskogo]. 1997. Issue 305. P. 36–44. [In Russ.].

8. Smirnov V.G., Dyrdin V.V., Ismagilov Z.R. et al. On the influence of the forms of connection of methane with a coal matrix on the gas-dynamic phenomena arising during underground mining of coal seams // Bulletin of the scientific center for safety of work in the coal industry [Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 1. P. 34–41. [In Russ.].

9. Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Gumennik K.V. et al. Diffusion-filtration model of methane output from coal seam // Journal of technical physics [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki]. 2007. Vol. 77. No. 4. P. 65–74. [In Russ.].

10. Alekseev A.D. Coal bed methane. Forms of finding and problems of extraction // IGTM NAS of Ukraine [IGTM NAN Ukrainy]. 2010. Issue 87. P. 10–15. [In Russ.].

11. Zykov I.Yu., Zvekov A.A., Dudnikova Yu.N. et al. Textural characteristics of carbon sorbents from bituminous coals of various stages of metamorphism // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2019. No. 4. P. 64–69. [In Russ.].

12. Kozyreva E.N., Nepeina E.S., Tsuran E.M. et al. Assessment of the sorption methane capacity of coking coal in Kuzbass // Coke and chemistry [Koks i khimiya]. 2017. No. 10. P. 36–41. [In Russ.].

13. Sechkarev A.V., Beger V.N., Zemsky V.I. Configuration transitions of polyatomic molecules adsorbed by an inhomogeneous dielectric surface // Journal of Physical Chemistry [Zhurnal fizicheskoy khimii]. 1993. Vol. 67. No. 2. P. 400–407. [In Russ.].

14. Minkin V.V., Osipov O.A., Zhdanov Yu.A. Dipole moments in organic chemistry. Publishing house «Chemistry». Leningrad branch, 1968. 245 p. [In Russ.].

15. Vux M.F. Scattering of light in gases, liquids and solutions. Leningrad University Publishing House, 1977. 320 p. [In Russ.].

16. Borisenko A.A. Conditions of occurrence and mechanism of sudden emissions and other gas-dynamic phenomena in mines // Scientific reports of the A.A. Skochinsky [Nauchnyye soobshcheniya IGD imeni A.A. Skochinskogo]. 1979. Issue 182. P. 3–10. [In Russ.].