

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ СВОБОДНОЙ ФАЗЫ МЕТАНА НА МЕТАНОЁМКСТЬ УГЛЕЙ МЕТАМОРФИЧЕСКОГО РЯДА

В. А. Васильковский, О. В. Чеснокова

Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины
ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49600, Украина. E-mail: chesnokova0507@gmail.com.

Изучено влияние естественной влажности и величины давления свободной фазы метана на газоёмкость углей различной степени метаморфизации. Методика исследований основана на измерении объёма метана, который эмитирует из угля при десорбции в накопительный сосуд известного объёма. Исследования проводили на углях шести угольных пластов Донбасса, которые имели естественную влажность от 0,65% до 2,4% и содержание летучих веществ от 5% до 41%. В измерениях использовали две группы угля – сухого и влажного. Данные о метаноёмкости углей при различных давлениях использовали для компьютерной оптимизации параметров интерполяционной функции $y = (a b x / (1+b x)) + c x$, имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Описание зависимости метаноёмкости углей от давления метана проводили в рамках модели «двойной» сорбции, согласно которой сорбция образована суперпозицией неподвижной и подвижной компонент сорбированного флюида, которые описываются соответственно законами Ленгмюра и Генри. Обнаружено, что влажность уменьшает метаноёмкость углей, снижает степень локализации адсорбированных молекул метана и энергию взаимодействия молекул метана с веществом угля. Исследования показали, что применение методов гидрообработки наиболее эффективно для пластов средней и высокой степени метаморфизации.

Ключевые слова: метаноёмкость, уголь, влажность, давление, адсорбция, сорбция.

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ І ТИСКУ ВІЛЬНОЇ ФАЗИ МЕТАНУ НА МЕТАНОЄМНІСТЬ ВУГІЛЛЯ МЕТАМОРФІЧНОГО РЯДУ

В. О. Васильковський, О. В. Чеснокова

Інститут фізики гірничих процесів Національної Академії Наук України
вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, 49600, Україна. E-mail: chesnokova0507@gmail.com.

Вивчено вплив природної вологості і величини тиску вільної фази метану на газоємність вугілля різного ступеня метаморфізації. Методика досліджень заснована на вимірі обсягу метану, який емітує з вугілля при десорбції в накопичувальну посудину відомого об'єму. Дослідження проводили на вугіллі шести вугільних пластів Донбасу, які мали природну вологість від 0,65% до 2,4% і вміст летких речовин від 5% до 41%. У вимірах використовували дві групи вугілля - сухого і вологого. Методика експериментів включала насичення сухого і вологого вугілля метаном при різних тисках (до 5МПа). Вимірювання об'єму метану в вугіллі здійснювали за результатами зворотного процесу – десорбції газу в вакуумовану накопичувальну посудину відомого обсягу (об'ємний метод). Інформацію про тиск газу в накопичувальній посудині після завершення десорбції використовували для визначення метаноємності вугілля. Дані про метаноємність сухого і вологого вугілля при різних тисках використовували для комп'ютерної оптимізації параметрів функції $y = (a b x / (1+b x)) + c x$, що має найменше середньоквадратичне відхилення від експериментальних точок. Опис залежності метаноємності вугілля від тиску метану проводили в рамках моделі «подвійний» сорбції, згідно з якою сорбція утворена суперпозицією нерухомої і рухомої компонент сорбованого флюїду, які описуються відповідно законами Ленгмюра і Генрі. Аналіз вихідних даних виявив пряму залежність величини природної вологості вугілля від його зольності. Це вказує на те, що прошарки осадових порід з включеннями гідрофільних домішок є основним колектором вологи у вугіллі. Поряд з тим, що природна вологість зменшує метаноємність вугілля, вона знижує ступінь локалізації адсорбованих молекул метану. Виявлено, що енергія взаємодії молекул метану з речовиною вугілля в природно вологому вугіллі метаморфічного ряду завжди нижче, ніж в сухому вугіллі. Цей факт дозволяє стверджувати, що у вологому вугіллі будь-якої марки величина ефективного коефіцієнта дифузії газу завжди повинна бути більше, ніж в сухому вугіллі. Дослідження показали, що застосування методів гідрообробки найбільш ефективне для вугільних пластів середнього і високого ступеня метаморфізації.

Ключові слова: метаноємність, вугілля, вологість, тиск, адсорбція, сорбція.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В природных условиях каменный уголь содержит не только газы, но и воду с минеральными примесями. Взаимодействия в системе уголь-газ-вода влияют на газоносность угля, кинетику движения молекул флюидов и являются важным фактором, определяющим выбор сценария разработки угольного пласта. Наличие воды в номинально гидрофобных ископаемых углях связано с геологическими условиями их формирования. Практически все гидрофобные адсорбенты имеют на своей поверхности гидрофильные центры адсорбции. Их активными центрами являются кислородсодержащие группы, радикалы CH , CH_2 , CH_3 .

Воздействие подземных соленых вод, содержащих гидрофильные и амфифильные примеси, привело к образованию прослоев осадочных пород, которые аккумулируют влагу и образуют сеть фильтрационных каналов в пластинах угля. Учитывая широкое использование воды и её растворов в мероприятиях по дегазации угольных пластов, любые новые, особенно системные, опытные данные о влиянии влажности на сорбционные свойства углей являются полезными и актуальными.

Различие фазовых состояний компонентов природного угля является причиной, по которой наиболее изученным является взаимодействие газа (мета-

на) с сухим углем [1]. Практически каждый отраслевой институт, решающий задачи оптимизации процессов угледобычи или обеспечения безопасных условий труда шахтёров, имеет в своём активе работы, посвящённые таким исследованиям [2].

История изучения системы уголь-метан показывает, что многие опытные данные удается объяснить, если предположить, что в структурном отношении каменный уголь представляет собой совокупность мельчайших образований – блоков, свободный объём между которыми составляет объём открытых пор и трещин. Указанные поры сообщаются с внешней поверхностью угля и служат путями эвакуации газа после его диффузии из блоков.

В описании метана, содержащегося в блоках ископаемых углей, выделяются две основные модели. Согласно одной из них, насыщенность угля газом обеспечивается развитой сетью микропор. В другой модели основным резервуаром метана являются закрытые поры и включения метастабильных однофазных образований по типу твердого раствора [2]. Принимается, что движение газа из закрытых пор через тело блока может происходить только путем твердотельной диффузии в молекулярных порах, поскольку другие каналы транспорта, согласно модели, отсутствуют. Представление об изолированных (закрытых) порах в блоках как основном аккумуляторе свободного газа в углях обнаруживает несостоятельность при объяснении значительной газоемкости углей в условиях низкого давления газовой фазы метана. Последние исследования [3], в которых изучалась зависимость дебита метана от размера гранул угля, дают основания считать, что закрытость «закрытых» пор относительна. Обнаружено, что даже мелкие частицы угля содержат поры различного размера. И чем выше степень измельчения, тем масштаб пор в блоках меньше. Если оставаться на позициях блоковой модели, то блоком следует считать мелкую частицу угля, сечение пор в которой меньше длины свободного пробега молекул газа. Таким образом, микропоры в блоках ископаемого угля не только аккумулируют сорбированную газ, но также являются путями его транспорта при диффузии.

Описание транспорта метана в современной литературе проводится большей частью без учета сорбционных эффектов, то есть метан рассматривается как идеальный газ. Следуя такой логике, вода в природных углях представляет собой пассивный компонент, роль которого сводится к блокировке пор, снижению газоемкости угля и эффективного коэффициента диффузии газа. Отметим, что уменьшение газоемкости подтверждается всеми известными исследованиями [4–12].

В большей части публикаций не исключается вероятность того, что, когда флюид представляет собой смесь газа и паров воды, характер их взаимодействия с углем должен определяться конкурентной энергетикой взаимодействия молекул с поверхностью пор. То есть, кроме состояния «типа твердого раствора метан-уголь» в углях, как и во всех сорбирующих средах, может быть иное – адсорбированное состояние флюидов в углях.

Учет влажности в процессах адсорбции был рассмотрен теоретически в работе [7]. Показано, что фазовое состояние воды при большой влажности угля в основном определяется жидкостью, а при низкой влажности – парообразным состоянием.

В работе [9] представлены результаты изучения сорбционных свойств углей различной степени метаморфизации. Авторы обнаружили, что влажность ингибирует адсорбционную способность угля. Чем выше влажность, тем короче время релаксации сорбционных процессов (адсорбции и десорбции) к равновесному состоянию. Все изотермы адсорбции хорошо согласуются с уравнением Ленгмюра. Авторы предполагают, что влага занимает определенный объём в порах, тем самым, уменьшая объёмы газовой адсорбции и десорбции.

Во многих отмеченных выше публикациях констатируется возможность описания изотерм адсорбции молекул CH_4 и CO_2 в рамках теории Ленгмюра, но не обсуждается механизм влияния естественной влажности угля на его газоемкость.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния естественной влажности и величины давления свободной фазы метана на газоемкость углей различной степени метаморфизации.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Изучение влияния давления и влажности на метаноемкость и кинетику десорбции метана проводили на образцах углей Донбасса, которые отличаются содержанием летучих веществ, золы и влаги (табл. 1).

Таблица 1 – Образцы углей

№	Марка	Пласт	Содержание		
			летучих веществ V^{daf} , %	золы A^d , %	влаги W , %
1	«Г»	K_8	41	22	2,2
2	«Г»	m'_5	37	34	2,4
3	«Ж»	m_3	35	11	0,65
4	«Ж»	m_3	30	15	0,7
5	«Т»	l_6	9	14	0,8
6	«А»	l_2^8	5	22	1,7

В опытах использовали две группы образцов угля – сухих и влажных. Все образцы получены из штывов, которые образуются в процессе бурения скважин в угольных пластах. Для каждого пласта штыв с естественной влажностью отсеивали на ситах и из гранул размером 0,2–0,25 мм формировали десять образцов массой 20 г, пять из которых сушили при температуре 350 К в течение 7 – 10 суток. Качество высушивания контролировали анализом формы линии спектра ЯМР H^1 [2]. Сухие и влажные образцы угля ссыпали в контейнеры, в которые затем без предварительной дегазации подавали сжатый метан. Насыщенные метаном при различных давлениях (до 5 МПа) образцы использовали в последующем для определения метаноемкости сухого и влажного угля.

Для исследований применяли объёмный метод. Метод включает три этапа: 1-й – насыщение угля сжатым метаном, 2-й – предварительный сброс сжа-

того газу із контейнера з углем після його насичення і 3-й – збір метану, виділяемого углем в накопительний посуд. Перед реєстрацією десорбції виробляли сброс сжатого газу із вільного об'єму контейнерів в атмосферу. (Продовжительність операції була встановлена експериментальним шляхом при сбросе сжатого гелія, в'язкість якого більше, ніж метану). Після сбросу тиску контейнери з зразками підключали до вакуумованих накопительних посудів, в які вироблялась десорбція метану із угля.

Об'єм контейнера, маса угля, а також об'єм накопительних посудів (НС) підбирались так, щоб після десорбції тиск метану в НС не перевищало ≈ 25 кПа. Таким способом ми зводимо до мінімуму вплив тиску газу в НС на хід десорбції. Система накопительний посуд – вакууметр виконує тут функцію вимірального зонда. І чим більше його об'єм, тим менше його вплив на хід десорбції. Контрольні виміри показали, що додаткове вакуумування НС призводить до зростання виділення метану із угля не більше, ніж на 2%. В експериментах по десорбції метану із вологих

углей вимірельна установка, яка використовувалась в експериментах з сухим углем, була доповнена двома елементами: низькотемпературною ловушкою (-78°C) для парів води і нагріваючим радіатором для поступаючого в НС метану. В ході десорбції змінення тиску газу в НС щосекундно реєструється датчиком тиску, і відповідний сигнал поступає в блок пам'яті комп'ютера. Діапазон вимірювань надлишкового тиску датчиком тиску обмежений 40 кПа. Чувствительність датчика з аналогово-цифровим перетворювачем – менше 1 Па.

Для побудови кривих $Q=f(P)$ залежності метаноємкості угля від тиску насичення метану використовували дані про тиск $P_{\text{НС}}$ газу в НС після завершення десорбції.

На рис. 1 в графічному вигляді представлені результати вимірювань об'ємів сорбованого метану в сухих углях і углях природної вологості в діапазоні рівноважних тисків метану 0 – 5 МПа. На фрагментах вказано номер зразка.

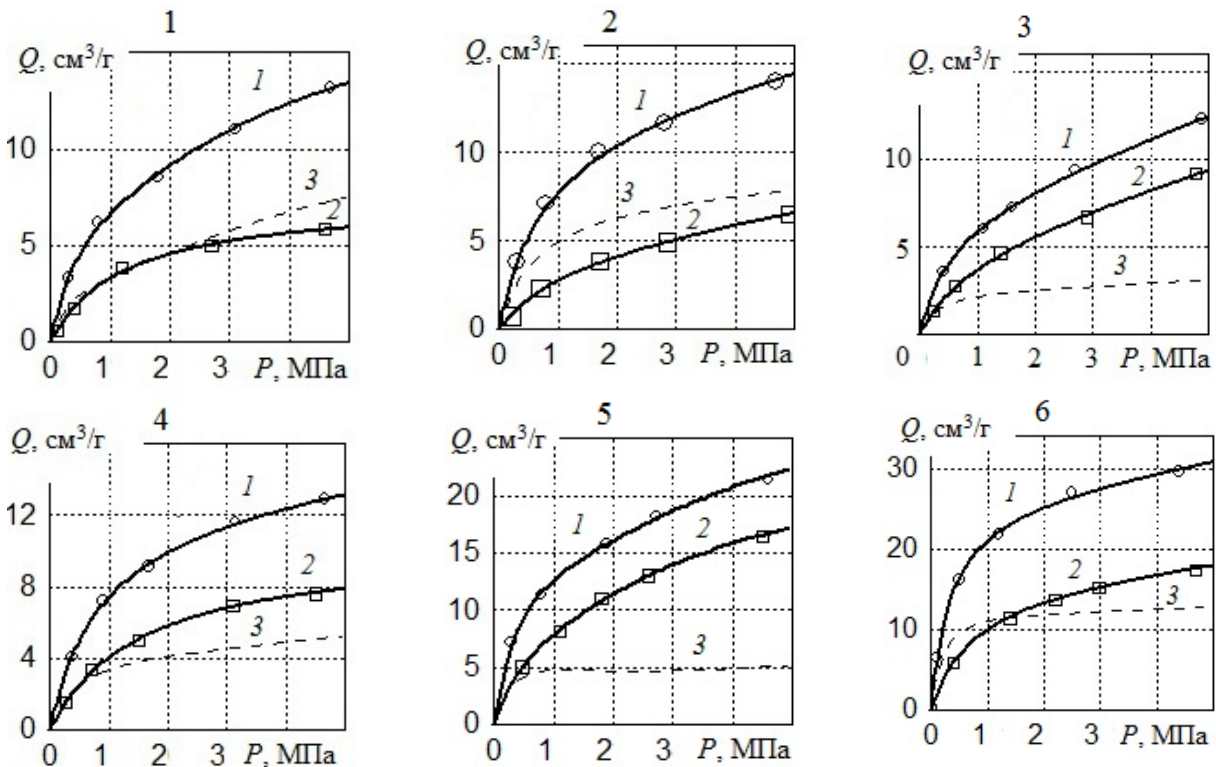


Рисунок 1 – Характер залежності метаноємкості углей в зразках 1 – 6 від тиску насичення метану: 1 – сухий уголь, 2 – вологий уголь, 3 – величина зниження метаноємкості під впливом природної вологості

Сравнение характеристик угля в зразках обнаруживает прямую зависимость величины природной влажности от его зольности. Это указывает на то, что прослой осадочных пород с включениями гидрофильных примесей являются основным коллектором влаги в углях. Из рисунков видно, что влага в углях уменьшает метаноёмкость во всем диапазоне давлений. Наиболее сильно влияние влаги проявляется в углях высокой и низкой метамор-

физации (образцы 1, 2 и 6). Снижение метаноёмкости связано с адсорбцией молекул воды в порах угля [4–6, 8–12]. Наличие паров воды в порах может быть связано либо с заполнением пор водометановым раствором при сорбции, либо мы имеем дело с эндогенной (природной) влажностью, которая, почти не зависит от тиску метану в пласте. Первую версию трудно обосновать из-за чрезвычайно слабой растворимости воды в метане.

Другая версія являється фізически более обоснованной. Влага в порах – это неизменная составляющая общей эндогенной влаги угля. То есть, объём и распределение молекул эндогенной влаги в порах остаются постоянными, не зависят от давления и являются характерным признаком угля и термодинамических условий залегания данного шахтопласта. Молекулы воды занимают постоянное число различных по энергетике активных центров, тем самым ограничивая число свободных посадочных мест для метана. Поэтому с ростом давления насыщения всё заметнее проявляется дефицит свободных сорбирующих центров. Таким образом, кривая 3 на рис. 1 показывает, на какую величину уменьшается удельный объём метана за счет влажности в порах.

При анализе экспериментальных данных необходимо учитывать, что наличие в углях включений функциональных групп различного химического состава, а также дисперсии проницаемости пор определяет широкий спектр энергии взаимодействий воды и метана с веществом угля. Поэтому для описания зависимости метаноёмкости Q углей от давления P метана допустимо использование модели «двойной» сорбции. Воспользуемся приближением, согласно которому сорбция образована суперпозицией подвижной и неподвижной компонент сорбированного флюида [13], которые описываются соответственно законами Ленгмюра и Генри. В этом приближении функция $Q=f(P)$ имеет вид:

$$Q = \frac{Q_{\max} \cdot b \cdot P}{1 + b \cdot P} + \varphi P, \quad (1)$$

где Q_{\max} – максимальный объём монослоя ($\text{см}^3/\text{г}$), $b=1/P_L$ – константа Ленгмюра ($\text{м кг}^{-1} \text{с}^2$), P_L – параметр отражающий величину давления, при котором заполнена половина сорбционного слоя, а φ – коэффициент растворимости Генри.

Первое слагаемое в уравнении (1) описывает сорбцию метана, который в той или иной степени связан с активными центрами угля, второе – описывает изменение объёма метана подвижного. Это может быть метан в свободном состоянии или адсорбированный на открытых поверхностях гранул, пор и трещин угля. Подвижность последнего реализуется в виде перескоков по поверхности от одного активного центра к другому подобно двумерному газу. Объём свободного и поверхностного метана линейно зависит от давления газа [14].

Правомерность использования модели Ленгмюра (однослойная адсорбция, отсутствие латеральных взаимодействий) для описания сорбции микропористыми углями, конечно, условна. Однако в рамках указанных приближений на качественном уровне возможен сравнительный анализ адсорбированного состояния метана в сухих и влажных углях. Наиболее информативным для этого может быть параметр b , который является индикатором степени локализации адсорбата на адсорбенте. Его величина пропорциональна времени τ пребывания молекулы на активном центре:

$$b \propto \frac{1}{v} e^{\frac{E}{RT}}. \quad (2)$$

В этом выражении ν – частота колебаний молекулы адсорбата в перпендикулярном к поверхности тела направлении, E – энергия взаимодействия молекулы с веществом угля, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура адсорбента, соответственно. Таким образом, чем слабее связь молекулы флюида с поверхностью пор угля, тем меньше время τ и параметр b .

Дискретные экспериментальные данные о зависимости метаноёмкости Q сухих и влажных углей от давления P метана были использованы для компьютерной оптимизации параметров функции (1), имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Интерполяцию выполняли с помощью функции вида

$$y = \frac{abx}{1+bx} + cx. \quad (3)$$

В табл. 2 приведены результаты оптимизации.

Таблица 2 – Параметры функции $Q=f(P)$ адсорбции метана в образцах угля

№	$A^d, \%$	$W, \%$	Q_{\max}	b	φ
1	22	0	9,5	0,145	0,105
		2,2	7,1	0,085	0,002
2	34	0	12,1	0,134	0,078
		2,4	4,6	0,091	0,056
3	11	0	7,2	0,181	0,119
		0,65	5,3	0,106	0,098
4	15	0	12,8	0,120	0,043
		0,7	10,2	0,066	0,001
5	14	0	15,6	0,235	0,163
		0,8	13,7	0,096	0,122
6	22	0	26,7	0,291	0,116
		1,7	16,0	0,136	0,080

Данные табл. 2 показывают, что для влажных углей константа Ленгмюра b всегда меньше, чем для углей сухих. Это свидетельствует об уменьшении степени локализации адсорбированных молекул и более слабом взаимодействии метана с активными центрами угля. Причина изменений параметров адсорбции, связанных с влагой в углях, заключается в том, что потенциал взаимодействия молекул воды с углем больше, чем для молекул метана [9, 10]. В результате последние не могут конкурировать с водой за наиболее выгодные позиции на сорбирующей поверхности угля. Роль воды как ингибитора адсорбции метана проявляется также в уменьшении параметра φ , который является индикатором объёма подвижной составляющей сорбированного метана. Блокировка водой сорбирующих центров на открытых поверхностях угля приводит к уменьшению также и объёма «двухмерного» газа.

Роль энергии E проявляется также в характере изменения параметра b при переходе к углям высокой метаморфизации (образцы 5 и 6). Увеличение указанного параметра для углей марок Т и А указывает на то, что сорбция в этих углях происходит в более тонких порах – микропорах, потенциал взаимодействия в которых выше, чем порах большего сечения.

ВЫВОДЫ. Выявлена прямая зависимость величины естественной влажности углей от зольности. Это указывает на то, что прослой осадочных пород с включениями гидрофильных примесей являются основным коллектором влаги в углях.

Зависимость метаноёмкости сухих углей и углей естественной влажности удовлетворительно описывается в модели «двойной» сорбции, основанной на предположении о суперпозиции подвижной и неподвижной компонент сорбированного флюида. Обсуждение экспериментальных данных в рамках приближений упомянутой модели приводит к следующим выводам:

1. Естественная влажность уменьшает метаноёмкость углей, так как часть сорбирующей поверхности и объёма пор блокируется молекулами воды.

2. Степень локализации адсорбированных молекул метана во влажных углях меньше, чем в сухих углях.

3. С ростом метаморфизации углей степень локализации адсорбированного метана возрастает.

4. Энергия взаимодействия молекул метана с веществом угля в естественно влажных углях метаморфического ряда всегда ниже, чем в сухих углях. Этот позволяет утверждать, что во всех влажных углях, несмотря на снижение метаноёмкости или ослабление интенсивности потока эмиссии газа из угля, величина эффективного коэффициента диффузии газа всегда будет больше, чем в сухих углях.

5. Исследования показали, что применение методов гидрообработки наиболее целесообразно и эффективно для угольных пластов средней и высокой степени метаморфизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Busch A., Gensterblum Y., Krooss B. Methane and CO₂ sorption and desorption measurements on dry Argonne premium coals: Pure components and mixtures. *International Journal of Coal Geology*. 2003, Vol. 55, Is. (2–4), pp. 205–224.

[https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00113-7)

2. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов. Киев: Наук. Думка, 2010. 424 с.

3. Васильковский В. А., Пономаренко Д. А. Масштабный эффект в десорбции метана из каменного угля. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013, № 13, ч. 1, С. 75–84.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57205>

4. Dingyi H., Lei Z., Mingxue L., Shihao T. Experimental study of the moisture content influence on CH₄ adsorption and deformation characteristics of cylindrical

bituminous coal core. *Adsorption Science & Technology*. 2018, Vol. 36(7–8), pp. 1512–1537.

doi: 10.1177/0263617418788444

5. Guo H., Cheng Y., Wang L. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015, Vol. 24, pp. 245–251.

doi: 10.1016/j.jngse.2015.03.037

6. Battistutta E., Eftekhari A., Bruining H., Wolf K. Manometric Sorption Measurements of CO₂ on Moisture-Equilibrated Bituminous Coal. *Energy Fuels*. 2012, Vol. 26, Issue 1. pp. 746–752.

doi: 10.1021/ef2012936

7. Mohammad S. A., Gasem K. A. M. Modeling the Competitive Adsorption of CO₂ and Water at High Pressures on Wet Coals. *Energy Fuels*. 2012, Vol. 26, Issue 1. pp. 557–568.

doi: 10.1021/ef201422e7a.

8. Švábová M., Weishauptová Z., Příbyl O. The effect of moisture on the sorption process of CO₂ on coal. *Energy Fuels*. 2012, Vol. 92, Issue 1, pp. 187–196.

doi: 10.1016/j.fuel.2011.08.030

9. Wang L., Chen E.-T., Liu S. Experimental study on the effect of inherent moisture on hard coal adsorption-desorption characteristics. *Adsorption*. 2017. Vol. 23, pp. 723–742.

doi: 10.1007/s10450-017-9889-y

10. Wang Zhaofeng, Xu Tang, Weiwei Su. Jiahao Wu Influence of water invasion on methane adsorption behavior in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2018, Vol. 197, p. 74–83.

doi: 10.1016/j.coal.2018.08.004

11. Yifeng Jiang. Study on methane adsorption characteristics of different rank coals in presence of moisture. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2016, 63(12), pp. 586–592.

<https://www.researchgate.net/.../314354486>

12. Chen M.Y., Cheng Y.P., Hao-ran Li, H.R. Impact of inherent moisture on the methane adsorption characteristics of coals with various degrees of metamorphism. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018, Vol. 55, pp. 312–320.

<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.05.018>

13. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 1999. 513 с.

14. Васильковский В. А., Довбнич М. М., Мендрий Я. В. Адсорбция метана на ископаемых углях в диапазоне комнатных температур и давлений выше 0.1 МПа. *Физика и техника высоких давлений*. 2016, Т. 26, № 3–4. С. 79–88.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/122757>

EFFECT OF HUMIDITY AND PRESSURE OF THE FREE METHANE PHASE ON THE METHANE CAPACITY COALS OF THE METAMORPHIC SERIES

V. Vasilkovskiy, O. Chesnokova

Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine
vul. Simferopolskaya, 2a, Dnipro, 49600, Ukraine. E-mail: chesnokova0507@gmail.com.

Purpose. The study of the effect of natural humidity and pressure on the methane capacity coals of varying degrees of metamorphization is the goal of the work. **Methodology.** The research methodology is based on measuring the volume of methane that is emitted from coal during desorption into a storage vessel (SV) of a known volume. Studies were performed on coal 6 layers of the Donbass with a natural moisture content of 0.65% to 2.4% and a content of volatile substances of 5% to 41%. In the measurements used coal is dry and wet. The experimental technique included the satu-

ration of dry and wet coals with methane at various pressures (up to 5 MPa). Measurements of the volume of methane in the coal were made according to the results of the reverse process – gas desorption into the evacuated SV of a known volume (volumetric method). **Results.** Information about the gas pressure in the SV after the desorption had been completed was used to determine the initial volume of methane in the coal. Data on the volume of methane in dry and wet coals at different pressures were used for computer optimization of the parameters of the interpolation function $y = (a b x / (1 + b x)) + c x$, which has the smallest standard deviation from the experimental points. The description of the dependence of methane intensity of coal on the pressure of methane was carried out in the framework of the model of “double” sorption. According to this model, sorption is formed by the superposition of a fixed and mobile component of a sorbed fluid, which are described respectively by the laws of Langmuir and Henry. **Originality.** The analysis of the initial data revealed a direct dependence of the value of the natural moisture content of the coal on their ash content. This indicates that sedimentary rocks with inclusions of hydrophilic impurities are the main collector of moisture in coal. Along with the fact that natural moisture reduces the amount of methane in coal, it reduces the degree of localization of the adsorbed methane molecules. It has been found that the energy of interaction of methane molecules with the substance of coal in naturally wet coals of the metamorphic series is always lower than in dry coals. This fact suggests that in all wet coals the value of the effective diffusion coefficient of the gas should always be greater than in dry coals. **Practical value.** Studies have shown that the use of hydrotreatment methods is most effective for coal seams of medium and high degree of metamorphization.

Key words: methane capacity, coal, humidity, pressure, adsorption, double sorption model, interaction energy/

REFERENCES

1. Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B. M. (2003), “Methane and CO₂ sorption and desorption measurements on dry Argonne premium coals: Pure components and mixtures”, *International Journal of Coal Geology*, Vol. 55, Is.(2–4), p. 205–224.
[https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00113-7)
2. Alekseyev, A. D. (2010), *Fizika uгля i gornykh protsessov*, [Physics of coal and mining processes], Kiyev: Nauk. Dumka.
3. Vasil'kovskiy, V. A., Ponomarenko, D. A. (2013), *Masshtabnyy effekt v desorbtsii metana iz kamennogo uгля*, [Scale effect in methane desorption from coal], *Naukovi pratsi UkrNDMÍ NAN Ukraïni*. № 13, c. 1, p. 75–84.
<http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/57205>
4. Dingyi, H., Lei, Z., Mingxue, L., Shihao, T. (2018), “Experimental study of the moisture content influence on CH₄ adsorption and deformation characteristics of cylindrical bituminous coal core”, *Adsorption Science & Technology*. Vol. 36(7–8), p. 1512–1537.
doi: 10.1177/0263617418788444
5. Guo, H., Cheng, Y., Wang, L. (2015), “Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol. 24, p. 245–251.
doi: 10.1016/j.jngse.2015.03.037
6. Battistutta, E., Eftekhari, A., Bruining, H., Wolf, K. (2012), “Manometric Sorption Measurements of CO₂ on Moisture-Equilibrated Bituminous Coal”, *Energy Fuels*, Vol. 26, Issue 1. p. 746–752.
doi: 10.1021/ef2012936
7. Mohammad, S. A., Gasem, K. A. M. (2012), “Modeling the Competitive Adsorption of CO₂ and Water at High Pressures on Wet Coals”, *Energy Fuels*, Vol. 26, Issue 1. p. 557–568.
doi: 10.1021/ef201422e7a.
8. Švábová, M., Weishauptová, Z., Příbyl, O. (2012), “The effect of moisture on the sorption process of CO₂ on coal”, *Energy Fuels*, Vol. 92, Issue 1, p. 187–196.
doi: 10.1016/j.fuel.2011.08.030
9. Wang, L., Chen, E.-T., Liu, S. (2017), “Experimental study on the effect of inherent moisture on hard coal adsorption–desorption characteristics”, *Adsorption*. Vol. 23, p. 723–742.
doi: 10.1007/s10450-017-9889-y
10. Wang, Zhaofeng, Xu, Tang, Weiwei, Su, Jiahao, Wu (2018), “Influence of water invasion on methane adsorption behavior in coal”, *International Journal of Coal Geology*. Vol. 197, p. 74–83.
doi: 10.1016/j.coal.2018.08.004
11. Yifeng, Jiang. (2016), “Study on methane adsorption characteristics of different rank coals in presence of moisture”, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 63(12), p. 586–592.
<https://www.researchgate.net/.../314354486>
12. Chen, M. Y., Cheng, Y. P., Hao-ran, Li, H. R. (2018), “Impact of inherent moisture on the methane adsorption characteristics of coals with various degrees of metamorphism”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol. 55, p. 312–320.
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.05.018>
13. Mulder, M. (1999), *Vvedeniye v membrannuyu tekhnologiyu*, [Introduction to membrane technology], M.: Mir.
14. Vasil'kovskiy, V. A., Dovbnich, M. M., Mendriy, Y. V. (2016), *Adsorbtsiya metana na iskopayemykh uglyakh v diapa-zone komnatnykh temperatur i davleniy vyshе 0.1 MPa*, [Methane adsorption on fossil coals in a range of room temperatures and pressures above 0.1 MPa], *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, V. 26, № 3-4. p. 79-88.
<http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/122757>

Стаття надійшла 12.11.2018.