

УДК 622.02:536.244

<https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.002>

## ИЗМЕНЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕЙ РАЗРУШЕННЫХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В.А. Васильковский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов Национальной академии наук  
Украины, г. Днепр, Украина

\*Ответственный автор: e-mail: lod.vasykivskyi@ukr.net

## CHANGE OF THE SORPTION PROPERTIES OF COALS DESTROYED UNDER THE ACTION OF SHEAR STRESSES

V.A. Vasykivskyi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes the National Academy Sciences of  
Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: lod.vasykivskyi@ukr.net

### ABSTRACT

**Purpose.** To study the sorption properties and kinetics of methane desorption for coals that underwent destruction under the action of shear stresses and to identify the relationship between the level of stresses and the characteristic relaxation time of desorption.

**Methods.** The destruction of cubic coal samples by shear deformations was carried out using a triaxial press. For failure, shear stress levels of 4 MPa and 14 MPa were used. A volumetric method was used to study the process of desorption of methane from coal. A new method for analyzing experimental results based on the idea of a change in the characteristic relaxation time of desorption upon methane emission was used.

**Results.** On the basis of experimental data, the kinetics parameters of methane desorption from three coal samples was determined: initial and destroyed by shear stresses of various levels. A comparison of the kinetics parameters showed that with an increase in shear stresses, the characteristic methane desorption time decreases, the effective methane diffusion coefficient increases, and the sorption capacity of coal decreases. A qualitative and quantitative analysis of alternative interpretations of the features of changes in the kinetic parameters of methane desorption from coal destroyed by shear stresses of various levels is carried out.

**Originality.** An analysis of the experimental results in a dynamic sorption model suggests that all the features of the sorption kinetics are due only to the energy of interaction of methane with coal. For the first time, the dependence of the interaction energy of methane with coal substance on the value of the tangential stresses that destroy coal is revealed.

**Practical implications.** The results of the study make it possible to diagnose the level of shear stresses in the coal seam using coal samples and can be used to predict gas-dynamic phenomena.

**Keywords:** characteristic time, relaxation of the desorption process, level of shear stresses, interaction energy, volumetric method, emission, methane desorption, coal microstructure, sorption capacity of coal.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Угольные пласты подвержены действию сложного напряженного состояния – объемного неравнокомпонентного сжатия, что является, если не основным, то важным фактором, определяющим возникновение газодинамических явлений (ГДЯ) в угольных шахтах [1-8]. В этой связи приобретают актуальность исследования сорбционных свойств и особенностей кинетики эмиссии метана из углей, разрушенных в результате воздействия на них искусственно создаваемых напряжений. Их результаты, в совокупности с подобными данными для углей, испытавших событие ГДЯ, могут дать информацию о характере механохимических трансформаций в угле, которые предшествовали упомянутому событию. Такие сведения важны для прогнозов ГДЯ, обеспечения безопасности работы шахтеров, и поэтому их получение является актуальной задачей.

Изучение 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 объем между которыми составляет объем открытых пор и трещин [9]. Указанные поры сообщаются с внешней поверхностью угля и служат путями эвакуации газа после его диффузии из блоков. Также как и при отделении угля от насыщенного газом пласта, в лабораторных опытах почти весь свободный и адсорбированный в открытых порах и трещинах метан теряется ещё при вскрытии контейнера с углем. Поэтому, изучая кинетику десорбции, мы всегда начинаем её наблюдение на стадии, когда выделение газа происходит из блоков угля. В последующем эффект фильтрации открытыми порами «регулирует» скорость выхода газа за счет опорного давления вблизи блоков.

Ранее [1] на уровне качественных оценок было показано, что приложение к образцу угля некоторых видов напряжений может приводить к изменению фильтрационных и диффузионных характеристик движения метана в угле. Примечательно, что описание транспорта метана в современной литературе проводится большей частью без учета сорбционных эффектов, то есть метан рассматривается как идеальный газ [2, 8]. С дальнейшим развитием научных представлений о сорбционной кинетике появилась возможность более полно использовать информативность данных экспериментальных измерений [10].

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучить сорбционные свойства и кинетику десорбции метана для углей, претерпевших разрушение под действием сдвиговых напряжений и выявить

связь между уровнем напряжений и характерным временем релаксации десорбции.

### 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования кинетики выхода метана из каменных углей проводили методом десорбции в вакуумированный накопительный сосуд (НС) известного объема  $V$ .

Данные об изменении объёма газа в накопительном сосуде в ходе десорбции использовали для компьютерной оптимизации параметров интерполяционной функции, имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Для обеспечения удовлетворительного приближения к опытным данным, необходимо использовать сумму большого числа таких функций, что усложняет компьютерный расчет численных значений параметров. Поэтому для интерполяции использовали функцию вида:

$$Q_{нс}(t) = a(1 - \exp(-t/\tau_1)) + b(1 - \exp(-t/\tau_2)). \quad (1)$$

В указанном приближении параметры  $\tau_1$  и  $\tau_2$  представляют собой усреднённые значения характерных времен истечения «быстрого» и «медленного» метана,  $a$  и  $b$  – его объёмы в угле [11]. Очевидно, что максимальный объём метана в угле (перед десорбцией) равен  $a + b$ . В двухвременной модели десорбции первая составляющая в (1) определяется, в основном, фильтрационными процессами, а вторая – диффузионными.

Экспериментальные данные о ходе заполнения накопительного сосуда газом использовали для определения характерного времени  $\tau^{dec}(t)$  процесса десорбции метана из угля:

$$\tau^{dec}(t) = Q_{yz}(t) / (dQ_{нс}(t) / dt) \quad (2)$$

где  $dQ_{нс}(t) / dt$  – скорость изменения объёма газа в накопительном сосуде (поток газа из угля),  $Q_{yz}(t) = (a + b - Q_{нс}(t))$  – объём метана в угле в момент времени  $t$ .

Параметр  $\tau^{dec}(t)$ , в том виде, в котором он записан, – это время истечения всего метана, который в данный момент времени  $t$  содержится в угле, в предположении, что поток десорбируемого газа останется таким же, как и в момент времени  $t$ , а другие источники (или поглотители) газа отсутствуют. Поскольку при десорбции величина  $Q_{yz}(t)$  и поток  $dQ_{нс}(t) / dt$  изменяются, то параметр  $\tau^{dec}(t)$  также изменяется, и в случае приближенного описания затухающего процесса, принимает смысл среднего значения.

Выбор характерного времени  $\tau^{dec}(t)$  для анализа кинетики десорбции обусловлен тремя причинами. Первая – это высокая чувствительность характерного времени к размеру гранул угля. Вторая – обусловлена тем, что величина

$\tau^{dec}(t)$  не зависит от массы угля и количества гранул в образцах и третья, – это удобство компьютерного расчета параметра  $\tau^{dec}(t)$  интерполяционной функции, описывающей ход изменения дискретных экспериментальных данных.

Как показывает опыт, кинетика выделения газа из угля при десорбции имеет широкий диапазон констант времени (характерных времён  $\tau^{dec}$ ) – от нескольких минут до суток в зависимости от стадии десорбции, уровня метаморфизации, температуры и других факторов, в частности, от энергетики диффузионного процесса в угольном веществе. В блоках ископаемых углей имеет место дисперсия длины диффузионного пути.

Зависимость характерного времени десорбции от  $D_{эфф}$  и энергии активации  $\varepsilon$  диффузионного процесса описывается выражениями, следующими из теории диффузии в твердых телах [12]

$$\tau^{dec}(t) = R^2 / D_{эфф}(t), \quad (3)$$

$$D_{эфф}(t) = D_0 \exp(-\varepsilon/k_B T), \quad (4)$$

где параметры  $D_0$ ,  $k_B$  и  $T$  в уравнении Аррениуса – соответственно предэкспоненциальный множитель, постоянная Больцмана и температура;  $R$  – радиус куска твердого тела.

Если из эксперимента известна зависимость параметра  $\tau^{dec}(t)$  от времени десорбции, то с помощью выражения (3), можно оценить эффективный коэффициент диффузии  $D_{эфф}$  на любой стадии эмиссии газа из образца угля. Эффективный коэффициент диффузии  $D_{эфф}$  газовых молекул также следует принимать как его усредненное значение по объёму блока угля.

В качестве образцов для исследований использовали уголь шахты «Красноармейская-Западная №1». Для разрушения кубических образцов сдвиговыми деформациями нагружение угля осуществляли по схеме  $\sigma_1 = 2\sigma_2 - \sigma_3$ . При этом  $\sigma_3$  принимало значение 4 МПа и 14 МПа. Далее после дробления и отсева на ситах уголь в гранулах 0,2 – 0,25 мм сушили при температуре  $\sim 350K$  в течении 10 часов. Качество высушивания контролировали анализом формы линии спектра ядерного магнитного резонанса протонов  $H^1$ .

В процессе подготовки и проведения экспериментов выполняли следующие условия:

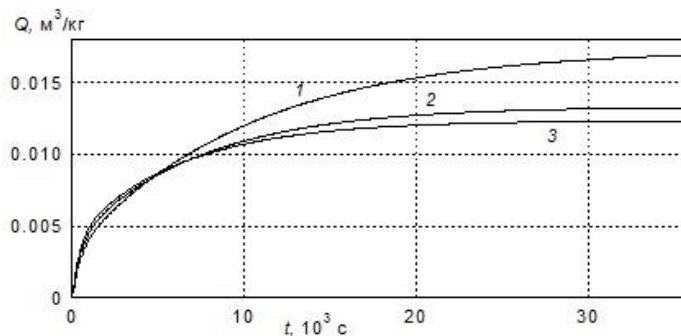
- 1) Предварительное насыщение всех образцов метаном производилось в среде метана, сжатого при давлении 2,5 МПа;
- 2) Регистрация десорбции прекращалась после того, как изменение давления газа в накопительном сосуде было меньше 200 Па за сутки.

Масса каждого образца угля 20 г.

Отметим, что в экспериментах определяли объем метана, который оставался в угле после «сброса» сжатого газа из контейнера в атмосферу. (Во время «сброса» вместе со свободным метаном из открытых пор и трещин удаляется также метан, адсорбированный на открытых поверхностях угля).

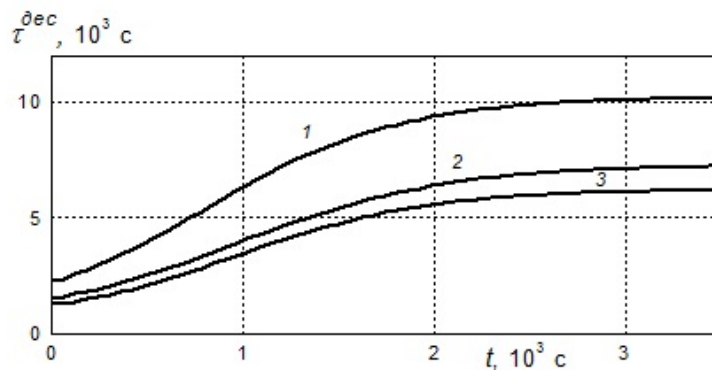
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 1 показан ход изменения объёма метана в накопительном сосуде в процессе десорбции из угля.



*Рисунок 1. Графики интерполяционных функций, отражающие процесс заполнения накопительного сосуда метаном при десорбции из образцов угля в гранулах 0,2–0,25 мм: не разрушенного – кривая 1, разрушенного при  $\sigma_3=4$  МПа – кривая 2 и  $\sigma_3=14$  МПа – кривая 3*

По данным измерений для трех образцов вычисляли исходную газоносность и параметры кинетики –  $a$ ,  $b$ ,  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , определяющие вид графиков интерполяционной функции (1). Полученные результаты дают возможность с помощью выражения (2) рассчитать изменение величины характерного времени десорбции  $\tau^{dec}(t)$  в процессе эмиссии метана из угля. На рисунке 2 приведены результаты расчета параметра  $\tau^{dec}(t)$  для трёх образцов угля.



*Рисунок 2. Характер изменения времени релаксации десорбции метана из образцов угля. Нумерация кривых такая же как на рисунке 1*

Далее, следуя выражению (6), получаем величину и характер изменения эффективного коэффициента диффузии метана в блоках угля в течение десорбционного процесса. Результаты расчёта представлены на рисунке 3. При расчете предполагали, что средняя длина диффузионного пути равна «радиусу» гранул угля.

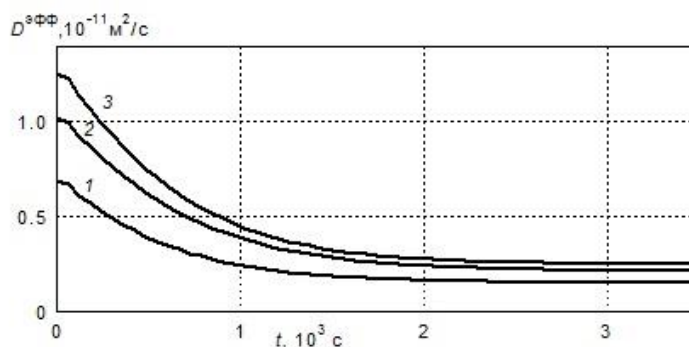


Рисунок 3. Характер изменения величины эффективного коэффициента диффузии метана в угле с течением времени десорбции. Нумерация кривых как на предыдущих рисунках

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры интерполяционных функций (1) для трех образцов угля сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры интерполяции хода десорбции метана из угля не разрушенного и разрушенных сдвиговыми напряжениями  $\sigma_3=4\text{МПа}$  и  $\sigma_3=14\text{МПа}$

Образцы угля	Параметры				Начальная газоносность, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$
	$a$ , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\tau_1$ , $10^3 \text{ с}$	$b$ , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\tau_2$ , $10^3 \text{ с}$	
Исходный	3,2	0,5	14,2	10,3	17,3
Разрушенный при $\sigma_3=4\text{МПа}$	3,9	0,51	9,5	7,3	13,3
Разрушенный при $\sigma_3=14\text{МПа}$	4,2	0,46	8,2	6,2	12,4

Из таблицы 1 видно, что с ростом уровня разрушающих напряжений сорбирующая способность угля уменьшается почти в 1,4 раза. Если следовать представлениям о закрытых порах в угле, то уменьшение газоносности в логично связывать с разрушением наиболее крупных закрытых пор в крупных угольных блоках. Однако последние исследования не подтверждают этот тезис и указывают на сорбцию газов в микро- и переходных порах угля.

Перечислим другие возможные причины уменьшения газоносности угля при разрушении. Все они, в той или иной мере, являются следствием изменения микроструктуры угля. Наличие в углях включений функциональных групп различного химического состава, и дисперсии проницаемости пор определяет широкий спектр энергии взаимодействий метана с веществом угля. Уменьшение сорбирующей способности может быть обусловлено

уменьшением потенциала взаимодействия метана с углём вследствие роста зияния микро- и переходных пор в угольных блоках угля. В работе [13] показано, что для интерпретации изменений метаноёмкости углей допустимо использование представлений о динамическом характере процессов сорбции и десорбции [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 объёма метана в не разрушенном и разрушенном сдвиговыми напряжениями угле. Наиболее информативным для этого может быть параметр уравнения Ленгмюра –  $b$ , который является индикатором сорбирующей способности адсорбента или степени локализации адсорбата. Его величина пропорциональна времени пребывания молекулы на активном центре:  $b \propto z^{-1} \nu^{-1} \cdot \exp(E/RT)$ . В этом выражении  $z$  – число молекул в заполненном монослое,  $\nu$  – частота колебаний молекулы адсорбата в перпендикулярном к поверхности тела направлении,  $E$  – энергия взаимодействия молекулы с веществом угля,  $R$  и  $T$  – универсальная газовая постоянная и абсолютная температура адсорбента, соответственно. Таким образом, чем меньше  $E$ , то есть слабее связь молекулы флюида с поверхностью пор угля, тем меньше время  $\tau$  пребывания молекул на поверхности угля и объём адсорбционного слоя молекул.

Если учитывать энергетический фактор и динамический характер сорбционных процессов, то простой расчет показывает, что уменьшение в 1,5 раза сорбирующей способности при разрушении угля должно быть вызвано изменением энергии взаимодействия молекул метана с углём на 0,85 кДж/моль. Нельзя исключать вероятность того, что на сорбирующую способность влияет весь комплекс перечисленных механохимических и энергетических факторов [15 - 18].

Интересную информацию дают данные об изменении характерного времени релаксации десорбции метана при разрушении угля. Как видно из рисунка 2, с ростом разрушающих напряжений параметр  $\tau^{dec}(t)$  уменьшается. Возможны несколько вариантов объяснения уменьшения времени  $\tau^{dec}(t)$  при разрушении угля. На первый взгляд, наиболее очевидным представляется вариант учитывающий рост проницаемости угля при разрушении. В этом случае происходит ослабление фильтрационного эффекта в открытых порах (уменьшается опорное давление в порах вблизи блоков). В результате ингибирующее влияние фильтрационных каналов снижается, а диффузионный поток газа из блоков возрастает. На рисунке 1 заметно, что с ростом разрушающих напряжений интенсивность эмиссии газа на начальном участке десорбции увеличивается почти в 2 раза. Однако далее в ходе десорбции это различие не превышает 1,5 раза.

Альтернативный вариант объяснения может быть связан с энергетикой взаимодействия метана с углем, поскольку характерное время релаксации зависит, согласно формулам (3) и (4), от энергии активации десорбции  $E$  через эффективный коэффициент диффузии.

Как видно из рисунков 2 и 3, уменьшение энергии  $E$  на 0,85 кДж/моль вполне объясняет не только уменьшение времени десорбции  $\tau^{dec}$  в 1,5 раза, но

и рост эффективного коэффициента диффузии из углей, разрушенных сдвиговыми напряжениями.

Как показывает эксперимент и расчет, кинетика выделения газа из угля при десорбции имеет широкий диапазон констант времени (характерных времён  $\tau^{dec}$ ) и величин эффективного коэффициента диффузии. Эти параметры зависят от стадии десорбции и других факторов, в частности, от энергии взаимодействия метана с веществом угля.

## 6. ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований выявлены особенности влияния уровня разрушающих уголь сдвиговых напряжений на сорбционные свойства угля и кинетику десорбции метана из угля. Обнаружено, что рост уровня сдвиговых напряжений сопровождается:

- а) уменьшением сорбирующей способности угля;
- б) ростом величины эффективного коэффициента диффузии метана в блоках угля;
- в) уменьшением характерного времени релаксации процесса десорбции.

Обсуждение экспериментальных результатов в рамках модели динамической сорбции показало, что все выявленные особенности сорбционной кинетики связаны только с энергетикой взаимодействия метана с углём.

Впервые выявлена зависимость энергии взаимодействия метана с веществом угля от уровня сдвиговых напряжений, разрушающих уголь.

Автор выражает признательность доктору физико-математических наук Л.И. Стефановичу и доктору технических наук А.В. Бурчаку за интерес к работе и полезные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревва, В.Н., Ульянова, Е.В. & Васильковский, В.А. (2007). Влияние вида напряженного состояния на сорбционные свойства углей при их разрушении в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия. *Геотехнічна механіка*, (69), 97–104.
2. Алексеев, А.Д., Ульянова, Е.В., Васильковский, В.А. [и др.]. (2008). Влияние нарушенности угольного пласта на кинетику выхода метана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (ОВ 7), 54–65.
3. Алексеев, А.Д., Ульянова, Е.В., Васильковский, В.А. [и др.]. (2010). Особенности структуры угля выбросоопасных зон. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (8), 164–179.
4. Алексеев, А.Д., Ульянова, Е.В., Ревва, В.Н. [и др.]. (2000). Изменение сорбционных свойств углей, подвергшихся трехосному нагружению. *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: X Международная научная школа, сб. научн. трудов*. Симферополь, 12–13.
5. Алексеев, А.Д., Ревва, В.Н. & Ульянова, Е.В. (2001). Влияние давления на сорбционные свойства угля. *Физика и техника высоких давлений*, (1), 9–11.
6. Василенко, Т.А., Поляков, П.И. & Ульянова, Е.В. (1998). Изменения в структуре ископаемых углей, возникающие под воздействием высоких давлений. *Физико-технические проблемы горного производства*, (1), 16–23.



7. Разумова, Л.Л., Касаточкин, В.И. & Воларович, М.П. (1955). Влияние высоких давлений на молекулярную структуру каменных углей. *ДАН СССР*, (6), 1033-1035.
8. Василенко, Т.А., Поляков, П.И. & Слюсарев, В.В. (2000). Исследование влияния высокого давления на систему уголь-газ. *Физика и техника высоких давлений*, т. 10, (4), 133–135.
9. Алексеев, А. Д. (2010). *Физика угля и горных процессов*. Киев: Наук. думка. – 423 с.
10. Васильковский, В.А. & Минеев, С.П. (2017). Распределение и механизмы движения метана в блоках угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (19), 19–32.
11. Васильковский, В.А. & Ульянова, Е.В. (2006). Некоторые аспекты интерпретации кинетики десорбции метана из каменного угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (9), 56–61.
12. Gorban, A.N., Sargsyan, H.P. & Wahab, H.A. (2011). Quasichemical Models of Multicomponent Nonlinear Diffusion. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, (5), 184–262.
13. Мулдер, М. (1999). *Введение в мембранную технологию*, М.: Мир, 513 с.
14. Френкель, Я. И. (1975). *Кинетическая теория жидкостей*, Л.: Наука, 591 с.
15. Булат, А.Ф., Скипочка, С.И., Паламарчук, Т.А. & Анциферов, В.А. (2010). *Метаногенерация в угольных пластах*, Днепропетровск: Лира ЛТД, 328с.
16. Шпак, А.П. Алексеев, А.Д., Ульянова, Е.В. [и др.]. (2012). Природа метаногенерации в угольных пластах. *Доповіди НАН України*, (6), 105–110.
17. Безручко, К.А., Пимоненко, Л.И., Бурчак, О.В. & Суворов, Д.А. (2018). Особливості атомно-молекулярної структури кам'яного вугілля в різних напружнр деформованих станах вуглепородного масиву. *Тектоніка і стратиграфія*, (45), 113–122.
18. Бутягин, П.Ю. (2006). *Химическая физика твердого тела*. М.: МГУ, 272 с.

## REFERENCES

1. Revva, V.N., Ul'yanova, Ye.V. & Vasil'kovskiy, V.A. (2007). Vliyaniye vida napryazhennogo sostoyaniya na sorbtсионnye svoystva ugley pri ikh razrushenii v usloviyakh ob'yemnogo neravnokomponentnogo szhatiya. *Geotekhnichna mekhanika*, (69), 97–104.
2. Alekseyev, A.D., Ul'yanova, Ye.V., Vasil'kovskiy, V.A. [i dr.]. (2008). Vliyaniye narushennosti ugol'nogo plasta na kinetiku vykhoda metana. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, (OV 7), 54–65.
3. Alekseyev, A.D., Ul'yanova, Ye.V., Vasil'kovskiy, V.A. [i dr.]. (2010). Osobennosti struktury uglya vybrosopasnykh zon. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, (8), 164–179.
4. Alekseyev, A.D., Ul'yanova, Ye.V., Revva, V.N. [i dr.]. (2000). Izmeneniye sorbtсионnykh svoystv ugley, podvergshikhsya trekhosnomu nagruzheniyu. *Deformirovaniye i razrusheniye materialov s defektami i dinamicheskiye yavleniya v gornykh porodakh i vyrabotkakh: X Mezhdunarodnaya nauchnaya shkola, sb. nauchn. trudov*. Simferpol', 12–13.
5. Alekseyev, A.D. Revva, V.N. & Ul'yanova, Ye.V. (2001). Vliyaniye davleniya na sorbtсионnye svoystva uglya. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, (1), 9–11.
6. Vasilenko, T.A., Polyakov, P.I. & Ul'yanova, Ye.V. (1998). Izmeneniya v strukture iskopayemykh ugley, vznikayushchiye pod vozdeystviyem vysokikh davleniy. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (1), 16–23.
7. Razumova, L.L., Kasatochkin, V.I. & Volarovich, M.P. (1955). Vliyaniye vysokikh davleniy na molekulyarnuyu strukturu kamennykh ugley. *DAN SSSR*, (6), 1033–1035.

8. Vasilenko, T.A., Polyakov, P.I. & Slyusarev, V.V. (2000). Issledovaniye vliyaniya vysokogo davleniya na sistemu ugol'-gaz. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, t.10, (4), 133–135.
9. Alekseyev, A. D. (2010). *Fizika uglya i gornyykh protsessov*. Kiyev: Nauk. dumka,. – 423 s.
10. Vasil'kovskiy, V.A. & Mineyev, S.P. (2017). Raspredeleniye i mekhanizmy dvizheniya metana v blokakh uglya. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (19), 19–32.
11. Vasil'kovskiy, V.A. & Ul'yanova, Ye.V. (2006). Nekotoryye aspekty interpretatsii kinetiki desorbtsii metana iz kamennogo uglya. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (9), 56–61.
12. Gorban, A.N., Sargsyan, H.P. & Wahab, H.A. (2011). Quasichemical Models of Multicomponent Nonlinear Diffusion. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, (5), 184–262.
13. Mulder, M. (1999). *Vvedeniye v membrannuyu tekhnologiyu*, M.: Mir, 513 s.
14. Frenkel', YA. I. (1975). *Kineticheskaya teoriya zhidkostey*, L.: Nauka, 591c.
15. Bulat, A.F., Skipochnka, S.I., Palamarchuk, T.A. & Antsiferov, V.A. (2010). *Metanogeneratsiya v ugol'nykh plastakh*, Dnepropetrovsk: Lira LTD, 328s.
16. Shpak, A.P. Alekseyev, A.D., Ul'yanova, E.V. [ta in.]. (2012). Pryroda metanogeneratsii v vuhil'nykh plastakh. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (6), 105–110.
17. Bezruchko, K.A., Pymonenka, L.I., Burchak, O.V. & Suvorov, D.A. (2018). Osoblyvosti atomno-molekulyarnoyi Struktury kam'yanoho vuhillya v riznikh napruzhnir deformovanikh stanakh vuhleporodnoho masyyvu. *Tektonika y stratihrafiya*, (45), 113–122.
18. Butyahyn, P.Yu. (2006). *Khimichna fizyka tverdoho tyla*. M.: MHU, 272 s.

#### **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Вивчити сорбційні властивості і кінетику десорбції метану для вугілля, що зазнало руйнування під дією зсувних напружень і виявити зв'язок між рівнем напруг і характерним часом релаксації десорбції.

**Методика.** Руйнування кубічних зразків вугілля зсувними деформаціями виконували за допомогою тривісного преса. При руйнуванні використовували рівні зсувних напружень 4 МПа і 14 МПа. Для вивчення процесу десорбції метану з вугілля застосований об'ємний метод. Використано новий метод аналізу експериментальних результатів заснований на уявленні про зміну характерного часу релаксації десорбції при емісії метану.

**Результати.** На основі експериментальних даних визначено параметри кінетики десорбції метану з трьох зразків вугілля: вихідного і зруйнованих зсувними напруженнями різного рівня. Порівняння параметрів кінетики показало, що з ростом рівня зсувних напружень характерний час десорбції метану скорочується, коефіцієнт ефективної дифузії метану збільшується, а сорбуюча здатність вугілля зменшується. Проведено якісний і кількісний аналіз альтернативних інтерпретацій особливостей зміни кінетичних параметрів десорбції метану з вугілля зруйнованого зсувними напруженнями різного рівня.

**Наукова новизна.** Обговорення експериментальних результатів в рамках моделі динамічної сорбції дає підставу вважати, що всі особливості сорбційної кінетики обумовлені тільки енергетикою взаємодії метану з вугіллям. Вперше виявлена залежність енергії взаємодії метану з речовиною вугілля від рівня зсувних напружень, що руйнують вугілля.

**Практична значимість.** Результати дослідження дозволяють діагностувати по пробам вугілля рівень зсувних напружень в шарі і можуть бути використані для ідентифікації та прогнозу газодинамічних проявів.

**Ключові слова:** характерний час, релаксація десорбції, рівень зсувних напружень, енергія взаємодії, об'ємний метод, емісія, десорбція метану, мікроструктура вугілля, сорбуюча здатність вугілля

#### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Изучить сорбционные свойства и кинетику десорбции метана для углей, претерпевших разрушение под действием сдвиговых напряжений и выявить связь между уровнем напряжений и характерным временем релаксации десорбции.

**Методика.** Разрушение кубических образцов угля сдвиговыми деформациями производили с помощью трёхосного пресса. При разрушении использовали уровни сдвиговых напряжений 4 МПа и 14 МПа. Для изучения процесса десорбции метана из угля применен объёмный метод. Использован новый метод анализа экспериментальных результатов, основанный на представлении об изменении характерного времени релаксации десорбции при эмиссии метана.

**Результаты.** На основе экспериментальных данных определены параметры кинетики десорбции метана из трёх образцов угля: исходного и разрушенных сдвиговыми напряжениями различного уровня. Сравнение параметров кинетики показало, что с ростом уровня сдвиговых напряжений характерное время десорбции метана сокращается, коэффициент эффективной диффузии метана увеличивается, а сорбирующая способность угля уменьшается. Проведен качественный и количественный анализ альтернативных интерпретаций особенностей изменения кинетических параметров десорбции метана из угля, разрушенного сдвиговыми напряжениями различного уровня.

**Научная новизна.** Обсуждение экспериментальных результатов в рамках модели динамической сорбции даёт основание считать, что все особенности сорбционной кинетики обусловлены только энергетикой взаимодействия метана с углём. Впервые выявлена зависимость энергии взаимодействия метана с веществом угля от уровня сдвиговых напряжений, разрушающих уголь.

**Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют диагностировать по пробам угля уровень сдвиговых напряжений в пласте и могут быть использованы для прогноза газодинамических проявлений.

**Ключевые слова:** характерное время, релаксація десорбції, рівень сдвиговых напряжений, энергия взаимодействия, объёмный метод, эмиссия, десорбция метана, микроструктура угля, сорбирующая способность угля

#### ABOUT AUTHORS

Vasylovskiy Vsevolod, Doctor of Technical Science, Department Head, Institute for Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: lod.vasylovskiy@ukr.net