

Д-р техн. наук С. П. Минеев,  
канд. техн. наук А. А. Прусова,  
канд. техн. наук М. Г. Корнилов,  
(ИГТМ НАН Украины),  
канд. техн. наук О. В. Витушко  
(ООО «Шахтостроймонтаж»)

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОЛЬМЕРОВСКОЙ ДИФФУЗИИ МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Встановлені кількісні значення параметрів, що визначають коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугіллі, та проведені його чисельні розрахунки. Виконано оцінку ступеня активації фольмерівської дифузії сорбованого у вугіллі метану та встановлено закономірність змінення коефіцієнта цієї дифузії зі збільшенням глибини розробки вугільного пласта

## THE COEFFICIENTS OF VOLMER DIFFUSION OF METHANE IN A COAL SEAM

The quantitative values of parameters which determine the coefficient of Volmer diffusion of methane in coal are set, and it's numerical calculations are conducted. The estimation of degree of activating of Volmer diffusion of sorbed methane in coal is executed and conformity to the law of charge of coefficients of this diffusion with increase of depth of work of coalmine is set.

В настоящее время при проведении расчетов, связанных с оценкой газоотдачи угольного массива пользуются, как правило, эффективным значением коэффициента диффузии [1]. Подобное осреднение существенно упрощает расчеты, но при этом теряется информация о физических процессах, обуславливающих высвобождение метана из угольного пласта, что особенно важно при установлении безопасных условий ведения горных работ. К одному из типов диффузии, участвующих в процессе газоотдачи метана углем относится фольмеровская диффузия. Она происходит в условиях микропористого пространства, когда размеры его пустот меньше длины свободного пробега молекул метана. При этом весьма важным является то, что коэффициент фольмеровской диффузии учитывает размер микропустот. Это, позволяет учесть процессы набухания или усадки за счет диффузии метана в твердом скелете угля, которые приводят к изменению объема пор и трещин, определяющие, в конечном итоге, весь фильтрационный поток метана, десорбирующегося из угольного массива. В связи с этим, определим численные значения коэффициентов фольмеровской диффузии метана при его десорбции из угольного пласта.

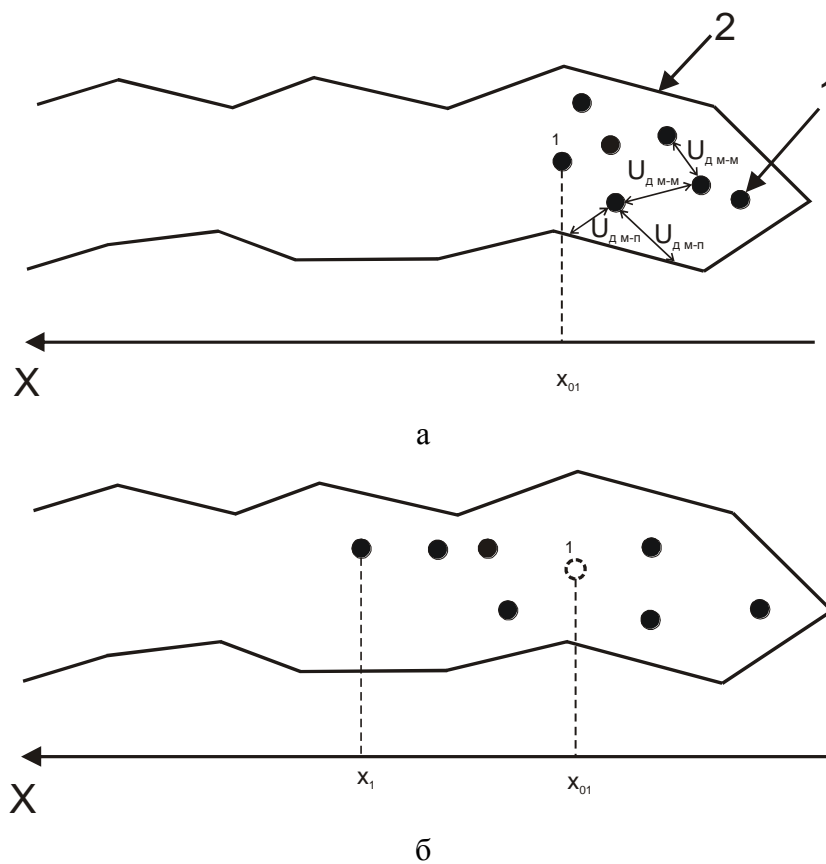
Пусть в начальный момент времени, когда пласт не затронут горными работами, молекулы метана находятся в открытых порах угольного пласта в равновесии. При этом будем предполагать, что основной объем метана сосредоточен, в соответствии с законом Ван-дер-Ваальса [2], вблизи закрытой поверхности поры, как показано на рисунке 1.

Вследствие нарушения равновесия угольного пласта горными работами происходит перераспределение в пласте напряжений и концентрации метана между формами его существования в угле. При этом диффузия происходит в

направлении меньшей концентрации газа вдоль оси  $X$ , как показано на рисунке 1 б, до установления нового равновесного состояния. Расчеты коэффициента фольмеровской диффузии метана в поре угля  $D_\phi$  производились на основе методики моделирования процесса активации диффузии метана в угольном пласте, изложенной в работе [3], с использованием уравнения [1]:

$$D_\phi = D_{of} \times \sqrt{T} \exp\left(\frac{Q - E_{af}}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $D_{of}$  – коэффициент фольмеровской диффузии при  $T \rightarrow \infty$ ;  $E_{af}$  – энергия активации фольмеровской диффузии;  $R$  – газовая постоянная;  $Q$  – энергия адсорбции.



1 – молекула метана; 2 – стенка поры;  $U_{д м-м, м-п}$  – потенциал дисперсионного взаимодействия, соответственно, между молекулами метана, а также молекулой метана и стенкой поры

Рис. 1 – Расчетная модель состояния молекул метана в открытой микропоре угля ненарушенного горными работами угольного пласта (а) и при нарушении сорбционного равновесия (б)

На первом этапе расчетов определялась энергия системы «пора – молекула метана» в момент времени  $t=0$  в соответствии с соотношением (1). На втором

этапе, используя закон Ньютона, вычислялась сила, действующая на каждую молекулу метана со стороны атомов стенки поры. На третьем этапе для определения компонент вектора скоростей и координат молекул интегрировались уравнения Ньютона в соответствии с алгоритмом «чехарда» [3]. На четвертом выполнялась процедура поддержания температуры в пределах указанного ее постоянного значения [3]. Пятым этапом являлась запись в файл в виде электронной таблицы координат молекул метана  $x$ ,  $y$  и  $z$ , производился расчет и усреднение их кинетической энергии, а также среднеквадратичного отклонения этой энергии. Последнее необходимо для оценки стабильности моделирования процесса диффузии. На шестом задавалось приращение  $dt$  и осуществлялся переход к первому этапу, пока не была достигнута продолжительность моделирования, равная  $T_t$ .

По полученным данным коэффициент фольмеровской диффузии рассчитывали, в соответствии с рисунком 1, по формулам:

$$D_x^\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{0i} - x_i)^2}{2t}; D_y^\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(y_{0i} - y_i)^2}{2t}; D_z^\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(z_{0i} - z_i)^2}{2t}, \quad (2)$$

где  $x_{0i}$ ,  $y_{0i}$ ,  $z_{0i}$  – координаты начального положения  $i$ -той молекулы метана;  
 $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  – координаты  $i$ -той молекулы в момент времени  $t$ ;  
 $N$  – количество молекул метана в исследуемой системе.

Средний коэффициент диффузии молекул метана определялся как среднее арифметическое коэффициентов  $D_x^\phi$ ,  $D_y^\phi$ ,  $D_z^\phi$ . При проведении расчетов продолжительность моделирования была принята равной  $T_t=50$  пс, шаг приращения времени составлял – 0,001 пс. Температура исследуемой системы принималась от 290 до 320 К, диаметр пор составлял 12, 10 и 9 Å. Результаты определения коэффициентов фольмеровской диффузии в зависимости от температуры и глубины залегания угольного пласта при различных размерах пор угля, представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, коэффициент фольмеровской диффузии, в отличие от других типов диффузии, с повышением температуры, а, следовательно, и с увеличением глубины разработки пластов, уменьшается. Причем уменьшение размера пор, например, всего на 3 Å приводит к существенному – до 30 % снижению коэффициента фольмеровской диффузии.

С целью упрощения расчетов параметров, входящих в соотношение (1), прологарифмируем это уравнение:

$$\ln D_\phi = \ln(D_{0\phi} \times \sqrt{T}) + \frac{(Q - E_{af})}{R} \frac{1}{T}. \quad (3)$$

В логарифмических координатах графики полученных зависимостей коэффициента фольмеровской диффузии от температуры представлены на рисунке 3.

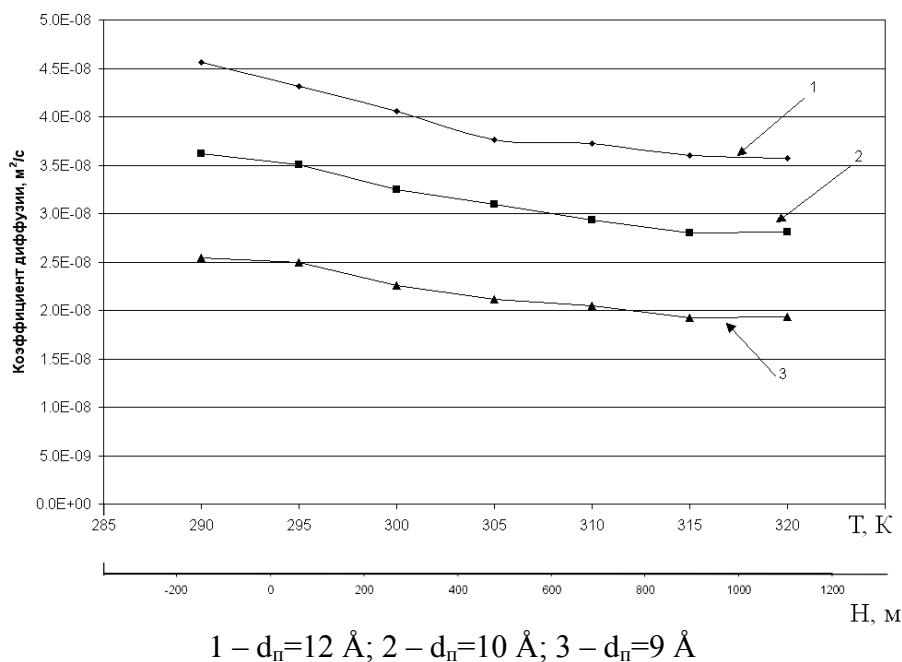


Рис. 2 – Зависимость коэффициента фольмеровской диффузии метана в угольном пласте от глубины его залегания (H) и температуры (T) при различном диаметре пор в угле (d<sub>p</sub>)

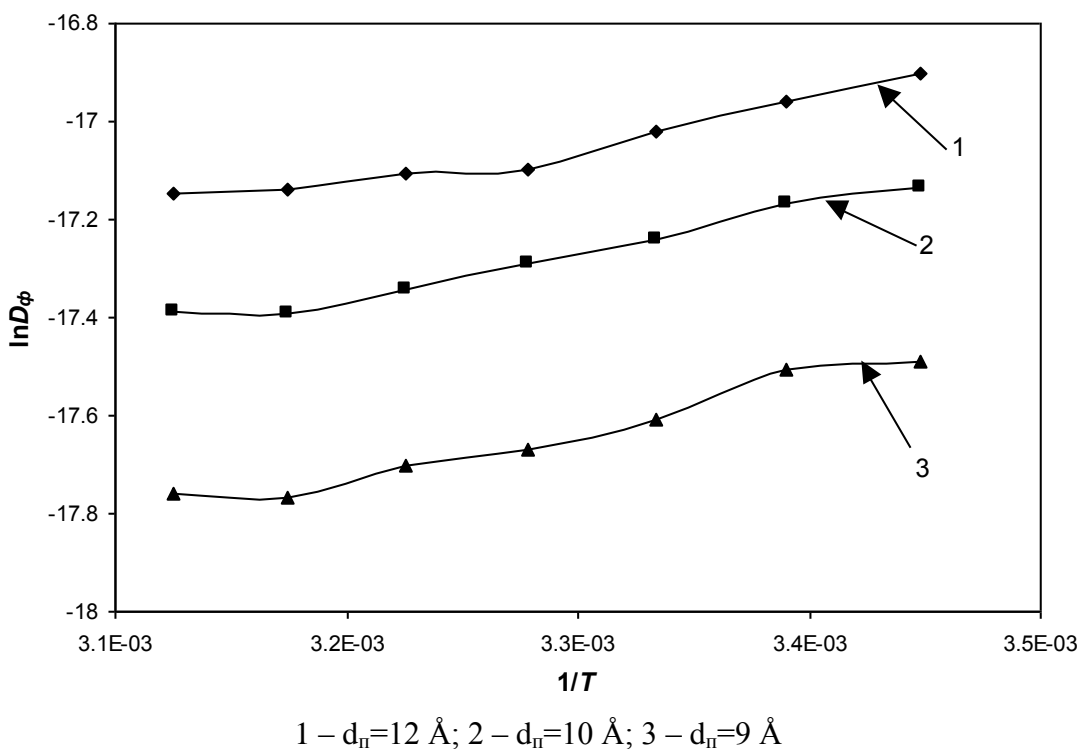


Рис. 3 – Зависимость коэффициента фольмеровской диффузии метана в порах угля различного диаметра (d<sub>p</sub>) от обратной температуры 1/T

Тогда в результате аппроксимирования, представленных на рисунке 3 зависимостей логарифма коэффициента фольмеровской диффузии от обратной тем-

пературы, нетрудно получить основные параметры, входящие в соотношение (1). При этом единственной неизвестной величиной остается энергия адсорбции  $Q$ . Она будет равна удвоенной потенциальной энергии молекулы метана  $E$ , определенной ранее в работе [3] с учетом радиуса пор, поскольку при движении молекула сталкивается с обеими стенками поры и попеременно попадает в их поле притяжения:

$$Q[\text{кДж/моль}] = 2 * E = 2 * 6,69 * \exp(-d_n / 16,3) + 3,8, \quad (5)$$

где  $d_n$  – размер поры, измеряется в  $\text{\AA}$ .

Численные значения параметров аппроксимации графиков, представленных на рисунке 3, которые соответствуют константам в соотношении (1), определяющим коэффициент фольмеровской диффузии метана в угле, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры, определяющие коэффициент фольмеровской диффузии метана в угле, выраженный соотношением (1)

Диаметр пор, $\text{\AA}$	$D_{of}$ , $\text{м}^2/\text{с}$	$\frac{(Q - E_{af})}{R}$ , К	$R^2$	$E$ , кДж/моль	$E_{af}$ , кДж/моль	$D_{\phi}$ , $\text{м}^2/\text{с}$ ( $T=40^\circ\text{C}$ )
12	$5,75 \cdot 10^{-11}$	939,5	0,94	7,8	6,2	$3,58 \cdot 10^{-8}$
10	$4,44 \cdot 10^{-11}$	1023,1	0,97	8,5	6,3	$2,80 \cdot 10^{-8}$
9	$3,21 \cdot 10^{-11}$	1048,9	0,95	9,1	6,5	$1,93 \cdot 10^{-8}$

Как видно из таблицы 1, коэффициент фольмеровской диффузии метана с уменьшением диаметра пор в угле от 12  $\text{\AA}$  до 9  $\text{\AA}$  изменяется весьма существенно – от (3,6 до 1,9)  $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ . При этом значения энергии активации фольмеровской диффузии  $E_{af}$  метана в порах угля находятся в пределах 6,2 – 6,5 кДж/моль. Это в 5 – 6 раз меньше установленных в работе [4] значений энергии активации диффузии в твердом скелете угля. В то же время они составляют порядка 60 % от средней энергии молекул метана, которая для исследованного диапазона температур 290 – 230 К, согласно соотношению  $E = \frac{3}{2}RT$ , составляет 3,6 – 4 кДж/моль. Последнее свидетельствует о том, что далеко не все молекулы метана при нарушении сорбционного равновесия способны оторваться от стенки поры, чтобы совершить диффузионный скачок. Таким образом, можно сделать вывод, что отработка угольного пласта либо его дегазация, проводимые без специальных мероприятий, практически всегда будут сопровождаться вероятностью внезапного высвобождения некоторых объемов ранее неактивированных сорбированных молекул метана, которое при определенном сочетании факторов может реализоваться в газодинамическое явление. Причем, учитывая, как выше установлено, что с увеличением глубины разработки значение коэффициента фольмеровской диффузии уменьшается, т. е. снижается длина диффузионного скачка [3], то в этом случае вероятность такой ситуации с повышением глубины будет увеличиваться. В связи с этим, поскольку объем высвобо-

ждаемого метана при диффузии соизмерим с объемом свободного метана в зоне выбросоопасного угольного пласта [4], то при ведении горных работ в шахте необходимо выполнение специальных мероприятий, в которых должен быть предусмотрен комплекс технологических воздействий, направленных, кроме всего прочего, и на управление параметрами диффузии метана у угле, в частности, на параметры диффузионного скачка. В противном случае добыча угля и газа с увеличением глубины разработки довольно часто будет сопровождаться газодинамическими проявлениями горного давления, которые в настоящее время относят к «непонятным по происхождению», что имеет место при расследовании ряда аварий на шахтах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Малышев Ю. Н. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю. Н. Малышев, К. Н. Трубецкой, А. Т. Айруни. – М. : Изд-во Академии горных наук, 2000. – 519 с.
2. Бараш С. Ю. Силы Ван-дер-Ваальса / С. Ю. Бараш. – М. : Наука, 1988. – 344 с.
3. Минеев С. П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С. П. Минеев, А. А. Прусова, М. Г. Корнилов. – Днепропетровск: Вебер, 2007. – 252 с.
4. Минеев С. П. Свойства газонасыщенного угля / С. П. Минеев. – Днепропетровск: НГУ, 2009. – 219 с.

**УДК 662.267.5**

Заст. техн. директора О. І. Сафонов,  
заст. ген. директора В. В. Соколовський,  
(ДП Львіввугілля)

#### **МЕТОДИ БОРОТЬБИ З МЕТАНОМ В ОЧИСНИХ І ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБКАХ ШАХТИ «СТЕПОВА» ДП «ЛЬВІВВУГІЛЛЯ»**

В статье обобщен практический опыт борьбы с метаном в очистных и подготовительных выработках шахты «Степная» ГП «Львовуголь».

#### **ABATEMENT OF METHANE IN REFINING AND DEVELOPMENT WORKINGS MINE "STEPPE" STATE ENTERPRISE "LVOVUGOL"**

The article summarizes the practical experience in abatement methane in refining and development mine workings of the mine "Steppe" state enterprise "Lvovugol".

Безпека гірничих робіт є пріоритетним завданням держави і інженерно-технічного персоналу вугільних шахт, що підтверджено Постановою Кабінету міністрів України № 939 «Про затвердження програми підвищення безпеки праці на вугільних шахтах» та іншими законодавчими документами. Головне завдання охорони праці полягає в усуненні причин небезпеки на робочих місцях за рахунок здійснення науково-обґрунтованих профілактичних заходів. Однією з основних причин небезпеки на шахті «Степова» ДП «Львіввугілля» є значне метановиділення в гірничі виробки і суфлярні скупчення метану, в результаті чого підвищується потенційна небезпека праці шахтарів і стримуються темпи гірничих робіт. У зв'язку із цим надзвичайно важливим є впровадження