

Доктор техн. наук С. П. Минеев,  
канд. техн. наук А. А. Прусова,  
канд. техн. наук М. Г. Корнилов  
(ИГТМ НАН УКРАИНЫ)

## **ОЦЕНКА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ МЕТАНА В МИКРОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

Встановлено залежність для визначення коефіцієнту твердотільної дифузії метану у привибійній зоні вугільного пласта на великій глибині з урахуванням конформаційного механізму деформування мікроструктури вугілля середнього ступеня метаморфізму, швидкості ведення гірничих робіт та відстані від вибою до максимуму опорного тиску.

## **ESTIMATION OF SOLID-STATE DIFFUSION COEFFICIENT OF METHANE IN THE MICROPOROUS STRUCTURE OF COAL SEAM**

The dependence for determining the solid-state diffusion coefficient of methane in the face zone of the coal seam at a large depth, taking into account the conformational mechanism of deformation of the microstructure of coal of average degree of methamorphizm depending on the speed of mining operations and the distance from breast to the bearing pressure maximum.

В настоящее время, как известно [1, 2], неоспоримым фактом является то, что при оценке безопасных условий ведения горных работ на выбросоопасных угольных пластах необходимо выполнять расчеты всех типов диффузии метана, имеющих место в структуре угольного пласта, а не их осредненного показателя, как часто делают в процессе проведения этих расчетов. Одним из таких типов диффузии является твердотельная диффузия, которая имеет место в межпористой структуре угольного пласта. При вычислении этой диффузии важным моментом является учет конформационного механизма деформирования микроструктуры угля, приводящий к изменению коэффициента твердотельной диффузии. Однако проведенные к настоящему времени расчеты не учитывают этого важного механизма, обуславливающего процесс диффузии метана в угольном пласте. Вследствие чего может теряться информация о моменте зарождения опасной ситуации при газодинамическом проявлении горного давления. В связи с этим, в работе была сделана попытка ликвидировать данный пробел в указанной расчетной схеме твердотельной диффузии метана в призабойной зоне угольного пласта.

Согласно конформационному механизму релаксации, при изменении давления в угле происходят конформационные перестройки в алифатической бахроме, обуславливающие изменение межслоевых расстояний в молекулярной структуре угля. Данные перестройки, в свою очередь, приводят к изменению коэффициента твердотельной диффузии метана, который можно рассчитать по модели Пейса-Дейтинера [1], наиболее полно связывающей параметры молекулярной структуры вещества с его диффузионной способностью:

$$D_d = (9.1 \times 10^{-4}) \frac{\bar{L}^2 \left( \frac{\varepsilon^*}{r^*} \right)^{5/4} \left( \frac{\sqrt{\beta}}{m^*} \right)^{1/2}}{\lambda^2} \frac{d'}{\partial \Delta E / \partial d} \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\Delta E = 5,23 \left( \frac{\beta}{d'} \right)^{1/4} \left( \frac{\varepsilon^* r^*}{\lambda^2} \right)^{3/4} \left\{ 0,077 \left[ \left( \frac{r^*}{l} \right)^{11} (l - 10d') - r^* \left( \frac{r^*}{r^* + d} \right)^{10} \right] - \right. \\ \left. - 0,580 \left[ \left( \frac{r^*}{l} \right)^5 (l - 4d') - r^* \left( \frac{r^*}{r^* + d} \right)^4 \right] \right\}^{3/4}. \quad (2)$$

где  $\varepsilon^*$  и  $r^*$  – средние значения параметров потенциала Леннарда-Джонса для элементов цепи;  $\lambda$  – среднее расстояние между сегментами полимера, измеренное вдоль оси цепи;  $\beta$  – средняя эффективная константа деформации валентного угла на единицу длины сегмента;  $d' = d + r^* - l$  – эквивалентный диаметр молекулы газа;  $d$  – газокинетический диаметр молекулы газа;  $l$  – расстояние между структурными цепями алифатической бахромы;  $m^*$  – молекулярная масса единицы длины сегмента алифатической бахромы угля;  $\Delta E$  – минимальная энергия, необходимая для разделения структурных цепей алифатической бахромы на расстояние, равное диаметру молекулы;  $\bar{L}$  – длина диффузионного скачка молекулы;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура угольного пласта.

При этом величина времени релаксации определяется протяженностью восходящей ветви эпюры опорного давления  $a$  и скоростью подвигания забоя выработки  $V$ :

$$\tau = \frac{a}{V}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет установить максимальную продолжительность протекания релаксационных процессов в молекулярной структуре угольного вещества. С другой стороны, известно [3], время релаксации связано с энергией активации конформационных переходов следующим соотношением:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{E_a}{RT}, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – продолжительность периода теплового колебания атомов в молекулярной структуре угля, имеет порядок  $10^{-12} - 10^{-13}$  с;  $E_a$  – энергия активации конформационных перестроек, которую на основании результатов работы [1] можно определить, пользуясь таблицей 1.

Таблица 1 – Распределение энергии активации конформационных перестроек в молекулярной структуре угля

Среднее значение диапазона энергии активации, кДж/моль	Долевое соотношение диапазона энергии активации структуры угля с различным содержанием углерода		
	87,7 %	89,1%	91,26 %
12,5	0.074074	0.146667	0.03125
37,5	0.148148	0.266667	0.25
62,5	0.185185	0.173333	0.140625
87,5	0.111111	0.053333	0.109375
112,5	0.111111	0.066667	0.109375
137,5	0.049383	0.08	0.046875
162,5	0.074074	0.08	0.0625
187,5	0.098765	0.04	0.078125
212,5	0.024691	0.013333	0.03125
237,5	0.049383	0	0.046875
262,5	0.049383	0.026667	0.03125
287,5	0	0	0.03125
312,5	0	0.026667	0.015625
337,5	0.024691	0	0.015625

Температуру на глубине залегания угольного пласта вне зоны влияния выработки можно установить по геотермическому градиенту [4] по формуле:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{zp}}{100}(h_2 - h_1), \quad (5)$$

где  $T_2$  и  $T_1$  – температуры на глубинах  $h_2$  и  $h_1$  соответственно;  $T_{zp}$  – изменение температуры пород в градусах Цельсия на 100 м.

Для Донецкого бассейна геотермический градиент обычно колеблется в пределах 2,2 – 2,6 °С на 100 м [4], и составляет, в среднем, 2,4 °С на 100 м. Температура  $T_1$  для этого бассейна составляет 20,5 °С на глубине 400 м [4]. В призабойной области пласта имеет место снижение температуры, обусловленное десорбцией метана. Ее величину можно определить по данным, приведенным в работе [5]. При этом в расчетах принималось, что начальная газоносность пласта составляет 32 м<sup>3</sup>/т.

Таким образом, построенная по данному алгоритму на основании формул (1) и (2) зависимость коэффициента твердотельной диффузии метана в угле с содержанием углерода 87,7% от расстояния до максимума опорного давления и скорости подвигания забоя на глубине 1000 м представлена на рисунке 1.

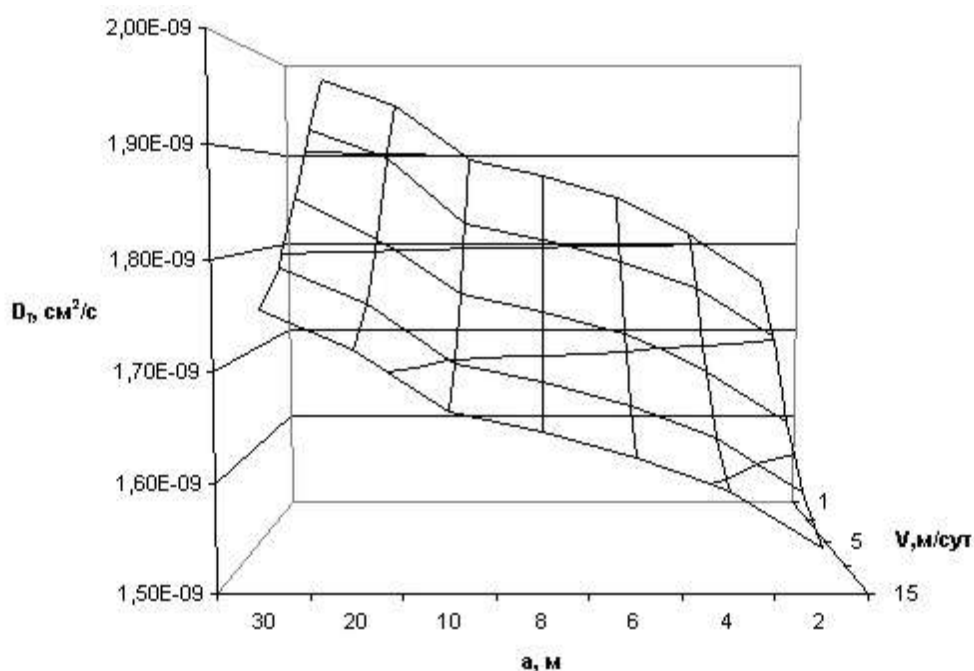


Рис. 1 –Зависимость коэффициента твердотельной диффузии метана в угле от расстояния до максимума опорного давления  $a$  и скорости подвигания забоя выработки  $V$

Вид функции, представленной на рисунке 1, устанавливался на основе ее аппроксимации средним арифметическим двух функций одного переменного – протяженности восходящей ветви эпюры опорного давления ( $a$ ) и скорости подвигания забоя ( $V$ ). В результате было получено, что коэффициент твердотельной диффузии можно описать следующей функцией:

$$D_T = (D_{T0V} + A_V \exp(-a/t_V) + D_{T0a} + A_a \exp(-V/t_a))/2. \quad (6)$$

где  $D_{T0a}$ ,  $D_{T0V}$  – значения коэффициентов твердотельной диффузии метана в угле в случае, когда, соответственно, скорость подвигания забоя и расстояние от забоя до максимума опорного давления стремятся к бесконечности;

$A_a$ ,  $A_V$  – значения коэффициентов твердотельной диффузии метана в угле, соответственно, при  $V=0$  плюс значение  $D_{T0V}$  и  $a=0$  плюс значение  $D_{T0a}$ , то есть этот параметр характеризует амплитуду изменения коэффициента диффузии;

$t_a$   $t_V$ – параметры, характеризующие скорость изменения коэффициента твердотельной диффузии метана в угле, соответственно, с изменением скорости подвигания забоя и расстояния от забоя до максимума опорного давления. Чем они больше, тем медленнее коэффициент диффузии приближается к своему предельному значению, соответственно,  $-D_{T0a}$  и  $D_{T0V}$ .

Вычисление параметров, входящих в формулу (6) проводилось путем численного подбора с контролем точности аппроксимации по коэффициенту корреляции, определяемому по формуле:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X * \sigma_Y}, \quad (7)$$

где  $\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})$ ,  $x_j y_j$  – значения коррелируемых величин,

а  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – их средние значения.

Результаты расчета параметров аппроксимации для функции (6) представлены в таблице 2. При этом коэффициент корреляции составил 0,9964.

Таблица 2 – Параметры аппроксимации для функции (6)

Параметр аппроксимации	$D_{T0V}$	$A_V$	$t_V$	$D_{T0a}$	$A_a$	$t_a$
Численное значение параметра	$1,53 * 10^{-9}$	$6,1 * 10^{-10}$	4,6	$1,99 * 10^{-9}$	$-5,82 * 10^{-10}$	10,0

Таким образом, в данной работе определена зависимость для определения коэффициента твердотельной диффузии метана в призабойной зоне угольного пласта на большой глубине с учетом конформационного механизма деформирования угля средней степени метаморфизма, скорости ведения горных работ и расстояния от забоя до максимума опорного давления, которая выражается формулой (6) с параметрами аппроксимации, представленными в таблице 2. Анализ этой зависимости показывает, что, как и следовало ожидать, увеличение расстояния от кромки забоя до максимума опорного давления, а также снижение скорости подвигания забоя приводит к увеличению коэффициента твердотельной диффузии метана в угле. Это будет проявляться в более равномерном высвобождении метана из межслоевого пространства угля, и, как следствие, приведет к понижению степени его выбороопасности. Однако характерно то, что, как показали расчеты, величина протяженности восходящей ветви эпюры опорного давления, при которой коэффициент твердотельной диффузии перестает зависеть от ее величины, составляет порядка 40 м. А значение скорости подвигания забоя, при которой коэффициент твердотельной диффузии метана в угле перестает снижаться до своего предельного значения, составляет =18 м/сут. Расчеты также показали, что при увеличении расстояния до максимума опорного давления с 6 до 30 м и скорости подвигания забоя 15 м/сут, коэффициент твердотельной диффузии возрастает с  $1,62 * 10^{-9}$  до  $1,75 * 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с. При уменьшении скорости подвигания забоя с 15 до 10 м/сут и расстоянии до максимума опорного давления, составляющем 10м, коэффициент твердотельной диффузии возрастет с  $1,66 * 10^{-9}$  до  $1,69 * 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минеев, С. П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С. П. Минеев, А. А. Прусова, М. Г. Корнилов – Днепропетровск: Вебер, 2007. – 252 с.
2. Малышев, Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю. Н.

Малышев, К. Н. Трубецкой, А. Т. Айруни. – М.: АГН, 2000.-519 с.

3. Кулезнев, В. Н. Химия и физика полимеров / В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнев. – М.: Высшая школа, 1988.– 312 с

4. Методика геофизических исследований скважин Донбасса / И. А. Гаркаленко, В. Ю. Зайченко, А. Ф. Михелько, Н. П. Развалов. – Киев: Наукова Думка, 1971. – 156 с.

5. Некоторые результаты натурных исследований температуры угольных пластов в зоне влияния горных выработок / Г. И. Фейт, Э. И. Гайко, С. М. Денисенко, В. М. Кайдан // Вопросы вентиляции и борьбы с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1977. - Вып. 157. – С. 141-144.

**УДК 622.411.332:550.832.012**

А.А. Каргаполов, вед. инженер,  
С.Ю. Макеев, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины),  
В.К. Свистун, директор (ГП «Днепрогеофизика»)  
Д.П. Гуня, канд. техн. наук, зам. директора  
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

### **КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН СКОПЛЕНИЙ МЕТАНА**

Стаття присвячена аналізу та обґрунтуванню можливості комплексного використання методів геофізичних досліджень свердловин, гравірозвідці і геологічних методів для виявлення та уточнення зон скупчення метану і місць локального прояву колекторів, сприятливих для буріння дегазаційних свердловин.

### **COMPLEX USE OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL METHODS FOR THE SELECTION OF METHANE ACCUMULATIONS**

The article is sanctified to the analysis and ground of possibility by the complex use of geophysical methods researches of mining holes, gravitational exploration and geological methods for a discovery and clarification of methane zones accumulation and places of collectors local display, which friendly to the boring drilling of decontamination mining holes.

Метан, содержащийся в углепородном массиве, можно рассматривать в двух ипостасях: во-первых, как источник опасности при добыче угля, во-вторых, как ценное сырье для топливной промышленности. В каждом из этих случаев необходимо как можно более точно выделять зоны скопления метана для того, чтобы в последующем либо использовать эту информацию для прогноза выбросоопасности при разработке угольного месторождения, либо указать наиболее благоприятные места для заложения добычных скважин. Обнаружение и уточнение таких зон – одна из наиболее трудных и важных задач при решении проблемы угольного метана. В настоящее время двумя основными методами их выявления можно считать разведочное бурение и геофизику.

Неоспоримое преимущество первого метода заключается в возможности непосредственного изучения вещества и свойств горных пород. Но оно нивелируется ввиду высокой стоимости скважин, что делает его экономически не выгодным. Кроме того, здесь затруднено выявление локальных неоднородностей ввиду редкой сети скважин, из-за чего в ряде случаев