

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.453

СИСТЕМНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИОННОГО И ДИФфуЗИОННОГО МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

М. В. Курленя¹, К. Х. Ли², В. Г. Казанцев², Ли Хи Ун², С. В. Кулявцева³

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: kurlenya@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²АО “НЦ ВостНИИ”,
E-mail: leeanatoly@mail.ru, ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия

³ОАО ФНПЦ “Алтай”,
E-mail: wts-01@mail.ru, ул. Социалистическая, 1, 659322, г. Бийск, Россия

Рассмотрены механизмы массопереноса газа при создании обнажения в угольном массиве исходя из феноменологических представлений о его газоносности. Проведено разделение явления массопереноса на основные составляющие — фильтрацию и диффузию, позволившее выделить наиболее важные их черты в общем процессе движения газа.

Угольный пласт, дегазация, фильтрация, диффузия, сорбционное давление, концентрация газа, пористость

DOI: 10.15372/FTPRPI20230305

В современных исследованиях широко используются две модели для описания системы “уголь – метан”. Согласно одной из них, метан находится в свободном и адсорбированном состоянии, фильтрационное пространство обеспечивается обширной сетью мелких открытых пор, через которые осуществляется связь с обнажениями [1 – 3]. Другая модель содержит развитие представлений о блоковом строении угля [4]. Угольный массив состоит из отдельностей и блоков, большей частью с образованием твердого углегазового раствора в виде адсорбированных молекул [5 – 7]. Структура газоносности пласта в невозмущенной зоне включает в себя до 12 % свободного и до 85 % сорбированного в блоках газа [8]. Поры сообщаются с внешним пространством и служат путями эвакуации газа после его диффузии из микроблоков. Ведущим процессом является фильтрация. По мере фильтрации давление газа в фильтрационном объеме снижается, создавая предпосылку возникновения термодинамической силы для десорбции метана из блоков в фильтрационный объем посредством диффузии.

Разработка прогнозных моделей на основе представлений о блоковом строении угля с точки зрения мезомеханики не представляется возможной из-за неопределенности иерархии блоков, текстуры массива, наличия трещин и пор в свете их размеров, размеров блоков и конфигурации поверхности фаз, а также необходимости учета их бесконечного множества.

Попытки отечественных и зарубежных ученых перекинуть мостик непосредственно от мезомеханического подхода описания структуры массива к феноменологическому не привели к успеху. Выход из тупика подобен решению проблемы механики твердого тела, когда атомарное строение материала вынужденно представляется непрерывным массивом в соответствии с гипотезой сплошной среды.

По аналогии, оставаясь на феноменологических физико-механических суждениях о структуре массива, углепородный пласт представим некоторой идеальной средой, в которой отдельные поры и трещины не имеют значения, поскольку в элементарном объеме (в объеме сплошной среды) раскрытость и длина трещин несоизмеримо меньшие, чем исследуемая область. Таким образом, газоносный пласт характеризуется как некая идеальная сплошная среда с равномерными или частично равномерными распределенными газодинамическими свойствами.

Для построения феноменологической модели массопереноса примем известные общие закономерности, отражающие физико-механические и газодинамические свойства углепородного массива [9–14].

1. Сорбционное давление — давление газа в порах и трещинах единого фильтрационного пространства ненарушенного массива зависит от глубины залегания пласта и вычисляется по закону, близкому к гидростатическому [9]:

$$P_1 = \delta \gamma_1 \frac{H}{10^5}, \quad (1)$$

где δ — коэффициент несоответствия, учитывающий верхнюю границу зоны метановых газов угольных пластов (глубина от дневной поверхности 100–230 м, для шахт Кузбасса $\delta \approx 0.863$); γ_1 — удельный вес воды, кг/м³; H — глубина залегания пласта, м.

2. Для твердого раствора содержание метана устанавливается с помощью экспериментальных изотерм сорбции, связывающих концентрацию газа с сорбционным давлением, температурой и временем. Наиболее часто используются изотермы Генри, Ленгмюра, Фрейндлиха, уравнение Брунауэра–Эммета–Теллера и др. модели. В настоящей работе принята изотерма сорбции Ленгмюра [11, 12]:

$$C_1 = \frac{abP_1}{1+bP_1}, \quad (2)$$

C_1 — концентрация сорбированного газа, кг/м³; a [кг/м³], b [м²/кг] — постоянные изотермы.

3. Концентрация свободного газа в порах определяется сорбционным давлением и эффективной пористостью угля [14]:

$$C_2 = P_1 \frac{m}{R_m T}. \quad (3)$$

Здесь R_m — газовая постоянная для метана; m — эффективная пористость или открытая пористость (суммарный объем пор в расчете на единицу объема угля, сообщающихся каналами с обнажением); T — абсолютная температура.

4. Моделирование концентрационных профилей и потоков молекул диффузанта в гетерогенной сорбционно-активной среде, в том числе с изменяющимися во времени и пространстве составом и структурой (прямая задача), осуществляется с использованием дифференциального уравнения второго закона Фика [15]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D_1 \operatorname{div} \operatorname{grad} C = D_1 \nabla^2 C, \quad (4)$$

где

$$D_1 = \frac{D}{m + \frac{1-m}{\nu}} \quad (5)$$

— эффективный коэффициент диффузии; $D = 10^{-14} \div 10^{-15}$ — коэффициент твердотельной диффузии метана в угле, м²/с; $1-m$ — блок массива (твёрдый углегазовый раствор), включающий в себя закрытую пористость (поры внутри блока, не сообщающиеся каналами с поверхностью); $\nu \approx 10^{-1} \div 10^{-2}$ — константа растворимости метана в угле. Согласно [16–18] и соотношению (5), коэффициент диффузии D_1 учитывает наличие закрытых пор в блоке угля.

5. Основное дифференциальное уравнение неустановившейся фильтрации газа, линейризованное по Лейбензону, представляется виде [19]:

$$a_x^* \left(\frac{\partial^2 P_1^2}{\partial x^2} \right) + a_y^* \left(\frac{\partial^2 P_1^2}{\partial y^2} \right) + a_z^* \left(\frac{\partial^2 P_1^2}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial P_1^2}{\partial t}, \quad (6)$$

здесь

$$a_i^* = \frac{K_i P_1}{\mu(P_1) m}, \quad i = x, y, z, \quad (7)$$

— коэффициент пьезопроводности для газовых залежей, м²/с; K — коэффициент проницаемости, м²; $\mu(P_1)$ — динамический коэффициент вязкости, зависящий от пластового давления газа P_1 , МПа·с; m — коэффициент эффективной пористости пласта.

При реализации МКЭ функционал, связанный с (6), позволяет рассматривать поле пласта в виде набора конечных подобластей (конечных элементов), каждая из которых может иметь различные геофильтрационные характеристики.

Решение уравнения (4) с начальными и граничными условиями для известной расчетной схемы углепородного массива позволяет рассмотреть кинетику изменения концентрационных профилей в пространстве угольного пласта. В настоящее время для оценки влияния десорбции метана из массива угля могут применяться аналитические решения, приведенные в [18]. Однако они пригодны лишь для исследования дегазации с использованием упрощенных расчетных схем, например для неограниченных по простиранию изотропных угольных пластов с обнажениями. Для более сложных задач, таких как оценка взаимодействия произвольно расположенных по полигону пласта дегазационных скважин, их взаимозависимость с выработками и выработанными пространствами, анизотропия пласта угля, а также другие усложнения в схемах дегазации требуют привлечения численных методов анализа. В этом случае математическое моделирование проницаемости гетерогенных сред дает более надежные результаты, поскольку в аналитических подходах не учитывается многообразие факторов природного явления.

Один из наиболее эффективных численных методов структурного анализа — метод конечных элементов (МКЭ). При вариационной формулировке краевых задач на базе МКЭ с идеализацией континуума подобластями конечных размеров появляется возможность не рассматривать соответствующие дифференциальные уравнения, а использовать энергетический функционал процесса (фильтрации, диффузии, температуры), поскольку выражения, стоящие под интегралом функционала, имеют более низкий порядок производных по сравнению с исходными дифференциальными уравнениями.

Определение диффузии можно отнести к решению уравнения (4) с граничными и начальными условиями, которое эквивалентно отысканию минимума функционала [9]:

$$F(x, y, z) = \int_V \frac{1}{2} \left[A_x \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + A_y \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + A_z \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(Q - \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \varphi \right] dV + \int_{S_1} q \varphi dS + \int_{S_2} \frac{\xi}{2} \left[\varphi^2 - 2\varphi\varphi_\infty + \varphi_\infty^2 \right] dS, \quad (8)$$

где φ — полевая функция (в задачах диффузии соответствует параметру концентрации газа C , коэффициенты A_x, A_y, A_z — коэффициенту диффузии; Q — источник или сток газа; q — просачивание газа через слой вдоль границы S_1 ; ξ — коэффициент массообмена вдоль границ S_2 ; φ_∞ — параметр C вне фильтрационного объема V (например, концентрация газа в атмосфере обнажений или в порях). Функционал (8) положен в основу решения задач диффузии и фильтрации в формулировке МКЭ.

При рассмотрении задач нестационарной фильтрации и диффузии можно указать на возможность использования широко распространенного пакета прикладных программ — системного пакета ANSYS Mechanical. Поскольку пакет программ ANSYS непосредственно не содержит программ для решения задач диффузии и фильтрации, появляется возможность использования для этих целей уже известных алгоритмов нестационарной теплопроводности, достаточно полно представленных в пакете ANSYS.

Ниже приведены результаты исследований фильтрации и диффузии метана из углеметановых пластов, полученные с помощью моделей нестационарной теплопроводности, реализованные в САЕ системы ANSYS Mechanical Student и адаптированные для решения задач диффузии и фильтрации. Адаптация пакета ANSYS к решениям задач фильтрации и диффузии осуществляется встраиванием в него специальных дополнительных процедур (макросов), которые написаны авторами на языке параметрического программирования ANSYS APDL.

Для оценки точности и работоспособности пакета ANSYS, дополненного встроенными процедурами диффузии и фильтрации, рассмотрим решение задачи о дегазации полубесконечной пластины с постоянным распределением концентрации метана в ней (десорбция), имеющей аналитическое решение. Использовались следующие геометрические и диффузионные характеристики: $P_1 = 3.45$ МПа — сорбционное давление, как для глубины разработки пласта $H = 400$ м; ширина пластины $h = 0.25$ м; эффективная пористость $m = 4$ %; коэффициент твердотельной диффузии угля $D = 10^{-15}$ м²/с; эффективный коэффициент диффузии принят как для системы “метан–уголь” $D_1 = 0.5 \cdot 10^{-12}$ м²/с. Начальные и граничные условия задачи: концен-

трация на границах пластины $C(x = 0, t) = C(x = h, t) = 0$; исходная концентрация газа в растворе (в пластине) $C_0 = C(x, 0) = 15.5 \text{ кг/м}^3$ (постоянные изотермы: $a = 20 \text{ кг/м}^3$, $b = 0.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{кг}$); коэффициент растворимости для угля $\nu \approx 5 \cdot 10^{-2}$; t — время десорбции.

Кинетика концентрационных профилей диффузанта для сформулированной задачи определена в результате решения дифференциального уравнения, следующего из соотношения (4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right). \tag{9}$$

Аналитическое решение уравнения (9) получено в [15] и записывается в виде

$$C(x, t) = \frac{4}{\pi} C_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \exp \left\{ -\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D_1 t}{h^2} \right\} \sin \frac{(2k+1)\pi}{h} x. \tag{10}$$

Ряд (10) быстро сходится, поэтому достаточно ограничиться первыми тремя членами разложения для времен до 10 лет, чтобы получить решение с точностью не выше 1% относительной ошибки.

На рис. 1 приведены результаты сопоставления профилей концентрации, рассчитанные по МКЭ и зависимости (10). Граничные условия для МКЭ: $q = \partial C / \partial n = 0$ (n — нормаль к граничной поверхности), граничные условия II рода — упругая стенка, которые переводят расчетную схему пластины конечных размеров в полубесконечную расчетную схему. Все прочие условия соответствуют условиям для пластины.

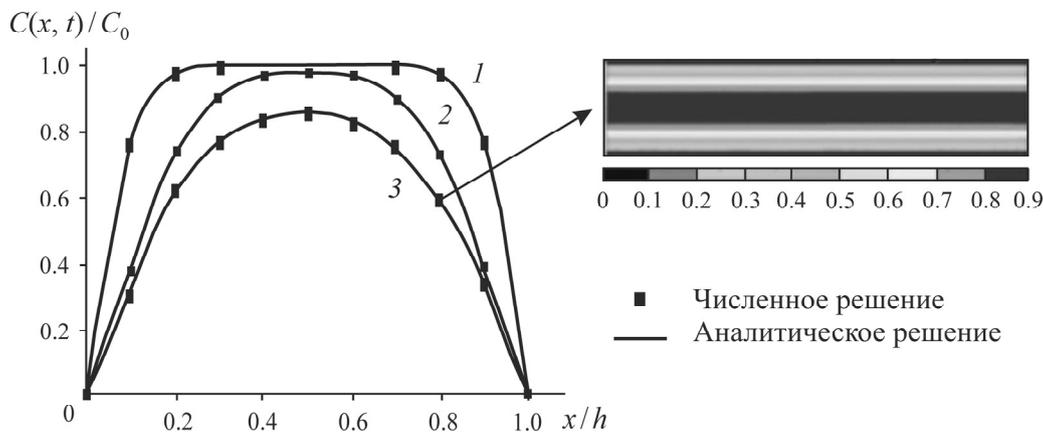


Рис. 1. Десорбция метана из пластины (уголь): 1 — 1 год; 2 — 5 лет; 3 — 10 лет

Для более детального сравнения результаты численных решений (МКЭ) и расчета по зависимости (10) для десорбции полубесконечной пластины для случая $t = 5$ лет ее дегазации представлены ниже:

x/h	0	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500
$C_1, \text{ кг/м}^3$	0	0.384	0.702	0.878	0.961	0.981
$C_2, \text{ кг/м}^3$	0	0.390	0.716	0.887	0.958	0.975
$\delta, \%$	0	1.500	1.900	1.000	0.300	0.600

Здесь C_1 — концентрация газа, полученная в результате аналитического решения задачи по соотношению (10); C_2 — концентрация газа, полученная в результате численного решения задачи МКЭ. Анализ результатов расчетов показал пригодность использования функционала (8), эквивалентного функционалу нестационарной теплопроводности для решения разнообразных задач диффузии.

При исследованиях массопереноса метана в углепородном массиве принципиальное значение имеет разделение его на две составляющие — фильтрацию и диффузию, что позволяет выделить наиболее важные их черты. В настоящей работе основное внимание уделяется диффузионным особенностям переноса и их сопоставлению с другим физическим явлением — фильтрацией. Ниже изложены результаты исследований диффузии метана в угольном массиве с использованием соответствующих расчетов методом конечных элементов.

На практике интересны исследования истощения пласта угля во времени для случаев пассивной дегазации, когда газ выводится из пласта в выработки естественным путем и далее за пределы опасного участка или на поверхность без привлечения дополнительных средств дегазации. При рассмотрении случая плановой диффузии газа в изотропном пласте угля соотношение (4) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = D_1 \nabla^2 C.$$

Это соотношение оправданно, если реализуется предположение о несущественном проявлении вертикальной составляющей скорости диффузии флюида (вдоль мощности пласта, $\partial V_z / \partial z \approx 0$), что приводит в пределах газоносного пласта к схеме двумерного планового диффузионного потока. Мощность пласта, как и его диффузионные характеристики, учитывается в процессе решения задачи при определении объема и физических свойств каждого из конечных элементов, на которые дискретизируется расчетная схема. Это дает возможность рассмотреть пласт с меняющимися мощностью и газодиффузионными параметрами по его простиранию.

Для оценки особенностей диффузионных процессов проанализируем решение задачи о плановой неустановившейся диффузии метана в угольном пласте, оконтуренном со всех сторон выработками. Пласт изотропный, диффузия газа происходит из тела пласта в выработки. На рис. 2 показана расчетная схема задачи и ее дискретизация на конечные элементы.

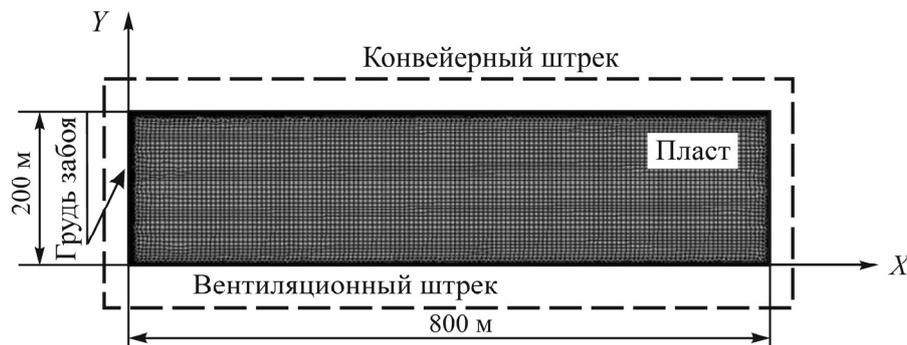


Рис. 2. Расчетная схема пласта и ее дискретизация на конечные элементы

Исходные данные: глубина залегания пласта $H=400$ м; мощность пласта $h=2$ м. Граничные условия: концентрация газа на границах пласта

$$C(x, y = 0, t = 0) = C(x, y = 200, t = 0) = C(x = 0, y, t = 0) = C(x = 800, y, t = 0) = C(x = 0, y, t = 0) = 0.$$

Начальные условия: $C(x, y, t = 0) = 15.5 \text{ кг/м}^3$, такие же, как для рассмотренной выше пластины. Для рассматриваемой твердотельной диффузии угольного массива коэффициент диффузии изменяется в пределах [16]: $D_1 = (10^{-14} \div 10^{-16}) \text{ м}^2/\text{с}$. По аналогии с диффузионными параметрами пластины коэффициент эффективной диффузии принят равным $D_1 = 0.5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$.

Результаты расчетов концентрационного профиля метана в течение 12 мес дегазации пласта за счет молекулярной диффузии приведены на рис. 3. Видно, что протяженность зоны десорбции пласта у его краевых частей невелика. Через 12 мес протяженность зоны не превышает $X_{ef} \approx 0.056 \text{ м}$. С удалением от обнажения ($X > X_{ef}$) углепородный массив находится в зоне обеспеченного питания.

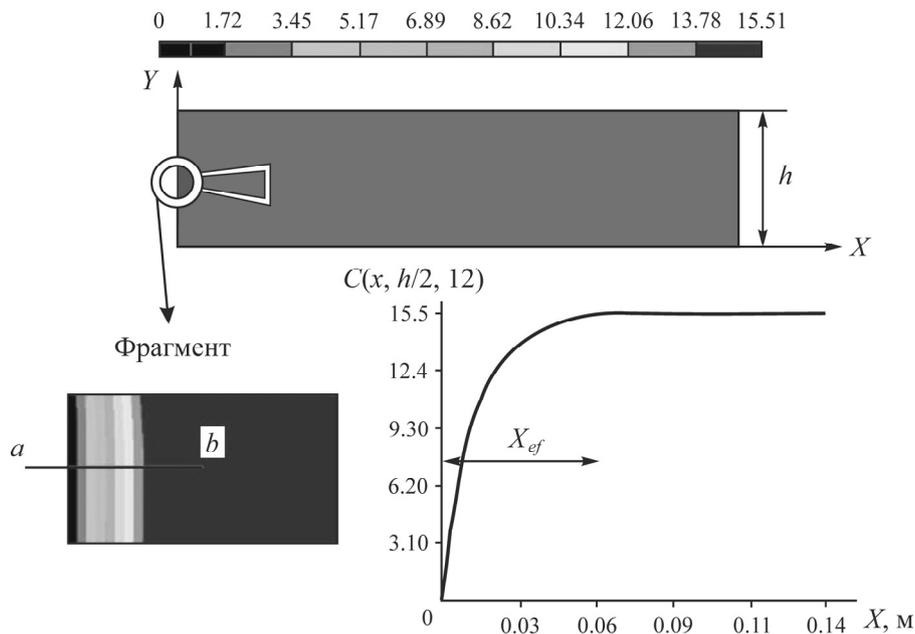


Рис. 3. Линии уровня концентрационного профиля и распределение концентрации метана вдоль линии ab

Проведем сравнительный анализ влияния фильтрации и диффузии метана на естественную дегазацию угольного пласта. Для корректного сопоставления результатов расчетов по обоим физическим процессам расчетная схема для задачи фильтрации соответствует расчетной схеме, принятой в задаче о диффузии (рис. 2).

Для плановой фильтрации дифференциальное уравнения неустановившейся фильтрации газа (6) примет вид

$$a_x^* \left(\frac{\partial^2 P_1^2}{\partial x^2} \right) + a_y^* \left(\frac{\partial^2 P_1^2}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial P_1^2}{\partial t}.$$

Глубина разработки пласта 400 м, его мощность 2 м. Граничные условия: по периметру пласта задано давление $P = 0.1 \text{ МПа}$; пористость пласта $m = 4 \%$; почва и кровля изолированы. Начальное условие: пластовое давление $P_1 = 3.45 \text{ МПа}$; расчетное время дегазации пласта $t = 12 \text{ мес}$.

Коэффициент пьезопроводности (7) для случая решения сформулированной задачи — изотропного пласта и плановой фильтрации $a^* = a_x^* = a_y^*$ приводится к соотношению

$$a^* = K \frac{P_1}{\mu(P_1)m}.$$

Для $P_1 = 3.45$ МПа, коэффициента динамической вязкости $\mu(\sim 3.5) = 3.6 \cdot 10^{-11}$ МПа·с и коэффициента пористости $m = 4\%$ коэффициент пьезопроводности определится выражением

$$a^* = K \cdot 2.4 \cdot 10^{12}. \quad (11)$$

Для последующих расчетов фильтрации и сравнительного анализа с параметрами диффузионного процесса коэффициент пьезопроводности рассчитаем, как для коэффициента проницаемости, приближающегося к своему минимальному значению, т. е. при $K = 10^{-17}$ м², $a^* = 2.4 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Согласно [1], для основных угольных бассейнов стран СНГ $K = (0.4 \div 1.0) \cdot 10^{-15}$ м². Тогда в соответствии с (11) оценочные значения коэффициента пьезопроводности угольного массива будут находиться в диапазоне $a^* = (0.96 \div 2.40) \cdot 10^{-3}$ м²/с.

На рис. 4 показаны результаты расчетов давления метана в фильтрационном поле пласта после 12 мес его естественной дегазации. Заметим, что протяженность краевой зоны пласта, подверженная дегазации, составляет $X_{ef} \approx 55$ м.

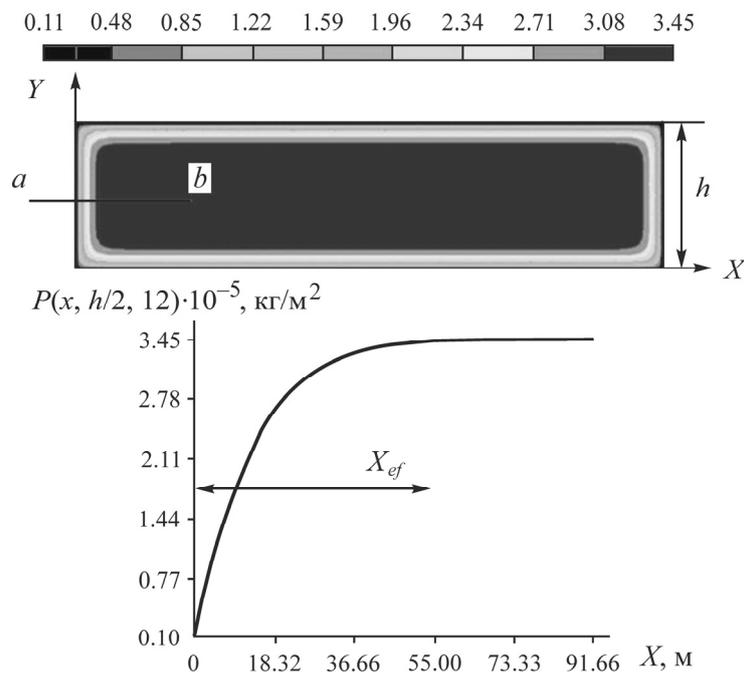


Рис. 4. Линии уровня сорбционного давления метана в краевых частях угольного пласта и распределение давления газа вдоль линии ab

Для детальной сравнительной оценки результаты расчетов степени дегазации пласта за счет фильтрации k_1 и молекулярной диффузии метана k_2 в угольном массиве представлены ниже:

t , мес	2	4	6	8	10	12
k_1 , %	3.600	5.300	6.600	7.700	8.800	9.800
k_2 , %	0.045	0.049	0.052	0.056	0.059	0.062

Степень дегазации пласта оценивалась как

$$k_i = \frac{V_1}{V_2} 100\%, \quad i = 1, 2,$$

где V_1 — объем эвакуированного из пласта газа на заданный момент времени дегазации t , приведенный к одной атмосфере; V_2 — объем газа в фильтрационном пространстве пласта в задачах фильтрации или объем газа твердого углегазового раствора в задачах диффузии метана, приведенный к одной атмосфере.

Объем V_1 можно рассчитать по данным численных расчетов МКЭ с использованием закона Бойля – Мариотта и следствий, вытекающих из этого закона:

для задач диффузии —

$$V_1 = \frac{(1-m)P_1}{P} \sum_{i=1}^N hS_i \left(\frac{C(x_i, y_i, t=0)}{C(x_i, y_i, t)} - 1 \right),$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^N (1-m)hS_i,$$

для задач фильтрации —

$$V_1 = \frac{mP_1}{P} \sum_{i=1}^N hS_i \left(\frac{P_1}{P(x_i, y_i, t)} - 1 \right),$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^N mhS_i,$$

N — число конечных элементов расчетной схемы; S_i — площадь i -го конечного элемента.

Полученные данные по дегазации пласта за счет фильтрации и диффузии газа свидетельствуют о том, что ведущий процесс дегазации — фильтрация. И это несмотря на то, что основное количество газа содержится в твердом углегазовом растворе. Действительно, для одних и тех же условий залегания пласта угля из соотношения (2) следует, что при сорбционном давлении 3.45 МПа, коэффициентах изотермы $a = 20$ кг/м³, $b = 0.1 \cdot 10^{-4}$ м²/кг количество связанного газа (растворенного в угле) составляет 15.5 кг/м³. В то же время в соответствии с зависимостью (3) для $R_m = 0.0053 \cdot 10^4$ м/Т, $T = 300$ К, пористости 4%, $P_1 = 3.45$ МПа количество свободного газа (в фильтрационном, поровом пространстве) составляет всего 0.87 кг/м³.

При построении методов, методик и алгоритмов моделирования процессов массопереноса приобретают немаловажное значение исследования, устанавливающие газодинамические определяющие соотношения, диффузионные и фильтрационные константы угольного массива. При использовании таких исследований оказывается важной оценка достоверности получаемых материаловедцами результатов. Иногда они бывают противоречивыми в работах различных авторов при исследованиях ими одного и того же материала. Например, как отмечается в [17] по теоретическим оценкам одного из авторов, коэффициент диффузии для угля должен превышать значения $10^{-6} \div 10^{-7}$ м²/с, в то время как согласно экспериментам другого автора, этот коэффициент значительно меньше $10^{-14} \div 10^{-16}$ и характерен для диффузии в твердых телах.

При сравнительном анализе разделенных процессов фильтрации и диффузии в угле намеренно были занижены коэффициенты фильтрации (пьезопроводности) по сравнению с среднестатистическими значениями и завышены коэффициенты диффузии.

Тем не менее для принятых газодинамических параметров результаты расчетов массопереноса метана в угольном пласте показывают, что при анализе эффективности процесса дегазации, построении схем дегазации массопереносом газа за счет диффузии можно пренебречь из-за малого времени, которое отводится для выполнения работ по дегазации пласта в условиях производства (до 3 лет), по сравнению с временами, необходимыми для установления сорбционного давления газа (сотни лет). Однако с методической точки зрения при прогнозе дегазации метана из пласта оба физических процесса (диффузия и фильтрация) должны включаться в расчетные методики, поскольку при больших временах диффузия и фильтрация происходят синфазно, т. е. количество метана, поступающего из блоков в фильтрационный объем, равно количеству метана, выходящего вовне.

Вместе с тем при отработке пласта в реальном масштабе времени уголь выдается на поверхность с большим содержанием метана, сосредоточенным в разрушенных блоках угля в виде углеметанового раствора, и фракции угля продолжают выделять газ еще долгое время.

В настоящем исследовании умышленно не рассмотрены вопросы влияния горного давления на дегазацию угольных пластов, имеющие большое значения в связи с изменениями структуры угля вблизи обнажений, поскольку разделение массопереноса на основные составляющие физических процессов вкладывается в нашу концепцию. Влияние горного давления необходимо изучать и учитывать как явление, вносящее определенный вклад в дегазацию и газодинамическое состояние угольного массива.

Оставаясь на позициях феноменологического подхода в задачах массопереноса в угленосных массивах, для успешного решения широкого класса задач этой направленности следует основываться на общих закономерностях, получающихся из макроскопических экспериментов с углем в лабораторных и полевых условиях.

Общее решение задач дегазации угольных пластов в модели массо- и газопереноса можно связать с изучением последовательного или параллельного соединения рассматриваемых физических явлений в единое алгоритмическое целое, например с использованием методики последовательной смены стационарных состояний.

ВЫВОДЫ

Основываясь на экспериментальных данных отечественных и зарубежных ученых при оценке коэффициентов диффузии и коэффициентов проводимости при фильтрации, численными решениями задачи о дегазации угольного пласта получено, что массопереносом газа за счет диффузии можно пренебречь вследствие короткого времени, которое отводится для выполнения работ по дегазации залежи в условиях производства (до 3 лет). Ключевой фактор дегазации пласта — фильтрация газа из межпорового пространства массива. Протяженность дегазации угля во времени за счет диффузии на несколько порядков превышает протяженность истощения массива угля за счет фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. Д., Айруни А. Т., Зверев И. В. Распад газоугольных твердых растворов // ФТПРПИ. — 1994. — № 3. — С. 65–70.
2. Желтов Ю. П., Золотарев П. П. О фильтрации газа в трещиноватых породах // ПМТФ. — 1962. — № 5. — С. 135–139.

3. Van Krevelen D. W. Coal, Amsterdam, Elsevier, 1993. — 1002 p.
4. Harpalani S. and Schraufnagel R. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal, Fuel, 1990, Vol. 69. — P. 551.
5. Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Природа и механизм формирования газопроницаемых зон в угольных пластах // ФТПРПИ. — 1999. — № 1. — С. 21–27.
6. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов. — М.: ИАГН, 2000. — 519 с.
7. Алексеев А. Д., Айруни А. Т., Васючков В. Ф., Зверев И. В., Синолицкий В. В., Долгова М. О., Эттингер И. Д. Свойство органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов. Открытие, диплом № 9. Заявка № А-016 от 30.06.94. — М., 1994. — Рег. № 16.
8. Полевщиков Г. Я., Непейна Е. С., Цуран Е. М. Разработка методики оценки термодинамики распада углеметановых геоматериалов // Вестн. КГТУ. — 2015. — № 6. — С. 13–18.
9. Ли К. Х., Казанцев В. Г., Ли Хи Ун, Зыков В. С., Иванов В. В. Влияние дегазационных скважин на кинетику состояния углеметановых пластов // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной пром-сти. — 2023. — № 1. — С. 33–41.
10. Айруни А. Т., Галазов Р. А., Сергеев И. В. и др. Газообильность каменноугольных шахт СССР. Комплексное освоение газоносных угольных месторождений. — М.: Наука, 1990. — 213 с.
11. Кабирова С. В., Ворошилов В. Г., Портнов В. С., Ахматнуров Д. Р. Оценка газоносности пласта К10 в пределах Шерубайнуринского участка Карагандинского угольного бассейна // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 5. — С. 64–74.
12. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. — Новосибирск: Наука, 1999. — 470 с.
13. Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах // ФТПРПИ. — 1999. — № 5. — С. 13–18.
14. Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Соотношение сорбированного и свободного газа в угольном пласте // Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых. — Кемерово: КГТУ, 2015. — 8 с.
15. Бэкман И. Н. Математика диффузии. — М.: ОнтоПринт, 2016. — 399 с.
16. Калугина Н. А. Взаимное влияние диффузии и фильтрации в процессе истечения метана из угольного массива // Физика и техника высоких давлений. — 2010. — Т. 20. — № 3. — С. 140–149.
17. Алексеев А. Д., Василенко Т. А., Гуменник К. В., Калугина Н. А., Фельдман Э. П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журн. техн. физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4. — С. 65–75.
18. Стариков Г. П., Юрченко В. М., Мельник Т. Н., Худoley О. Г., Кравченко А. В. Активация диффузии метана в угле под воздействием изменяющихся механических и термодинамических параметров пласта // Физика и техника высоких давлений. — 2019. — Т. 29. — № 3. — С. 122–130.
19. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. — М.: ОГИЗ, 1947. — 244 с.

*Поступила в редакцию 10/IV 2023
После доработки 30/IV 2023
Принята к публикации 18/V 2023*