

УДК 681.883: 534.2

**КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА МЕТАНА В
ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ СЛУЧАЯ
ВОДОНАСЫЩЕННОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ
ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ПОРОДЫ**

Гончар А. И., Титов И. Н., Титова Н. И.
(НТЦ ПАС НАНУ, г. Запорожье, Украина)

Розглядається питання знаходження критерію оцінки кількості метану у вироблених просторах циліндричної форми для практично важливого випадку прилягаючої водонасиченої пружнопластичної породи.

Finding the criterion to estimate amount of methane in cylindrical worked-out areas is considered for the case of adjoining watered elastoplastic rock.

Опыт дегазации угольных шахт и промышленной добычи угольного метана свидетельствуют о том, что на газоотдачу пластов влияет большое количество естественных и техногенных факторов. Причем более всего влияют такие факторы:

- 1) напряженно-деформированное состояние угольного пласта;
- 2) строение и свойства газонасыщенных угольных пластов и угольного вещества;
- 3) обводненность углесодержащей толщи и влажность угля;
- 4) температура угля и углесодержащих пород;
- 5) естественная газопроницаемость угольного пласта;
- 6) поровое давление газа в пласте;

7) тектоника месторождения и наличие в угольных пластах специфических зон (флюидоактивных, повышенной трещиноватости, сниженной напряженности).

На данный момент уже предложен ряд математических моделей заполнения метаном выработанного пространства закрытых шахт, которые не всегда адекватно описывают процессы диффузии метана, вследствие пренебрежения некоторыми важными факторами [1]. Кроме того, отсутствуют оценки концентрации метана в деформированном водонасыщенном углепородном массиве в окрестности газосодержащей полости. Также открытыми являются вопросы создания критериев оценки количества метана в выработанных пространствах различной формы.

Таким образом, разработка новых математических моделей диффузии метана в выработанное пространство закрытых шахт с учетом существенного влияния напряженно-деформированного (упругого или упругопластического) состояния углепородного массива является актуальной научно-технической задачей.

Уравнение диффузии с учетом «восходящей» диффузии будет иметь вид:

$$\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} = D \Delta c + \frac{2\Omega D}{3k_B T} c \Delta \sigma_{||} + \frac{2\Omega D}{3k_B T} (\nabla c \nabla \sigma_{||}), \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; Ω – атомный объем; k_B – постоянная Больцмана; T – температура; $\sigma_{||}$ – след тензора напряжений σ_{ik} .

Вследствие аксиальной симметрии задачи, уравнения диффузии в областях 1 (выработка), 2 (упругопластическая область), 3 (упругая область) приобретут вид [2]:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c_1}{\partial r} \right), \quad 0 < r < a, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 c_2}{\partial r^2} + \left(1 + \frac{4k\Omega}{3k_B T} \right) \frac{D_2}{r} \frac{\partial c_2}{\partial r}, \quad a < r < r_T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_3}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 c_3}{\partial r^2} + \left(1 + \frac{4k\Omega}{3k_B T}\right) \frac{D_3}{r} \frac{\partial c_3}{\partial r} - \frac{8\Omega k D_3 r_T^2}{3k_B T r^4} c_3, \quad r_T < r < b, \quad (4)$$

где c_1, c_2, c_3 – концентрации метана в областях 1, 2, 3; D_1, D_2, D_3 – коэффициенты диффузии метана в этих областях.

Начальные условия имеют вид:

$$c_1(r, 0) = 0, \quad c_2(r, 0) = c_3(r, 0) = c_0. \quad (5)$$

Граничные условия на границах раздела областей

$$c_1(a, t) = c_2(a, t), \quad \tilde{n}_2(r_T, t) = c_3(r_T, t), \quad D_1 \frac{\partial c_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = D_2 \frac{\partial c_2}{\partial r} \Big|_{r=a},$$

$$D_2 \frac{\partial c_2}{\partial r} \Big|_{r=r_T} = D_3 \frac{\partial c_3}{\partial r} \Big|_{r=r_T}, \quad c_3(b, t) = 0, \quad D_3 \frac{\partial c_3}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0. \quad (6)$$

Рассмотрим интересный с практической точки зрения предельный случай решения задачи (2)–(6), связанный с относительно малым скачком давления на полости ($P \sim 10^{10}$ Па, и, соответственно, $2\nu \gg 1$; коэффициент диффузии в упругопластической области $D_2 = 1 \times 10^{-9}$ м²/с). Эта ситуация характерная для случая насыщения подземными водами упругопластической области. Тогда поле концентраций метана в полости, упругопластической и упругой областях и масса метана в полости определяются следующими соотношениями:

$$\tilde{n}_1(r, t) = \frac{2\tilde{n}_0}{\mu_1^2 J_1(\mu_1)} J_0\left(\frac{\mu_1 r}{a}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{D_1 \mu_1^2 t}{a^2}\right)\right), \quad (7)$$

$$c_2(r, t) = c_0 \left[1 - \left(\frac{r_T}{r}\right)^{-2\nu} \exp\left(-\frac{r_T^2 - r^2}{4D_2 t}\right)\right], \quad (8)$$

$$c_3(r, t) = c_0 \exp\left(-\frac{4\nu r_T^2 D_3 t}{r^4}\right), \quad (9)$$

$$m(t) = m_0 N(t) = \frac{4\pi a^2 l m_0 c_0}{\mu_1^3} \left(1 - \exp\left(-\frac{D_1 \mu_1^2 t}{a^2}\right)\right). \quad (10)$$

Таким образом, соотношение (10) является критерием для оценки количества метана в выработанных пространствах цилиндрической формы в случае водонасыщенных окружающих пластов.

В соответствии с соотношениями (7)–(10), проведем расчеты полей концентрации метана в цилиндрической полости, упругопластической и упругой областях, а также зависимости от времени массы метана, накопившегося в цилиндрической полости, в случае водонасыщенного упругопластического слоя. Параметры [3, 4], для которых проводились расчеты, приведены в таблице 1. Результаты расчетов приведены на рисунках 1–6.

Таблица 1

Параметры задачи

Радиус полости a , м	2
Радиус упругопластической области r , м	3,5
Температура, T , К	293
Разница между тангенциальным и нормальным напряжением для случая водонасыщенного упругопластического слоя, k , Па	$6 \cdot 10^9$
Масса молекулы метана m , кг	$2,66 \cdot 10^{-26}$
Молярный объем метана Ω , м	$2,87 \cdot 10^{-29}$
Коэффициент диффузии метана в полости D_1 , м ² /с	$3 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент диффузии метана в упругопластической области D_2 , м ² /с	$1 \cdot 10^{-8}$
	$1 \cdot 10^{-9}$
Коэффициент диффузии метана в упругой области D_3 , м ² /с	$1 \cdot 10^{-10}$
Начальная концентрация метана в угольном пласте C_0 , м ⁻³	$2,4 \cdot 10^{25}$
Постоянная Больцмана k_B , Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$

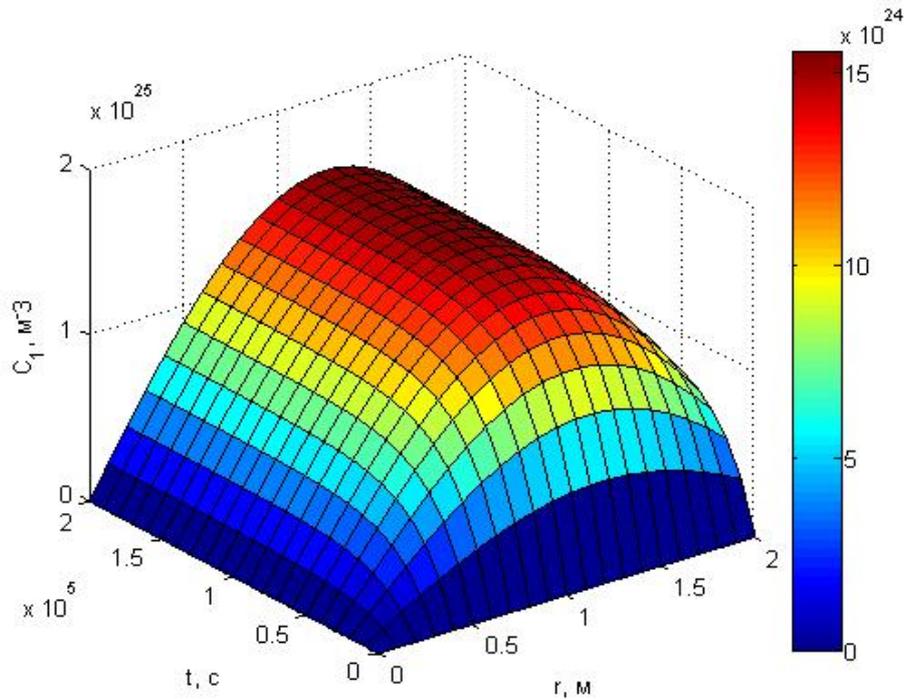


Рис. 1. График распределения концентрации метана в цилиндрической полости в случае водонасыщенного упругопластического слоя, окружающего полость

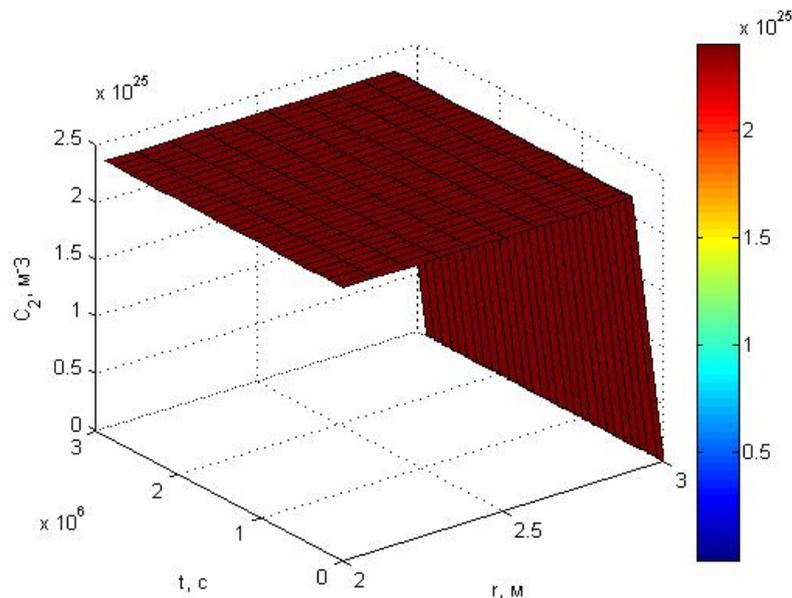


Рис. 2. График распределения концентрации метана в водонасыщенном упругопластическом слое, если его радиус $r_T = 3$ м

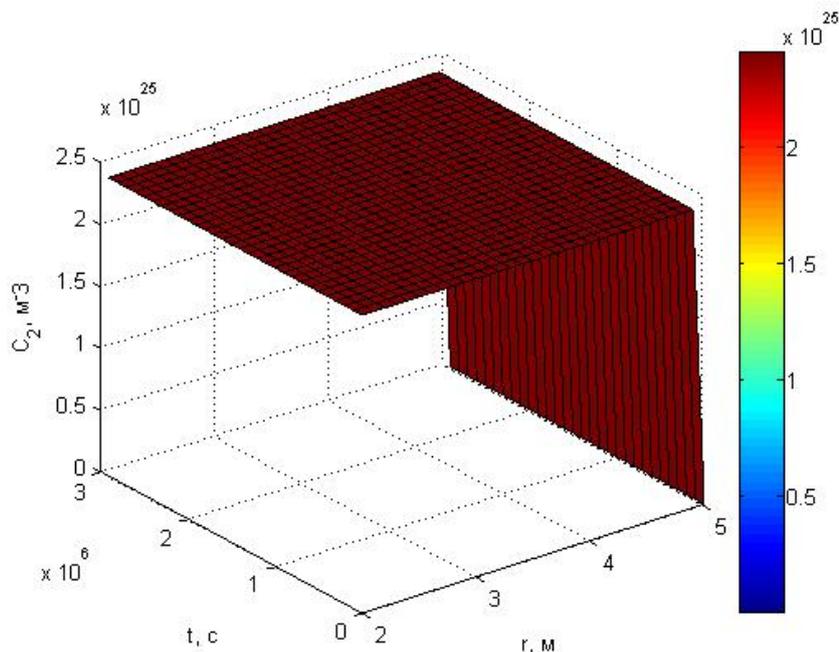


Рис. 3. График распределения концентрации метана в водонасыщенном упругопластическом слое, если его радиус $r_T = 5$ м

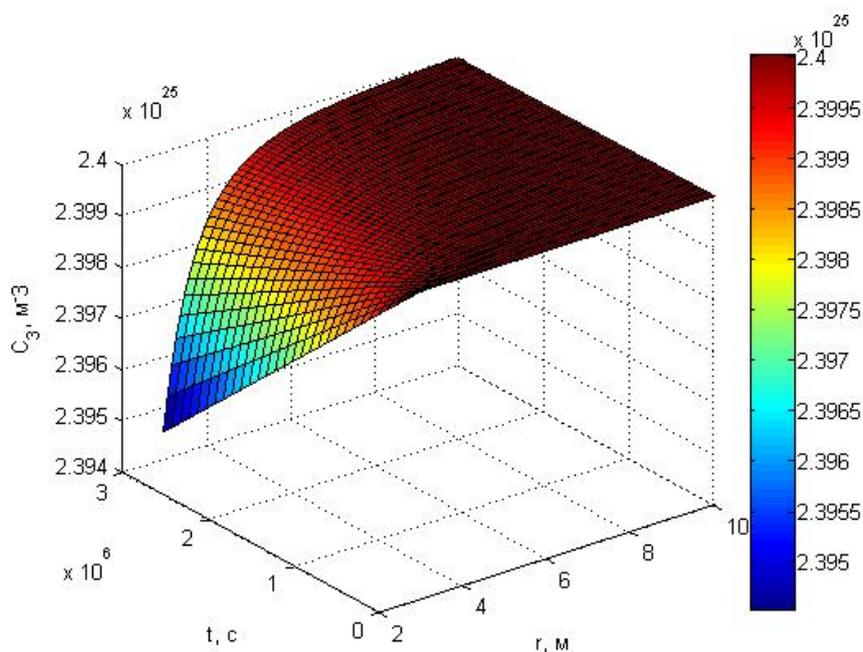


Рис. 4. График распределения концентрации метана в упругом слое, если $r_T = 3$ м

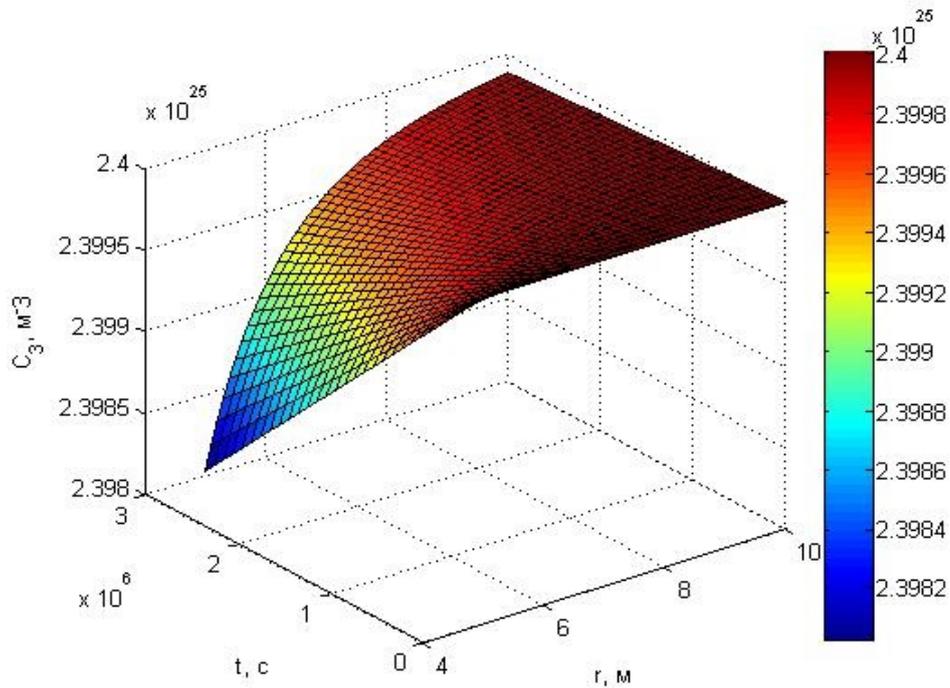


Рис. 5. График распределения концентрации метана в упругом слое, если $r_T = 5 \text{ м}$

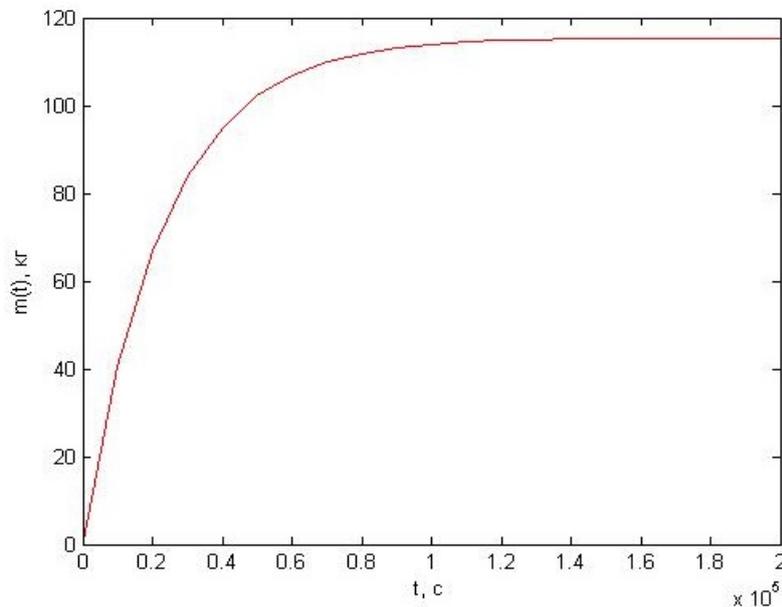


Рис. 6. График зависимости от времени массы метана, накопившегося в цилиндрической полости в случае водонасыщенного упругопластического слоя, окружающего полость

Проведенные расчеты позволяют сделать такие заключения:

1) Концентрация метана в цилиндрической полости достигает максимума на оси полости, причем в случае водонасыщенного упруго-пластического слоя величина радиуса слоя упруго-пластических деформаций совершенно не влияет на распределение концентрации метана в полости и на зависимость от времени массы метана, накопившегося в ней.

2) Распределение концентраций метана в упругопластической области существенно отличается при разных r_T только в окрестности границы упруго-пластической и упругой областей и не зависит от водонасыщенности упругопластического слоя.

3) Анализ графиков зависимости от времени массы метана, накопившегося в цилиндрической полости в случаях водонасыщенного упругопластического пласта указывает на то, что процесс диффузии происходит в 2 стадии: «быстрая» диффузия, происходящая за время $t \sim 10^5$ с, и следующая после нее «медленная», квазистационарная диффузия (которой соответствует плато на графиках), которая длится до момента полного выхода метана из угольных пластов.

По результатам выполненного анализа процесса диффузии метана в выработанное пространство закрытых шахт могут быть определены нерешенные научно-теоретические вопросы и намечены направления дальнейших исследований для их решения.

1. Разработка вопросов влияния проходящих упругих волн на процесс выхода метана из угленосной толщи в выработанное пространство закрытых шахт.

2. Создание математических моделей определения формы и размеров метаносодержащих полостей по информации о граничных геоакустичних полях или полях в дальней зоне.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Алексеев А. Д. Десорбция метана из угля в замкнутый объем / А. Д. Алексеев, Э. П. Фельдман Т. А. Василенко // Метан: Сборник научных трудов по материалам симпозиума «Неделя горняка — 2008». Отдельный выпуск Горного информацион-

- но-аналитического бюллетеня. — М. : «Мир горной книги». — 2008. — № ОВ 4. — С. 42—53.
2. Розробка критеріїв оцінки кількості метану у вироблених просторах закритих шахт. Звіт про НДР / НТЦ ПАС НАН України, Запоріжжя, 2012. — 92 с.
 3. Газоносность угольных месторождений Донбасса / [Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Хохлов М. Т. и др.]. — К. : Наук. думка, 2004. — 231 с.
 4. Тиркель М. Г. Изучение газоносности угленосных формаций / Тиркель М. Г., Анциферов В. А., Глухов А. А. — Донецк : «Вебер» (Донецкое отделение), 2008. — 208 с.