

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ****<sup>1</sup>Молчанов А.Н., <sup>1</sup>Венгеров И.Р., <sup>2</sup>Дедич И.А., <sup>1</sup>Пичка Т.В.,  
<sup>1</sup>Троицкий Г.А., <sup>1</sup>Камчатный А.А.**<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины, <sup>2</sup>Приватное акционерное общество «Донецксталь» - металлургический завод»**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРАЦІЇ МЕТАНУ В ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТАХ****<sup>1</sup>Молчанов О.М., <sup>1</sup>Венгеров І.Р., <sup>2</sup>Дєдїч І.О., <sup>1</sup>Пічка Т.В.,  
<sup>1</sup>Троїцький Г.А., <sup>1</sup>Камчатний О.А.**<sup>1</sup>Інститут фізики гірничих процесів НАН України, <sup>2</sup>Приватне акціонерне товариство «Донецьксталь» - металургійний завод»**DETERMINATION OF METHANE FILTRATION PARAMETERS IN COAL SEAMS****<sup>1</sup>Molchanov A.N., <sup>1</sup>Vengerov I.R., <sup>2</sup>Diedich I.A., <sup>1</sup>Pichka T.V.,  
<sup>1</sup>Troitskiy G.A., <sup>1</sup>Kamchatniy A.A.**<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine, <sup>2</sup>Private Joint-Stock Company «Donetsksteel» - Iron and Steel Works»

**Аннотация.** В статье исследуется проблема заблаговременного определения параметров метановыделения в горную выработку на основе горно-геологических данных угольного пласта, для которого выполняется планирование проведения горных работ и, в частности, определяются параметры вентиляции шахтных выработок. Для определения параметров метановыделения в горную выработку предлагается использовать методы математического моделирования массопереноса метана в неоднородных угольных пластах. Рассматривается применимость предложенной авторами ранее модели фильтрации метана в неоднородном угольном пласте для выполнения практических расчетов метаноотдачи пласта (т.е. выхода метана в лаву через поверхность забоя). Проанализированы условия применимости изотерм сорбции Генри и Ленгмюра для научных и инженерных расчетов. Найдены диапазоны изменения параметров изотерм для реальных условий (температура, глубина залегания угольного пласта, выход летучих угля) и проведены оценки их применимости.

Исходя из имеющихся в наличии шахтных данных, характеризующих угольный пласт, авторами проведен расчёт метаноёмкости и бароёмкости угля. Для этого проведен анализ параметров предложенной математической модели для реальных условий пласта блока 10 ш/у «Покровское», используя данные для двух лав, для которых выполнены расчёты фильтрационных параметров, необходимых для определения метаноотдачи пласта. Проведено сравнение полученных результатов с реальными шахтными данными.

Результаты исследования показывают, что использование в научных и инженерных расчётах изотерм сорбции метана по Генри возможно только для ситуаций (достаточно редких), когда параметры давления метана в разных точках угольного пласта не превышают 4,53 атм. В большинстве реальных ситуаций следует использовать изотерму Ленгмюра. Эмпирические формулы для вычисления метаноёмкости угля хорошо согласованы между собой и позволяют получать результаты, удовлетворительно согласующиеся с опытными данными. Предложенная ранее авторами модель фильтрации метана в неоднородном угольном пласте является адекватной, поскольку в её рамках удаётся определить (с привлечением эмпирических корреляций) фильтрационные параметры и найти удельную метаноотдачу пласта, которые по величине близки к определённым на основе практических шахтных измерений. Подтверждена эффективность системного подхода к математическому моделированию процессов переноса в геотехногенных системах.

**Ключевые слова:** фильтрация, массоперенос, угольный пласт, математическое моделирование.

**Введение**

Безопасная эксплуатация газозольных месторождений возможна только на основе комплексного научного подхода к изучению физических процессов в угольных пластах и вмещающих горных породах. Это процессы упругости,

пластичности, разрушения горных пород, десорбции и фильтрации метана, тепло- и массообмена в системе «уголь-порода-воздух».

Эффективным средством исследования этих процессов является системный подход к математическому моделированию процессов переноса в геотехногенных системах [1]. На этой основе осуществляется математическое моделирование фильтрации десорбирующегося метана в угольных пластах неоднородного строения [2-4].

Важная роль при этом принадлежит сбору и систематизации информации горнотехнического и геофильтрационного характера и определению всех параметров математической модели. Поскольку наиболее корректным методом определения параметров является решение обратных задач теории фильтрации (что существенно затрудняется как математической сложностью их, так и отсутствием надёжных экспериментальных данных, полученных в действующих шахтах), которые представляют статистические эмпирические закономерности (модели типа «вход-выход»), то последующий далее анализ базируется на такого рода моделях, объяснение которых дано в [5] и модели фильтрации, предложенной нами ранее [2].

### 1. Макрокинетика десорбции метана

В большинстве работ, посвящённых метанопереносу в угольных пластах, описанные макрокинетики сорбции и десорбции метана, строятся на использовании выражений для изотерм сорбции по Ленгмюру [6-10]. В ряде работ предпочитают изотерму Генри [11]. Эти выражения имеют, соответственно, вид:

$$X_{\text{сорб}}^{(Л)} = \frac{abP_{\infty}}{1+bP_{\infty}}, \quad X_{\text{сорб}}^{(Г)} = \Gamma P_{\infty}, \quad a, b, \Gamma = \text{const.} \quad (1)$$

Здесь количество сорбированного метана ( $X_{\text{сорб}}^{(Г)}$  и  $X_{\text{сорб}}^{(Л)}$ ) измеряется в м<sup>3</sup>/т угля, а постоянные параметры  $a$ ,  $b$ ,  $\Gamma$  имеют, соответственно, размерности: м<sup>3</sup>/т, атм<sup>-1</sup>, м<sup>3</sup>/т·атм<sup>-1</sup>. Давление метана в угольном пласте на глубине  $H$ (м) обозначено  $P_{\infty} = P_{\infty}(H)$  и измеряется в атм.

Количественных критериев для выбора в (1), в литературе не встречается, но иногда говорится, что изотерма Генри соответствует «относительно небольшим давлениям». Осуществим количественную оценку допустимых значений  $P_{\infty}$ , при которых обе формулы (1) дают близкие результаты. Найдём диапазоны (граничные значения) изменения параметров  $a$  и  $b$  в (1), полагая, что температура угольного пласта изменяется в пределах  $t \in [30, 50](^{\circ}\text{C})$  (что приблизительно соответствует глубинам от 700 до 1300 метров). Вторым, существенно влияющим на величину параметров, является «выход летучих» –  $V^{\Gamma}(\%)$ . Принимаем, что  $V^{\Gamma} \in [5, 45](\%)$ . Корреляции параметров с этими факторами, имеют, согласно [5], следующий вид

$$a = \frac{1,433 \exp(-0,012t)}{0,0225 + 0,00183V^{\Gamma}}, \text{ м}^3/\text{т} \quad (2)$$

$$b = (0,452 + 0,137V^{\Gamma})^{-1}, \text{ атм}^{-1}. \quad (3)$$

Подстановка указанных выше граничных значений  $t(^{\circ}\text{C})$  и  $V^{\Gamma}(\%)$  в (2) и (3) даёт:

$$a_{\min} = a(t_{\max}, V_{\max}^{\Gamma}) = 8,068 (\text{м}^3/\text{т}), \quad a_{\max} = a(t_{\min}, V_{\min}^{\Gamma}) = 31,59 (\text{м}^3/\text{т}),$$

$$b_{\min} = b(V_{\max}^{\Gamma}) = 0,094 (\text{атм}^{-1}), \quad b_{\max} = b(V_{\min}^{\Gamma}) = 0,192 (\text{атм}^{-1}).$$

Выражение для  $X_{\text{сорб}}^{(\Gamma)}$  может служить приближенным для  $X_{\text{сорб}}^{(I)}$  при условиях:

$$1) \Gamma = ab, \quad bP_{\infty} \ll 1;$$

$$2) \Gamma = \Gamma(P_*) = ab/(1 + bP_*) \simeq \text{const.}$$

Полагаем, что  $P_* \in [20,80]$  (атм.) и для наиболее благоприятного случая, когда  $b = b_{\min} = 0,094$  атм.,  $P_{\infty} = P_{\infty \min} = 20$  атм., получим, что  $(bP_{\infty})_{\min} = 1,88$ , т.к. условие 1) не выполняется. Для проверки возможности реализации второго условия, т.е. линеаризации  $\Gamma(P_{\infty})$ , полагаем:  $\Gamma(P) = \Gamma(P_*) = \Gamma_* = \text{const.}$  Для каждого  $P_{\infty}$ , отличного от  $P_*$  ( $P_{\infty} = P_* \pm \Delta P$ ) имеем:

$$\begin{aligned} \Gamma(P) &= \frac{ab}{1 + bP_{\infty}} = \frac{ab}{1 + b(P_* \pm \Delta P)} = \left( \frac{ab}{1 + bP_*} \right) \left( 1 \pm \frac{b\Delta P}{1 + bP_*} \right)^{-1} = \\ &= \Gamma_* (1 \pm \nu + \nu^2 \pm \dots), \quad \nu = \frac{\Delta P}{b^{-1} + P_*}. \end{aligned} \quad (4)$$

Условие линеаризации  $\Gamma(P) \rightarrow \Gamma(P_*) = \Gamma_* = \text{const}$  заключается в требовании малости величины  $\nu$  по сравнению с единицей. Формализуем это требование:  $\nu \leq 0,05$ . При наиболее благоприятных, для выполнения этого требования, условиях:  $b = b_{\min} = 0,094$  атм.,  $P_* = P_{* \max} = 80$  атм., получаем:

$$\Delta P \leq 0,05 \left( \frac{1}{0,094} + 80 \right), \quad \Delta P \leq 4,53 \text{ (атм.)}.$$

Таким образом, максимальный допустимый перепад давлений метана в пласте даже при самых благоприятных условиях не превышает 4,53 атм. В реальных шахтных условиях, когда перепады давлений метана могут достигать нескольких десятков атмосфер, линеаризация  $\Gamma = \Gamma(P_*)$  невозможна, т.е. изотерма Генри не работает (в отличие от изотермы Ленгмюра).

## 2. Метаноёмкость и бароёмкость угля

Согласно [5], полное метаносодержание (метаноёмкость) 1т угля:

$$X_{\Sigma} = X_{\text{св}} + X_{\text{сорб}} \quad (\text{м}^3/\text{т}). \quad (5)$$

Здесь количество «свободного» метана (т.е. находящегося в порах и трещинах угольного пласта) определяется формулой:

$$X_{\text{св}} = \frac{V_{\Phi} P_{\infty}}{z P_a}, \quad P_a = 1 \text{ атм.}, \quad z = 0,96. \quad (6)$$

В (6):  $V_{\Phi}$  – фильтрующий объём (т.е. суммарный объём пор и трещин в одной тонне угля),  $P_a$  – атмосферное давление,  $z$  – коэффициент сжатия метана. Количество сорбированного углём метана  $X_{\text{сорб}} \quad (\text{м}^3/\text{т})$  даётся первой из формул (1).

Для  $V_{\Phi} \quad (\text{м}^3/\text{т})$  в [5] рекомендуется корреляция вида:

$$V_{\Phi} = 0,0779 - 0,00366V^T + 1,9 \cdot 10^{-6}(V^T)^2, \quad (7)$$

а для  $P_{\infty}(H)$  вида:

$$P_{\infty}(H) = 1,47 + 0,098(H - H_0), \quad H_0 = 90 \exp(0,026V^T). \quad (8)$$

В (8):  $P_{\infty}(H)$  измеряется в атмосферах,  $H, H_0$  – в метрах. Величина  $H_0$  является границей зоны газового выветривания, величина  $V_{\Phi}$  характеризует коллекторские свойства «нетронутого» пласта, т.е. вне зоны влияния поверхности обнажения. Для пересчёта от  $V_{\Phi}$  к естественной пористости пласта  $n_{\infty}$ , достаточно знать удельный вес угля  $\gamma_{\text{уг}} \quad (\text{т}/\text{м}^3)$ :

$$n_{\infty} = \gamma_{\text{уг}} V_{\Phi} \cdot 100\% = 1,34 V_{\Phi} \cdot 100\% \quad (9)$$

В (9) принято, что  $\gamma_{\text{уг}} = 1,34 \text{ т}/\text{м}^3$ . Таким образом, формулы (5) – (9) позволяют найти количество свободного и сорбированного метана, а также общую метаноёмкость – их сумму. Попутно определяется давление метана в пласте и эндогенная пористость угля.

Наряду с общей метаноёмкостью  $X_{\Sigma}$ , являющейся статической удельной характеристикой угольного пласта, в теории фильтрации метана, начиная с работ Р.М. Кричевского [12], рассматривается динамическая (зависящая от давления метана, изменяющегося со временем) характеристика  $\Phi(p)$ , входящая в уравнение Кричевского:

$$\Phi(p) \frac{\partial(p^2)}{\partial t} = \frac{K}{\mu} \nabla^2(p^2), \quad \Phi(p) = \frac{1}{p} \left[ n + \frac{abRT}{(1+bp)^2} \right] \quad (10)$$

Уравнение (10) структурно аналогично уравнению теплопроводности относительно величины  $V = p^2$ ;  $\Phi(p)$  является аналогом удельной теплоёмкости и может быть названо бароёмкостью, а  $\frac{K}{\mu}$  – аналогом

коэффициента теплопроводности. В уравнении (10)  $K$  ( $\text{м}^2$ ) – коэффициент пористости угля;  $\mu = 36,1 \cdot 10^{-15}$  (атм·час) – вязкость метана;  $R = 53 \cdot 10^{-4}$  (атм·м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>) – газовая постоянная для метана;  $n_{\infty}$  – пористость (эндогенная) пласта, определяемая по (9);  $T$  (K) – абсолютная температура пласта.

В рамках модели 1 [2] решение уравнения Кричевского, модернизированное для учёта неоднородности угольного пласта в экзогенной (примыкающей к поверхности обнажения) зоне, решалось нами методом линеаризации по Р.Н. Кригман [12]:

$$\Phi(p) \rightarrow \Phi(P_*) = \Phi_{\infty} = \frac{1}{P_*} (n_{\infty} + N_*), N_* = \frac{abRT}{(1+bP_*)^2}, P_* = 0,86P_{\infty}. \quad (11)$$

Таким образом, бароёмкость становится постоянным, не зависящим от времени, параметром, характерным именно для рассматриваемой математической модели (модельным параметром), величина которого зависит, как и  $X_2$  от  $H(\text{м}), V^{\Gamma}(\%), t(^{\circ}\text{C}), P_{\infty}(\text{атм})$ . Эти исходные для расчётов  $X_2$  и  $\Phi_{\infty}$  величины мы будем определять для пласта  $d_4$  блока 10 ш/у «Покровское». Используя данные для двух лав: лава №1 – 1-я южная и лава №2 – 5-я северная «бис», приведенная в проекте 5-й северной «бис» лавы и в [13]. Они приведены в Таблице 1.

Таблица 1 - Горнотехнические параметры лав 1 и 2

Лава	Глубина, $H, \text{м}$	Мощность пласта, $m, \text{м}$	Длина лавы, $L, \text{м}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Выход летучих, $V^{\Gamma}, \%$
№1	738	2,0	270	32,0	30,3
№2	843	0,9	250	34,4	27,0

Необходимые для расчётов значения  $\alpha, \mu, R$  заимствованы в [14], а температуры вычислены согласно действующему нормативу [15]. Расчёты фильтрационных параметров вычислены по приведённым выше формулам с использованием ПК и приведены в Таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчётов параметров

Лава	Температура, $K$	Эндогенная пористость, $n_{\infty}$	Давление метана, $P_{\infty}, \text{атм}$	Метаноёмкость, $X_2, \text{м}^3/\text{т}$	Бароёмкость, $\Phi_{\infty}, \text{атм}^{-1}$
№1	305	0,028	53,4	12,0	0,002
№2	307,4	0,022	66,3	12,5	0,001

Как видно из таблицы 2, метаноёмкость  $X_2$  и бароёмкость  $\Phi_{\infty}$  – величины существенно различающиеся. По метаноёмкости, зная объём угольного пласта и плотность угля, можно вычислить общее количество метана в данном пласте, что необходимо для организации процессов газодобычи и безопасной угледобычи.

Бароёмкость  $\Phi_{\infty}$  - более частная, модельная характеристика угольного пласта, её необходимо знать для получения многообразных следствий из математической модели. Наряду с эндогенной (характеризующей первоначальные, природные свойства пласта) бароёмкостью  $\Phi_{\infty}$ , при моделировании нестационарных режимов метаноотдачи, требуется знать и экзогенную бароёмкость  $\Phi_0$ , выражение для которой следует из (11) при замене  $n_w \rightarrow n_0$  (где  $n_0$  – пористость в узком, примыкающем к поверхности обнажения, слое пласта).

Полученные значения  $X_2$  (12,0 м<sup>3</sup>/т и 12,5 м<sup>3</sup>/т) хорошо согласуются с шахтными данными, согласно которым метаноёмкость пласта  $d_4$  колеблется в диапазоне 10,0-15,0 м<sup>3</sup>/т.

### 3. Метаноотдача угольного пласта

Метаноотдача (т.е. выход метана в лаву через поверхность забоя) представляет собой нестационарный процесс, который исследовался ранее для Модели 1 из [2]. В этой модели экзогенная (разуплотнённая, примыкающая к поверхности обнажения) зона угольного пласта характеризуется градиентной (непрерывной) неоднородностью, что формализуется представлением функций  $K(z)$  и  $n(z)$  (переменные по мере углубления в пласт). На основании известного опытного и теоретического материала [12] приняты аппроксимации:

$$n(z) = n_0 \exp\left(-\alpha \frac{z}{l}\right), \quad K(z) = K_0 \exp\left(-\beta \frac{z}{l}\right), \quad (12)$$

где:  $z \in [0, l], l = 6m, m$  – мощность пласта (м),  $\alpha, \beta$  – постоянные параметры.

Из (12) следует, что

$$n_0 = n(0), K_0 = K(0), \alpha = \ln\left(\frac{n_0}{n_m}\right), \beta = \ln\left(\frac{K_0}{K_m}\right). \quad (13)$$

Согласно адаптированной формуле Кармана-Козени, в известных моделях фильтрации используется соотношение

$$K = Cn^3, \quad C = \text{const}. \quad (14)$$

Это даёт:

$$C = \frac{K_0}{(n_0)^3}, \quad K_0 = Cn_0^3, \quad \beta = 3\alpha. \quad (15)$$

Для выражения  $n_0$  через  $n_{\infty}$  была получена формула:

$$n_0 = 1 - (1 - n_{\infty})K_p, \quad K_p = \frac{\gamma_{yr}(0)}{\gamma_{yr}(l)}, \quad (16)$$

где  $K_p$  – коэффициент разрыхления, т.е. соотношение между удельным весом угля в глубине пласта  $\gamma_{yr}(l)$  и удельным весом угля в тонком, примыкающем к поверхности обнажения, слое пласта  $\gamma_{yr}(0)$ . По литературным данным [12] принято  $K_p = 0,8, K_{\infty} = 10^{-4} \mu D$ .

На основе приведённых формул рассчитаны значения фильтрационных параметров, необходимых для определения метаноотдачи пласта  $d_4$  в лавах 1 и 2. Они приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Фильтрационные параметры лав 1 и 2

Лав	$n_0$	$K_0, \text{м}^2$	$C, \text{м}^2$	$\alpha$	$\beta$	$\Phi_0, \text{атм}^{-1}$
№1	0,222	$4 \cdot 10^{-17}$	$3,7 \cdot 10^{-15}$	2,01	6,03	0,006
№2	0,218	$11 \cdot 10^{-17}$	$10,0 \cdot 10^{-15}$	2,31	6,93	0,004

Важнейшим фильтрационным параметром, как с практической точки зрения, так и при моделировании газовых режимов, является максимальная удельная метаноотдача  $q_0$ , ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$ ) (начальная скорость газовыделения). Ранее была получена [2] формула для переменного потока метана через поверхность забоя  $q_t$ . При  $t = 0$  из неё следует выражение для  $q_0$ :

$$q_0 = q(0) = 0,208 \left( \frac{K_0 P_0^2}{m \mu P_0} \right) (\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}). \quad (17)$$

По этой формуле были рассчитаны максимальные скорости удельного метановыделения для лав 1 и 2 (соответственно  $q_{0,1}$  и  $q_{0,2}$ ):

$$q_{0,1} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}, \quad q_{0,2} = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}. \quad (18)$$

Для вычисления полной метаноотдачи в обеих лавах достаточно формулы (18) умножить на площади поверхности обнажения  $S_i$  ( $i = 1, 2$ ) лав:

$$q_{\Sigma,1} = S_1 q_{0,1}, \quad q_{\Sigma,2} = S_2 q_{0,2}, \quad S_1 = m_1 L_1, \quad S_2 = m_2 L_2. \quad (19)$$

С учётом данных таблицы 1 получено:

$$q_{\Sigma,1} = 3,08 \text{ м}^3/\text{мин}, \quad q_{\Sigma,2} = 2,025 \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (20)$$

В лаве 2 расход вентиляционного воздуха, достаточный для разбавления концентрации метана в газозудушной смеси до требуемых Правилами безопасности 0,5%, равен 178  $\text{м}^3/\text{мин}$ . Поскольку эта величина соответствует максимальному газовыделению, то для среднего газовыделения (равного половине максимального) этот расход воздуха обеспечит разбавление смеси до 0,25% метана. Для  $q_{\Sigma,2}$  из (20) этот же расход воздуха даёт разбавление до 0,26% метана, что можно считать удовлетворительным согласованием (хотя и косвенным).

## Выводы

1. Использование в научных и инженерных расчётах изотерм сорбции метана по Генри возможно только для ситуаций (достаточно редких), когда параметры давления метана в разных точках угольного пласта не превышают

4,53 атм. В большинстве реальных ситуаций следует использовать изотерму Ленгмюра.

2. Эмпирические формулы для вычисления метаноёмкости (метаносодержания) угля хорошо согласованы между собой и позволяют получать результаты, удовлетворительно согласующиеся с опытными данными.

3. Предложенная ранее Модель 1 фильтрации метана в неоднородном угольном пласте является адекватной, поскольку в её рамках удаётся определить (с привлечением эмпирических корреляций) фильтрационные параметры и найти удельную метаноотдачу пласта, которая соответствует известным данным по вентиляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венгеров И.Р. Математическое моделирование эволюционных теплофизических процессов в сложных системах геотехносферы. Киев: Наукова думка, 2017. 432 с.
2. Венгеров И.Р., Молчанов А.Н., Камчатный А.А. Математическое моделирование фильтрации десорбирующегося метана в неоднородных угольных пластах // Физико-технические проблемы горного производства: Сборник научных трудов, вып. 17. Донецк: ИФГП НАН України, 2014. С. 27-37.
3. Венгеров И.Р., Молчанов А.Н., Камчатный А.А. Базисные модели метаноотдачи неоднородных угольных пластов / Венгеров И.Р. и др. // Форум горняков-2015: Материалы Международной научно-технической конференции (Днепропетровск, 30 сентября – 3 октября 2015 г.) / Национальный горный университет. Днепропетровск. 2015. С. 115-123.
4. Венгеров И.Р., Молчанов А.Н., Камчатный А.А. Аналитические решения задач фильтрации метана в неоднородных угольных пластах // Физико-технические проблемы горного производства: Сборник научных трудов, вып. 18. Днепр: ИФГП НАН України. 2016. С. 26-39.
5. Скляр Л.А., Кривицкая Р.Н., Струковская Т.В. Определение метаноёмкости угольных пластов расчётным методом // Уголь Украины. 1982. №7. С. 37–38.
6. Премыслер Ю.С., Яновская М.Ф. Коллекторские свойства углей / В кн.: Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. М.: Наука. 1973. С. 19-83.
7. Айруни А.Т. Основы предварительной дегазации угольных пластов на больших глубинах. М.: Наука. 1970. 79 с.
8. Коган Г.Л., Крупеня В. Г. Физические основы дегазации выбросоопасных угольных пластов / В кн.: Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. М.: Наука. 1973. С. 84-117.
9. Эттингер И.Л. Газоёмкость ископаемых углей. М.: Недра, 1966. 223 с.
10. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы её определения. М.: Наука. 1978. 122с.
11. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. Киев: Наукова думка, 2010. 424 с.
12. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. В 2-х томах // Том 1. Анализ парадигмы. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 632 с.
13. Дедіч І.О. Обґрунтування параметрів технології розробки вугільних пластів з поточним бурінням дегазаційних свердловин з земної поверхні: дис... к-та техн. наук / Спец. 05.15.02; утв. 13.10.2016. Дніпро: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2016. 161 с.
14. Гиматулинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра. 1982, 312 с.
15. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах / Кузін В.О., Алаб'єв В.Р., Яковенко А.К. та інші. Стандарт Міненерговугілля України. Київ: Міненерговугілля України. 2011. 188 с.

#### REFERENCES

1. Vengerov I.R. (2017), *Matematicheskoe modelirovanie evolutsionnih teplofizicheskikh protsessov v slozhnikh sistemakh geotekhnosfyri* [Mathematical modeling of evolutionary thermophysical processes in geotechnosphere complex systems], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Vengerov I.R., Molchanov A.N. and Kamchatniy A.A. (2014), "Mathematical modeling of desorbed methane filtration in inhomogeneous coal seams", *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, vol. 17, pp.27-37.
3. Vengerov I.R., Molchanov A.N. and Kamchatniy A.A. (2015), "Basic models of methane recovery in inhomogeneous coal seams", *Proc.of the International scientific conference "Forum of Mining Engineers"*, National Mining University, Dnepropetrovsk, pp. 115-123.
4. Vengerov I.R., Molchanov A.N. and Kamchatniy, A.A. (2016), "Analytical solutions of methane filtration problems in inhomogeneous coal seams", *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, vol. 18, pp.26-39.
5. Sklyarov L.A., Krivitskaya, R.N. and Strukovskaya, T.V. (1982), "Determination of coal bed methane intensity by calculation method", *Ugol Ukrainy*, vol. 7, pp. 37-38.
6. Premysler, U.S. and Yanovskaya, M.F. (1973), "Coal collection properties". *Physico-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physical chemistry of gas-dynamic phenomena in mines], Nauka, Moscow, SU, pp.19-83.



7. Ayruni A.T. (1970), *Osnovy predvaritel'noy degazatsii ugolnikh plastakh na bolshikh khlubinakh* [Basics of pre-degassing coal seams at great depths], Nauka, Moscow, Russia.
8. Kogan G.L. and Krupenya V.G. (1973), "Physical basis of degassing outburst coal seams", *Physico-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physical chemistry of gas-dynamic phenomena in mines], Nauka, Moscow, SU, pp. 84-117.
9. Ettinger I.L. (1966), *Gazoemkost iskopaemikh ugley* [Fossil coal gas intensity], Nedra, Moscow, SU.
10. Kuznetsova S.V. and Krigman R.N. (1978), *Prirodnyay pronitsaimost ugolnikh plastov i metodi yeye opredelenia* [Natural permeability of coal seams and methods of its determination], Nauka, Moscow, SU.
11. Alexeev A.D. (2010), *Fizyka uglya i gornykh prothessov* [Coal and mining processes physics], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
12. Vengerov I.R. (2008), "Part 1. Paradigm analysis", *Teplofizika shakht i rudnikov. Matematicheskiye modeli*. [Thermal physics of mines and mining camps. Mathematical models], Nord-Press, Donetsk, Ukraine.
13. Diedich I.O. (2016), «Parameters of coal seams extraction using progressing drilling of degassing wells from the surface», Ph.D. Thesis, Underground mining of mineral deposits, SHEI "National Mining University", Dnipro, Ukraine.
14. Gimatudinov Sh.K. and Shirkovskiy A.I. (1982), *Fizika neftynogo i gazovogo plasta* [Oil and gas reservoir physics], Nedra, Moscow, SU.
15. Ukraine Ministry of Coal Industry (2011), *SOU-N 10.1.00174088.027:2011 Prohnozuvanny ta normalizatsia teplovikh umov u vyhilnikh shakhtah* [SOU-N 10.1.00174088.027:2011 Forecasting and normalization of thermal conditions in coal mines], Official publ. of Kyiv. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, Kiev, UA.

### Об авторах

**Молчанов Александр Николаевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, [molchanov@nas.gov.ua](mailto:molchanov@nas.gov.ua).

**Венгеров Игорь Рувимович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Физики сорбционных процессов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, [vengerov1947@gmail.com](mailto:vengerov1947@gmail.com)

**Дедич Иван Александрович**, кандидат технических наук, ведущий специалист Дирекции по охране труда, промышленной безопасности и экологии, Приватное акционерное общество «Донецксталь» - металлургический завод (ПРАО «ДМЗ»), Покровск, Украина, [dedichia@gmail.com](mailto:dedichia@gmail.com)

**Пичка Татьяна Владимировна**, старший научный сотрудник отдела Физики сорбционных процессов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [vogel.tae@gmail.com](mailto:vogel.tae@gmail.com)

**Троцкий Григорий Аронович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Физики сорбционных процессов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, [troitckiy@gmail.com](mailto:troitckiy@gmail.com).

**Камчатный Алексей Анатольевич**, магистр, младший научный сотрудник отдела Физики сорбционных процессов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, [ifgp-kaa@i.ua](mailto:ifgp-kaa@i.ua).

### About the authors

**Molchanov Aleksander Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Director, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, [molchanov@nas.gov.ua](mailto:molchanov@nas.gov.ua).

**Vengerov Igor Ruvimovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, [vengerov1947@gmail.com](mailto:vengerov1947@gmail.com)

**Diedich Ivan Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Leading Specialist of the Directorate for Labor Protection, Industrial Safety and Ecology, Private Joint-Stock Company «Donetsksteel» - Iron and Steel Works» (PJSC «Donetsksteel» - Iron and Steel Works»), Pokrovsk, Ukraine, [dedichia@gmail.com](mailto:dedichia@gmail.com)

**Pichka Tatiana Vladymirovna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, [vogel.tae@gmail.com](mailto:vogel.tae@gmail.com)

**Troitckiy Grygory Aronovich**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, [troitckiy@gmail.com](mailto:troitckiy@gmail.com).

**Kamchatniy Aleksey Anatolievich.**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Physics of Sorption Processes, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, [ifgp-kaa@i.ua](mailto:ifgp-kaa@i.ua)

**Анотація.** У статті досліджується проблема завчасного визначення параметрів метановиділення в гірничу виробку на основі гірничо-геологічних даних вугільного пласта, для якого виконується планування проведення гірничих робіт і, зокрема, визначаються параметри вентиляції шахтних виробок. Для визначення параметрів

метановиділення в гірничу виробку пропонується використовувати методи математичного моделювання масопереносу метану в неоднорідних вугільних пластах. Розглядається можливість застосування запропонованої авторами раніше моделі фільтрації метану в неоднорідному вугільному пласті для виконання практичних розрахунків метановіддачі пласта (тобто виходу метану в лаву через поверхню вибою). Проаналізовано умови застосовності ізотерм сорбції Генрі і Ленгмюра для наукових і інженерних розрахунків. Знайдено діапазони зміни параметрів ізотерм для реальних умов (температура, глибина залягання вугільного пласта, вихід летючих вугілля) і проведено оцінки їх застосовності.

Виходячи з наявних шахтних даних, що характеризують вугільний пласт, авторами проведено розрахунок метаноємності і бароємності вугілля. Для цього проведено аналіз параметрів запропонованої математичної моделі для реальних умов пласта  $d_4$  блоку 10 ш/у «Покровське», використовуючи дані для двох лав, для яких виконані розрахунки фільтраційних параметрів, необхідних для визначення метаноотдачі пласта. Проведено порівняння отриманих результатів з реальними шахтними даними.

Результати дослідження показують, що використання в наукових і інженерних розрахунках ізотерм сорбції метану по Генрі можливо тільки для ситуацій (досить рідкісних), коли параметри тиску метану в різних точках вугільного пласта не перевищують 4,53 атм. У більшості реальних ситуацій слід використовувати ізотерму Ленгмюра. Емпіричні формули для обчислення метаноємності вугілля добре узгоджені між собою і дозволяють отримувати результати, що задовільно узгоджуються з дослідними даними. Запропонована раніше авторами модель фільтрації метану в неоднорідному вугільному пласті є адекватною, оскільки в її рамках вдається визначити (з залученням емпіричних кореляцій) фільтраційні параметри і знайти питому метановіддачу пласта, які по величині близькі до визначених на основі практичних шахтних вимірів. Підтверджено ефективність системного підходу до математичного моделювання процесів переносу в геотехногенних системах.

**Ключові слова:** фільтрація, масоперенос, вугільний пласт, математичне моделювання.

**Annotation.** The problem of the preliminary determination of methane emission parameters to the mine working on the basis of mine-geological information of coal seam, for which planning of conducting of mine works is executed, is explored in the article. In particular, the parameters of ventilation of the mine workings are determined. For determination of parameters of methane emission to the mine working it is suggested to use the methods of mathematical design of mass transfer of methane in heterogeneous coal seams. Applicability of offered by authors before the model of methane filtration in a heterogeneous coal layer for implementation of practical calculations of methane efficiency of seam (i.e. output of methane in wall face through the surface of face) is examined. The conditions of applicability of isotherms of sorption of Henry and Lengmyur for scientific and engineering calculations are analysed. The ranges change of parameters of isotherms change are found for the real conditions (temperature, depth of bedding of coal seam, output of coal volatile) and estimations of their applicability are conducted.

Coming present in a presence mine information characterizing a coal seam, authors conduct the calculation of methane capacity and barocapacity of coal. The analysis of parameters of the offered mathematical model for the real conditions of seam  $d_4$  block 10 MM «Pokrovskoe» is conducted for this purpose, using information for two wall faces, for which the calculations of filtration parameters necessary for determination of seam methane efficiency layer are executed. Comparison of the got results with the real mine information is conducted.

Research results show that the use in the scientific and engineering calculations of methane sorbtion isotherms of Henry is possible only for situations (enough rare), when the parameters of methane pressure in different points of coal seam do not exceed 4,53 atm. In most real situations it is necessary to use the Lengmyur isotherm. Empiric formulas for the calculation of coal methane capacity is good concerted between itself and is allowed to get results satisfactorily concordant with experimental information. The model of methane filtration in a heterogeneous coal layer offered by authors before is adequate, as in its scopes it is succeeded to define (with bringing of empiric correlations) filtration parameters and find specific seam methane efficiency, which on a size are near to certain on the basis of the practical mine measurings. Efficiency of systems approach to the mathematical design of processes of transfer in the geotechnogen systems is confirmed.

**Keywords:** filtration, mass transfer, coal seam, mathematical design.

*Стаття надійшла до редакції 25.09. 2019*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Курносовим С.А.*