

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/06NZVN225.pdf>

DOI: 10.15862/06NZVN225 (<https://doi.org/10.15862/06NZVN225>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Архипов, И. А. Аналитическая оценка эмиссии метана при добыче угля открытым способом / И. А. Архипов // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/06NZVN225.pdf>.

DOI: 10.15862/06NZVN225.

For citation:

Arhipov I.A. Simulation of methane emission during open coal mining. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 06NZVN225. Available at: <https://esj.today/PDF/06NZVN225.pdf>. DOI: 10.15862/06NZVN225. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.064.2.001.18

Архипов Игорь Александрович

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия
Аспирант

E-mail: Condr-95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6557-1471>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=996965

Аналитическая оценка эмиссии метана при добыче угля открытым способом

Аннотация. Согласно статистической отчетности угольных предприятий за 2015–201 гг. 43 разреза ведут работы в метановой зоне. При этом можно констатировать, что на предприятиях не разрабатываются мероприятия по снижению выбросов парниковых газов.

Во многом это связано с отсутствием нормативных требований к эмиссии метана на разрезах. Отсутствует проработанный методический подход данной проблемы. Цель исследования — обеспечить аналитические решения задач газовыделения при открытой разработке на основе моделирования.

В работе представлены результаты моделирования эмиссии метана при добыче угля открытым способом и решения аналитической задачи оценки эмиссии метана. Анализ проводился по трем источникам эмиссии метана: при бурении скважин для взрывных работ; от обнажения углепородного массива; и при транспортировке угля.

По результатам исследования были проанализированы основные источники эмиссии метана в атмосферу при ведении открытых горных работ по добыче угля. Также было учтено, что метан может выделяться, как от угольных пластов, так и от вмещающих пород.

Анализу был подвергнут усредненный разрез, ведущий работу в метановой зоне. Были выявлены закономерности газовыделения в зависимости от величины проницаемости, геометрических параметров поля разреза, буровзрывных скважин, размеров частиц угля и других параметров.

Определено, что значения газовыделения могут влиять на концентрацию метана в атмосфере разреза, а также на пожарную безопасность ведения открытых горных работ. Актуализированы исследования по определению возможности превышения предельно допустимой концентрации метана в атмосфере разреза и возможности его возгорания.

Ключевые слова: эмиссия метана; экологическая безопасность; открытые горные работы; буровзрывные работы; моделирование; решение аналитических задач; фильтрация; источник газовой выделения

Введение

В соответствии с международными и отечественными нормативными актами, сформированы основные обязательства по снижению выбросов парниковых газов перед международным сообществом для Российской Федерации.

Согласно проведенным исследованиям [1], эмиссия метана при добыче угля открытым способом составляет 22,74 м³/мин (или 280 000 мг/с). Например, эмиссия метана от Солнцевского разреза — 0,013–0,023 м³/мин. При этом, на 1 тонну добытого угля приходится порядка 0,035 м³/мин эмитированного метана. Это ставит задачу перед научным сообществом решения вопроса инвентаризации источников выбросов метана угольных пластов, разрабатываемых открытым способом и повышения экологической безопасности разрезов с точки зрения снижения эмиссии метана.

Прежде чем решить вопрос повышения экологической безопасности открытых горных работ, необходимо проанализировать основные источники газовой выделения в окружающую среду. Важно ранжировать источники эмиссии и определить основные закономерности газовой выделения в атмосферу рабочего пространства разреза. Добыча угля традиционно сопровождается выделением азота, углекислого газа и метана [1]. Газоносность пластов растет вместе с глубиной залегания. Кроме того, с глубиной углекислый газ замещается метаном. Таким образом, важно обратить внимание при формировании модели, что она актуальна для разрезов, ведущих свою разработку в метановой зоне.

Цель исследования — разработать модель эмиссии метана при добыче угля открытым способом и решить аналитическую задачу газовой выделения на разрезе.

Методология научных исследований

При проведении исследования применялось моделирование эмиссии метана на разрезе и аналитическое решение задачи оценки газовой выделения. При решении аналитической задачи эмиссии метана на угольном разрезе следует отметить три принципиально различающихся по характеристикам источника загрязнения окружающей среды, проявляющихся в следующей последовательности:

1. Буровзрывные скважины. Бурение скважины является начальным этапом формирования добычного уступа. Эмиссия метана из этого источника зависит от технологических и горно-геологических параметров, слагающих пород, по которым проходит скважина, метаноносности и др. В модели учли 2 сценария: скважина может проходить по углю и по вмещающим породам.
2. Газовыделение при обнажении угольного массива и вмещающих пород. В процессе работ по выемке угля происходит эмиссия метана от обнажаемых поверхностей в результате продвижения работ. В модели рассмотрены оба сценария: и газовыделение от угля и от вмещающих пород.
3. Эмиссия метана в процессе транспортировки за пределы разреза, которая в основном зависит от газоносности, размера угольной фракции и фильтрационных характеристик угля.

Таким образом, рассмотрено 3 процесса: газовыделение от скважин, пройденных по вмещающим породам и углю; газовыделение при обнажении вмещающих пород и угольных пластов; газовыделение от транспортируемого угля.

Результаты

Схематически модель представлена на рисунках 1 и 2. Присутствуют три вида источников газовыделения: эмиссия метана от обнажения угля и вмещающих пород (4 и 3 на рисунке 1); эмиссия метана при бурении буровзрывной скважины по углю и по вмещающим породам (2 и 1 на рисунке 1); эмиссия метана при транспортировке угля (5 на рисунке 1). Кроме того, эмиссия метана происходит от отбитого угля, находящегося в состоянии покоя.

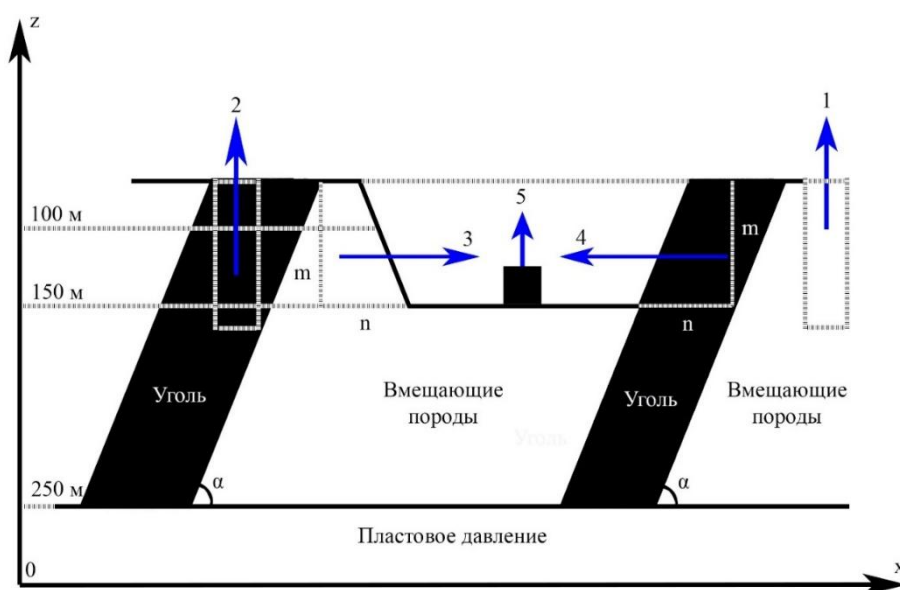


Рисунок 1. Модель эмиссии метана при добыче угля открытым способом (разработано автором)

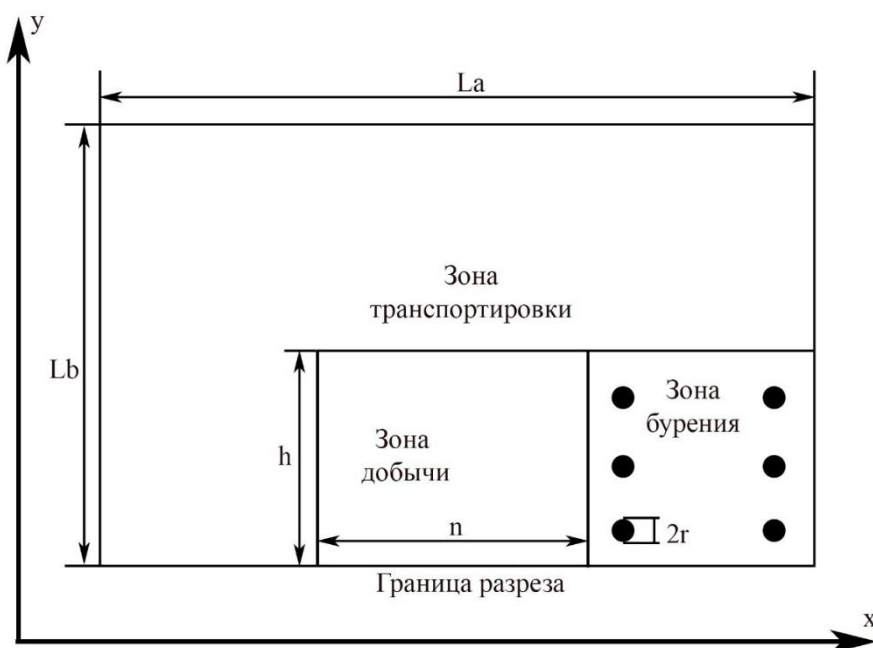


Рисунок 2. Схема добычи угля на разрезе (разработано автором)

Угол α на рисунке 1 — угол падения пласта. На рисунке 2 r — это радиус скважин буровзрывных работ. Технологическими параметрами обнажения угля или пород являются длина и ширина добычной площадки (h и n). Высота заходки обозначена m . А также высота разрабатываемого участка m . L_a и L_b — длина и ширина разреза.

Модель эмиссии метана на разрезе разработана в соответствии с циклом производства работ: сначала проведение буровзрывных работ, затем извлечение угля методом экскавации и его транспортировка за пределы разреза. Отдельно изучено газовыделение от вмещающих пород.

При этом можно констатировать, что на предприятиях не разрабатываются мероприятия по снижению выбросов парниковых газов.

Во многом это связано с отсутствием нормативных требований к эмиссии метана на разрезах. Отсутствует проработанный методический подход данной проблемы. Необходимо обеспечить аналитические решения задач газовыделения при открытой разработке на основе моделирования.

Газовыделение в процессе бурения скважины

Эмиссия метана в процессе бурения скважины проиллюстрирована на рисунке 3. Скважина диаметром $2r$ пробурена по угольному пласту. На рисунке точкой A обозначена максимальная глубина скважины. На которой наблюдается максимальное давление $P_{пл}$. В начале бурения, в зоне устья скважины давление равно атмосферному P_0 .

Обозначим, что выделение метана возможно при неосложненном процессе бурения в случае, если $P_{пл}$ [2]:

$$P_0 < P_{пл}, \quad (1)$$

где:

P_0 — давление в начале бурения скважины равное атмосферному, Па;

$P_{пл}$ — пластовое давление, Па.

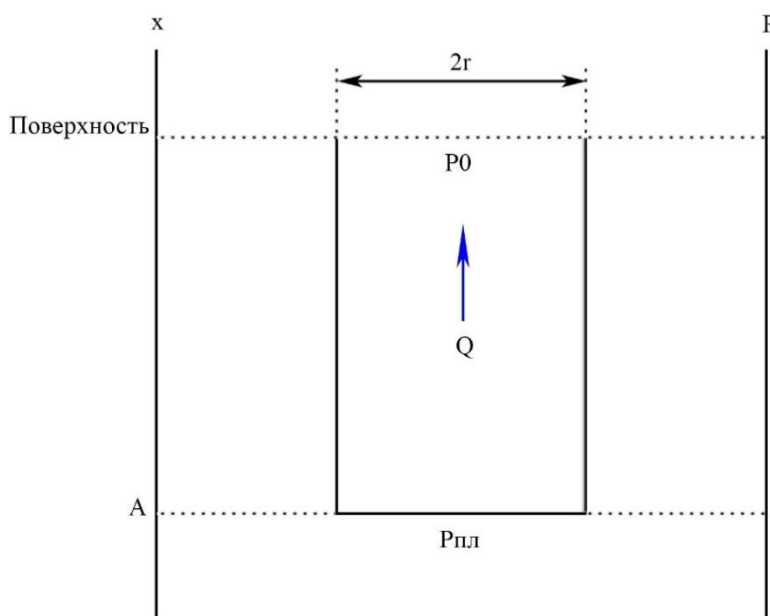


Рисунок 3. Эмиссия метана в процессе бурения буровзрывной скважины (разработано автором)

При этом примем условие, что:

$$P(\infty, t) = P_{пл}, \quad (2)$$

$$P(A, 0) = P_0. \quad (3)$$

Применим отражающий линейный закон фильтрации Дарси для составления уравнения массопереноса свободного газа с учетом изотерм сорбции Ленгмюра [3–5]:

$$p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 = \frac{\mu \cdot \Pi}{k} \left[1 + C \frac{ab}{(1 + ap)^2} \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

где:

$p = p(x, t)$ — давление газа, Па;

t — время, с;

μ — динамическая вязкость газа, Па·с;

k — коэффициент проницаемости, м²;

C — размерный коэффициент;

a, b — параметры изотермы сорбции Ленгмюра;

x — пространственная координата, м;

Π — пористость.

С учетом принятых условий газовыделение равно:

$$Q_{скв} = \left(\frac{\pi A (P_{пл}^2 - P_0^2)}{P_0 \mu \left(\ln r_{скв} + \frac{1}{k} \right)^2} \right). \quad (5)$$

Добавляя коэффициенты Ленгмюра объем протекающего газа (Q , м³/мин) при заданных условиях определяется законом Дарси для дебита газа [6–9]:

$$Q_{скв} = \left(\frac{\pi A (P_{пл}^2 - P_0^2)}{P_0 \mu \left(\ln r_{скв} + \frac{1}{k} \right)^2} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + aP_{пл})^2} \right). \quad (6)$$

В соответствии с моделью (рис. 1) запишем условия работы скважины.

Исходные данные приведены в таблице 1. Отдельно определим зависимость газовыделения от проницаемости угля (рис. 4). Условием задачи будет, что $P_{пл}$ равняется 200 кПа [10]. Также учтем, что P_0 — это атмосферное давление (101,325 кПа) и μ равняется 12 Па·с для метана [11]. Коэффициенты Ленгмюра определим в следующих размерах: $a = 0,11 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹; $b = 50$ т/м³ [12]. Проницаемость определим в интервале $3,6 \cdot 10^{-12}$ – $3,6 \cdot 10^{-13}$ м² [14]. Остальные показатели переменные. Результаты представлены на рисунке 5.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования газовыделения из буровзрывных скважин

k , м ²	P_0 , кПа	$P_{пл}$, кПа	A , м	μ , Па·с	$r_{скв}$, м	a , Па ⁻¹	b , т/м ³
$3,6 \cdot 10^{-12}$ – $3,6 \cdot 10^{-13}$	101,325	200	16–22	12	0,07–0,138	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Разработано автором

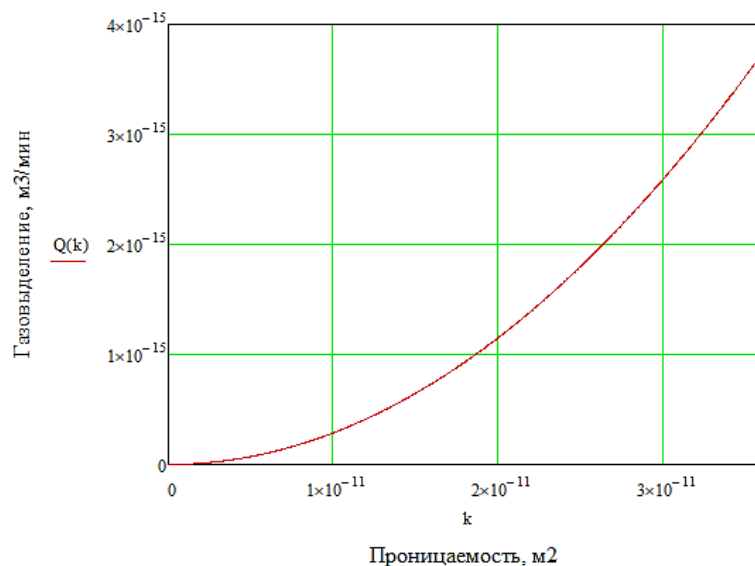


Рисунок 4. Зависимость газовыделения из буровзрывных скважин от проницаемости (разработано автором)

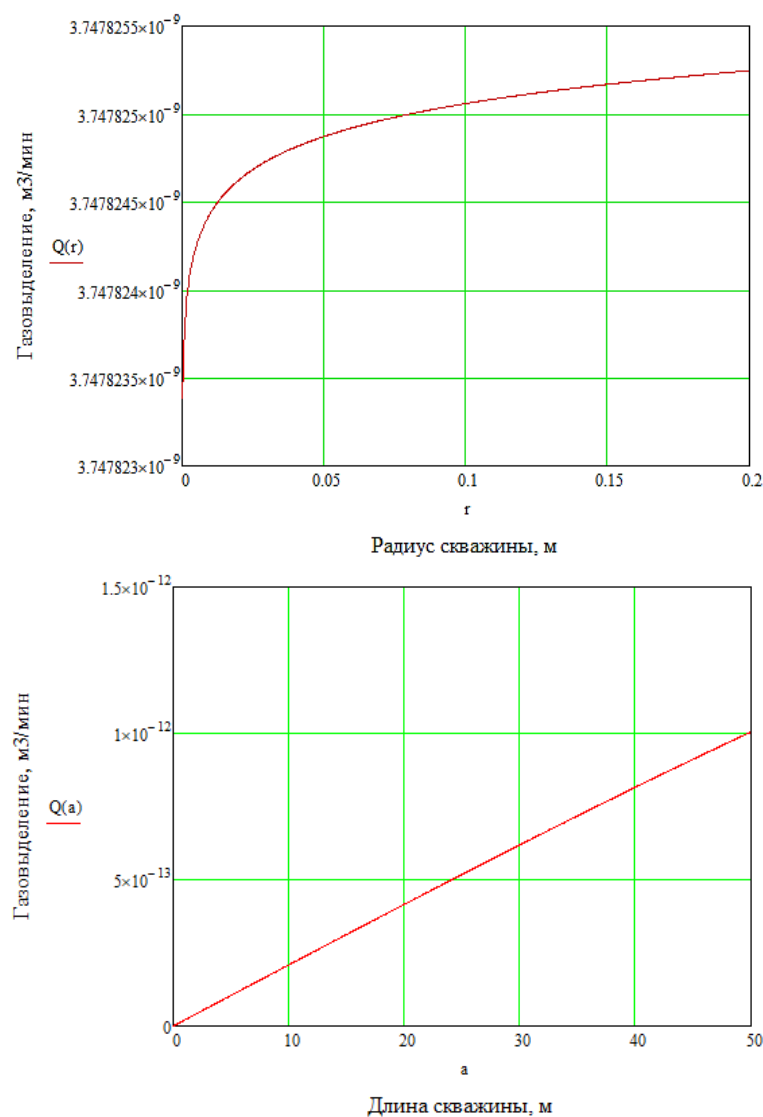


Рисунок 5. Зависимость газовыделения от диаметра и длины скважины (разработано автором)

Газовыделение при обнажении угольного массива

Фильтрация газа из пласта в атмосферу происходит под воздействием градиента давлений при статичном распределении газа в угольном пласте в начальный момент времени. Решение задачи опирается на условие, что начальное давление метана распределено равномерно по пласту и таким образом равно пластовому. На границе пласт-атмосфера давление (P) равно атмосферному, а на бесконечном удалении от источника эмиссии неизменно и равно пластовому.

Уравнение фильтрации газа при обнажении газового массива в случае постановки одномерной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[P\rho + \frac{abp}{(1+ap)} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0, \quad (7)$$

где:

ρ — плотность газа, кг/м³.

В связи с обозначенными данными запишем граничные и начальные условия:

$$P(x, 0) = P_{пл}. \quad (8)$$

$$P(\infty, t) = P_{пл}. \quad (9)$$

$$\frac{\partial P(\infty, t)}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

$$p(0, t) = p_0. \quad (11)$$

Определим газовыделение при движении очистных работ по направлению x на рисунке 2. При этом поставим задачу, что расчет происходит при ширине захватки h и глубине n (рис. 1 и 2):

$$Q(v) = m \int_0^L q \left(0, \frac{L-y}{v} \right) dy, \quad (12)$$

где:

$Q(v)$ — сумма притоков метана из зоны обнажения, м³/мин;

v — скорость движения выемочного оборудования, м/мин;

m — мощность разгружаемой зоны обнажения (рис. 1), м;

L — длина разреза, м;

$q \left(0, \frac{L-y}{v} \right)$ — удельный приток метана с поверхности обнажения в направлении y в

момент времени $t = \frac{L-y}{v}$.

Удельный приток метана ($q(n, t)$, м³/т) при обнажении угля определяется по формуле:

$$q(n, t) = \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial p(n, t)}{\partial n} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1+ap(n, t))^2} \right). \quad (13)$$

Принято допущение о плоскопараллельном потоке метана в толще угольного пласта и из него при обнажении. Выемочное оборудование углубляется в толщу угля или породы за время T на глубину n . При этом работы ведутся на площадке длиной h и шириной n . Схематически представлено на рисунках 1 и 2. Газовыделение определяется в этом случае:

$$Q_{изв} = m \cdot L \cdot q(n, t), \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (14)$$

Определим зависимости газовыделения при обнажении угля (источник 4 на рисунке 1, соответственно). Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для моделирования газовыделения при обнажении угля

$k, \text{ м}^2$	$L, \text{ м}$	$n, \text{ м}$	$m, \text{ м}$	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$p(x, t), \text{ Па}$	$a, \text{ Па}^{-1}$	$b, \text{ т/м}^3$
$3,6 \cdot 10^{-12} - 3,6 \cdot 10^{-13}$	300–4 000	100–1 000	5–30	12	150 000	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Разработано автором

Отдельно определим зависимость газовыделения от проницаемости с учетом того, что ширина зоны равна 5–30 м. Оставим $\mu = 12 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Коэффициенты Лэнгмюра определим в следующих размерах: $a = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$; $b = 50 \text{ т/м}^3$. А изменение зоны обнажения меняется в пределах 100–1 000 м. Длину разреза возьмем 300–4 000 м. Предположим, что диапазон пластового давления изменяется от 100 000 Па до 200 000 Па. Результаты представлены на рисунках 6, 7.

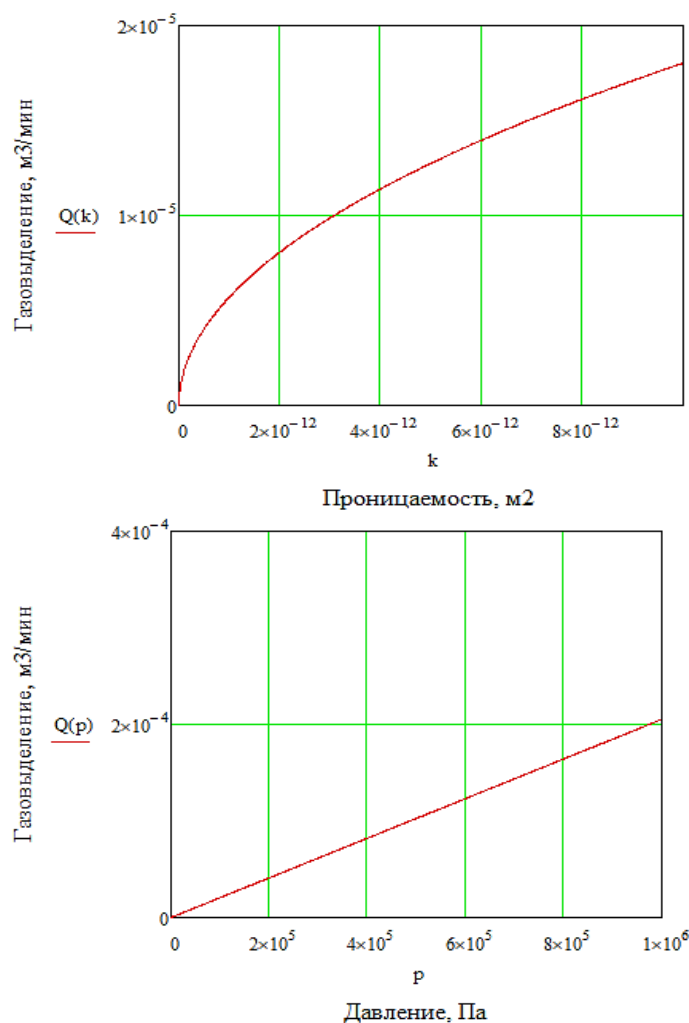


Рисунок 6. Зависимость газовыделения от проницаемости угля и давления газа (разработано автором)

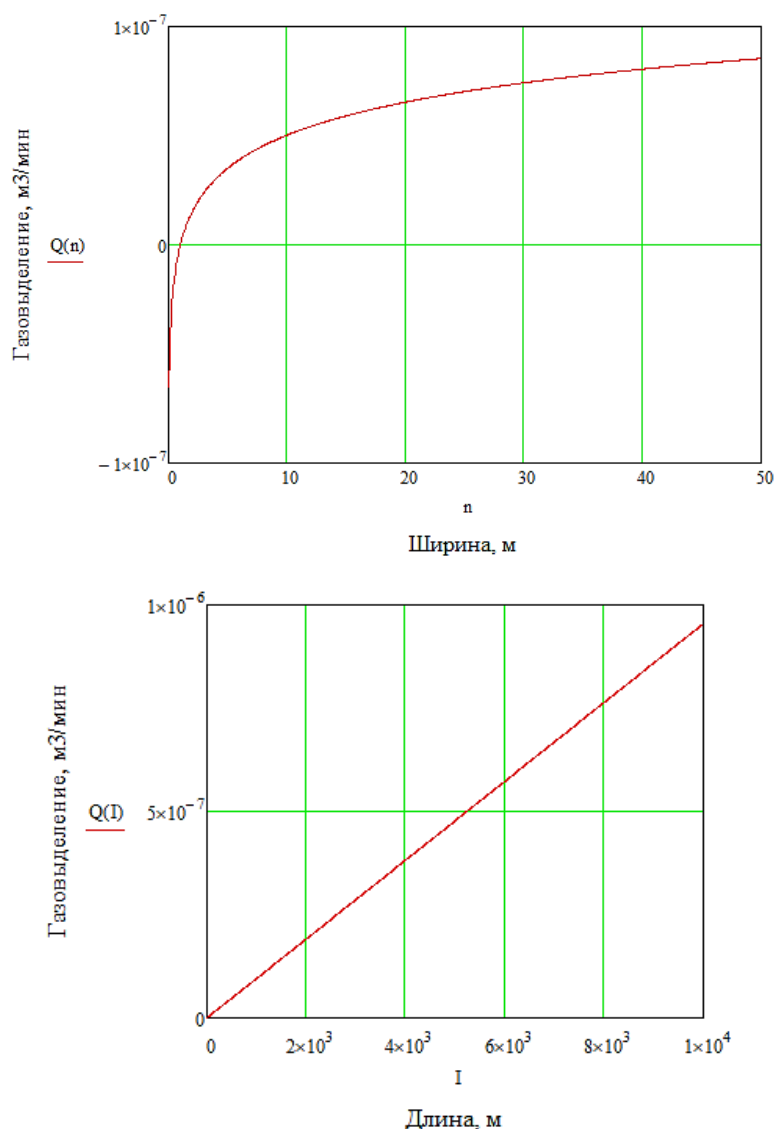


Рисунок 7. Зависимость газовыделения от длины выемочного участка и ширины зоны извлечения при обнажении угля (разработано автором)

Газовыделение из отбитого угля

Предположим, что газовыделение из кусков угля происходит исключительно из сферических частиц (5 — на рисунке 1). Для такой сферической системы координат формула (7) применяется в следующем виде [13; 14]:

$$P_r \frac{\partial^2 P_r}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial P_r}{\partial r} \right)^2 + \frac{2}{r} P_r \frac{\partial P_r}{\partial r} = \frac{\mu \Pi}{k} \left(1 + A \frac{ab}{(1 + aP_r)^2} \right) \frac{\partial P_r}{\partial t}, \quad (15)$$

где:

$$P_r = P(r, t);$$

r — радиус кусков угля, м.

Решим задачу о выделении метана из отбитых кусков угля в зоне его транспортировки до удаления его за границу разреза. Примем условие, что в начальный момент времени уголь

насыщен метаном под давлением $P_{нач}$. Обозначим, что давление метана в кусках угля, расположенных на транспортной линии (конвейер или автотранспорт), одинаково. В этом случае начальное условие:

$$P_r(r, 0) = P_{нач} . \quad (16)$$

где:

$P_{нач}$ — начальное давление в частице угля, радиусом r (м), Па.

В качестве допущения примем следующие граничные условия:

$$P(r, t) = P_0 . \quad (17)$$

$$\frac{\partial p(0, t)}{\partial r} = 0 . \quad (18)$$

Время нахождения угля в зоне его транспортировки зависит от длины транспортной линии (м) и начального местонахождения транспортного средства (y , м) и скорости его движения (v , м/мин). Удельный радиальный поток метана равен:

$$q(r, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r} , \text{ м/мин.} \quad (19)$$

А объем выделившегося метана (m^3) равен:

$$V(t) = 4\pi r^2 \int_0^t q(r, t) dt . \quad (20)$$

Снижение газоносности частицы равно:

$$q(t) = \frac{V(t)}{\rho \frac{4\pi r^3}{3}} , \text{ м}^3/\text{т.} \quad (21)$$

Интенсивность газовыделения при заданных параметрах равна:

$$Q_{отб} = \left(1 - \frac{z}{100}\right) v m h \frac{3}{r} q(t) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + aP_r)}\right) , \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (22)$$

где:

z — зольность, %.

Определим зависимость газовыделения при транспортировке угля от его ключевых параметров. Коэффициенты Лэнгмюра определим в следующих размерах: $a = 0,11 \cdot 10^{-6}$ Па $^{-1}$; $b = 50$ т/м 3 . Учтем, что зона обнажения угля, который транспортируется за пределы разреза, имеет ширину 40 м, а расстояние до границы разреза является переменной величиной. Зольность угля составит 20 %, что соответствует коксовым углям [15]. ρ варьируется в пределах 1–1,7 м 3 /т для угля [16], размер частиц угля также представим величиной переменной в интервале 0–0,3 м.

Распределение по размерам представлено в таблице 3, также присутствуют и размеры частиц вмещающих пород. Скорость транспортировки угля составит 200–300 м/мин.

Исходные данные для моделирования представлены в таблице 4. Результаты моделирования представлены на рисунке 8. Дополним, что при построении зависимостей, остальные параметры не меняются.

Таблица 3

Распределение по размерам частиц угля и породы при добыче открытым способом

Уголь/порода	Вид угля	Марка угля	Размер куска, м
Уголь	Необогащенные энергетические	СС	0–0,3
	Уголь каменный	Д	0–0,07
	Энергетические бытовые	Д, Г, Т	0–3
	Коксовые	ОС, КС	0–0,2
Вмещающие породы	Граниты, сиениты	—	0,42–0,58
	Кварциты, альбитофиры, такониты, серпентиты, порфириды, доломиты	—	0,1–0,42

Разработано автором

Также обозначим, что газовыделение от вмещающих пород будет рассмотрено отдельно. В связи с тем, что некоторые вмещающие породы имеют более высокую проницаемость, исследование газовыделения от вмещающих пород имеет особый интерес.

Таблица 4

Исходные данные для моделирования
газовыделения от частиц отбитого угля и вмещающих пород

z , %	v , м/мин	h , м	m , м	r , м	a , Па ⁻¹	b , т/м ³
10–50	200–300	20–40	5–30	0,1–0,91	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

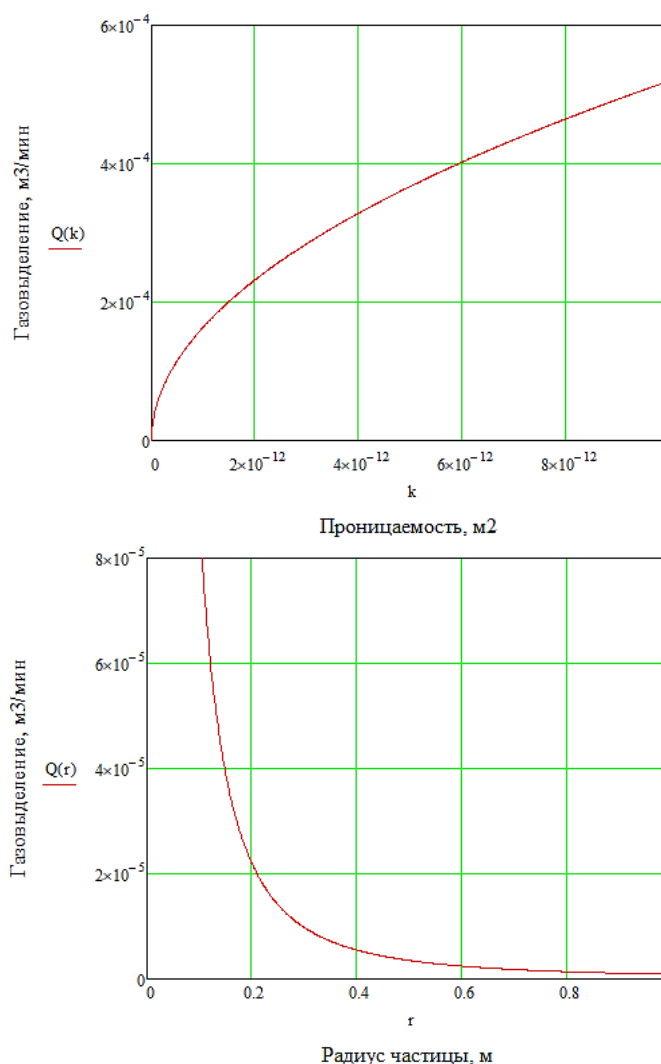


Рисунок 8. Зависимость газовыделения от отбитых частиц угля (разработано автором)

Газовыделение при проведении технологических процессов по вмещающим породам

Отражающий линейный закон фильтрации Дарси [4; 7] для составления уравнения массопереноса свободного газа по вмещающим породам имеет вид:

$$\frac{kP\Pi}{\mu P_0(2x)} = \frac{k}{\mu} \frac{(P_{\Pi\Pi}^2 - P_0^2)\Pi}{2P_0(2x)}, \quad (23)$$

где:

$r_{скв}$ — диаметр скважины, м.

Объем протекающего газа (Q , м³/мин) при заданных условиях определяется законом Дарси для дебита газа по вмещающим породам [3; 5–7]:

$$Q_{скв} = \left(\frac{\pi A (P_{\Pi\Pi}^2 - P_0^2)}{P_0 \mu \left(\ln r_{скв} + \frac{1}{k} \right)^2} \right), \quad (24)$$

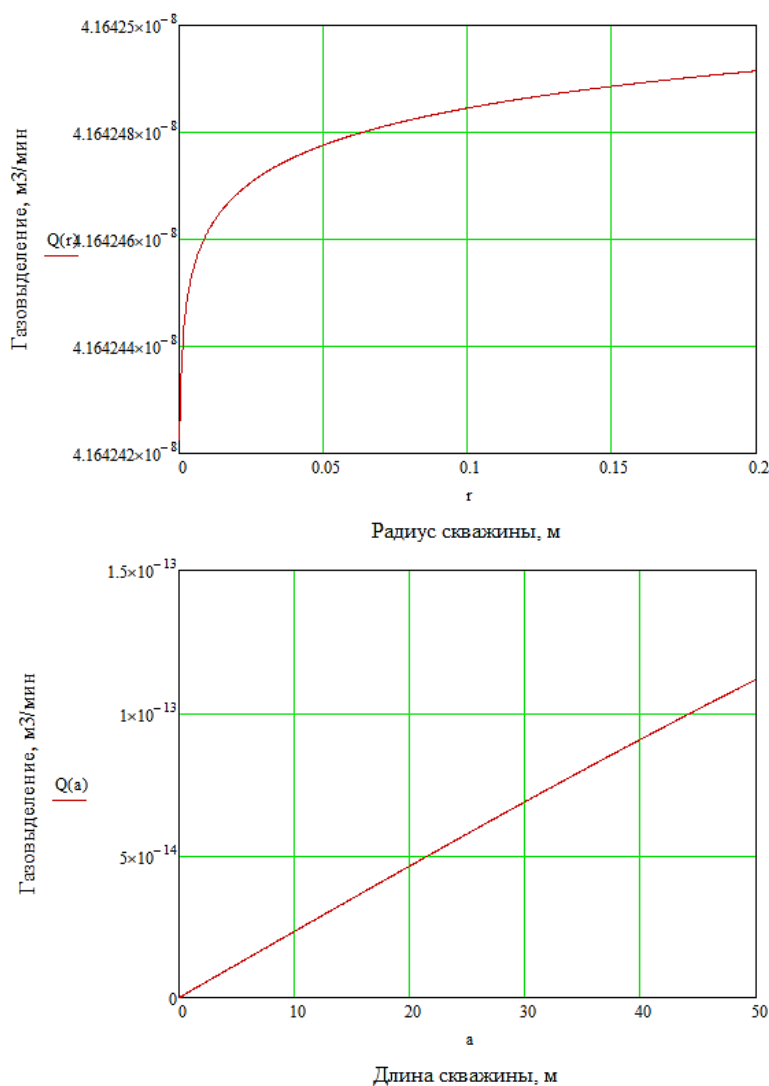


Рисунок 9. Зависимость газовыделения из вмещающих пород от диаметра и длины скважины (разработано автором)

В соответствии с моделью (рис. 1) запишем условия работы скважины, проходящей по супеси в качестве вмещающих работ. Оставим неизменными, исходные данные приведённые в таблице 1, актуализировав их для вмещающих пород (табл. 5). Проницаемость определим в интервале $1,2 \cdot 10^{-12} - 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ [11]. Результаты представлены на рисунке 9.

Таблица 5

Исходные данные для моделирования газовыделения из буровзрывных скважин

$k, \text{ м}^2$	$P_0, \text{ кПа}$	$P_{пл}, \text{ кПа}$	$A, \text{ м}$	$\mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$r_{св}, \text{ м}$
$1,2 \cdot 10^{-12} - 1,2 \cdot 10^{-13}$	101,325	200	16–22	12	0,07–0,138

Разработано автором

Удельный приток метана ($q(n, t)$, $\text{м}^3/\text{т}$) из обнажаемой породы при её извлечении методом экскавации определяется по формуле:

$$q(n, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(n, t)}{\partial n}. \quad (25)$$

При этом газовыделение определим по формуле (16). Определим зависимости газовыделения при обнажении вмещающих пород (источник 3 на рисунке 1, соответственно). Исходные данные представлены в таблице 6. Обозначим, что они повторяют данные из таблицы 2. Результаты представлены на рисунке 10.

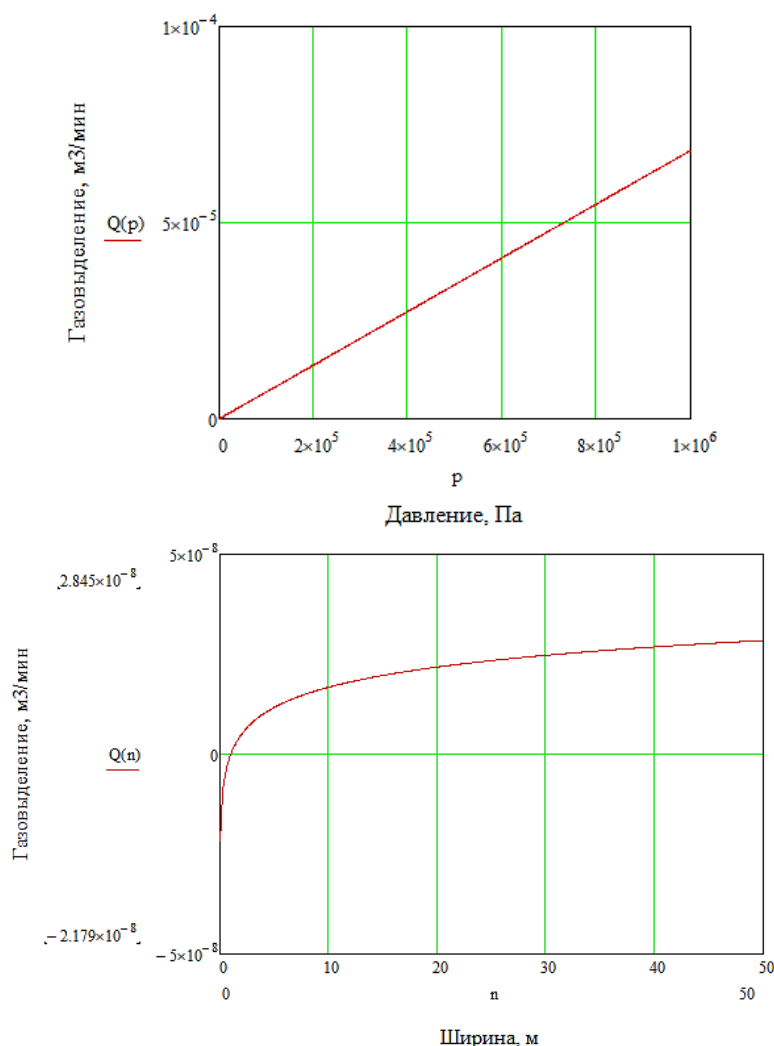


Рисунок 10. Зависимость газовыделения от давления газа и ширины зоны извлечения при обнажении вмещающих пород (разработано автором)

Таблица 6

Исходные данные для моделирования газовыделения при обнажении вмещающих пород

$k, \text{м}^2$	$L, \text{м}$	$n, \text{м}$	$m, \text{м}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$p(x, t), \text{Па}$
$1,2 \cdot 10^{-12} - 1,2 \cdot 10^{-13}$	300–4 000	100–1 000	5–30	12	100 000–200 000

Разработано автором

Интенсивность газовыделения при транспортировке частиц породы равна:

$$Q_{отб} = 0,99vmh \frac{3}{r} q(t), \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (26)$$

Определим зависимость газовыделения при транспортировке частиц породы от его ключевых параметров. Параметры разреза и добычи оставим те же, что применялись и для угля (табл. 4). Средняя ρ в пределах $2,7 \text{ м}^3/\text{т}$ для породы (супесь). Размер частиц породы также представим величиной переменной в интервале $0,1-0,91 \text{ м}$ для (распределение по размерам представлено в таблице 3). Исходные данные для моделирования представлены в таблице 7. Результаты моделирования представлены на рисунке 11. Дополним, что при построении зависимостей, остальные параметры не меняются.

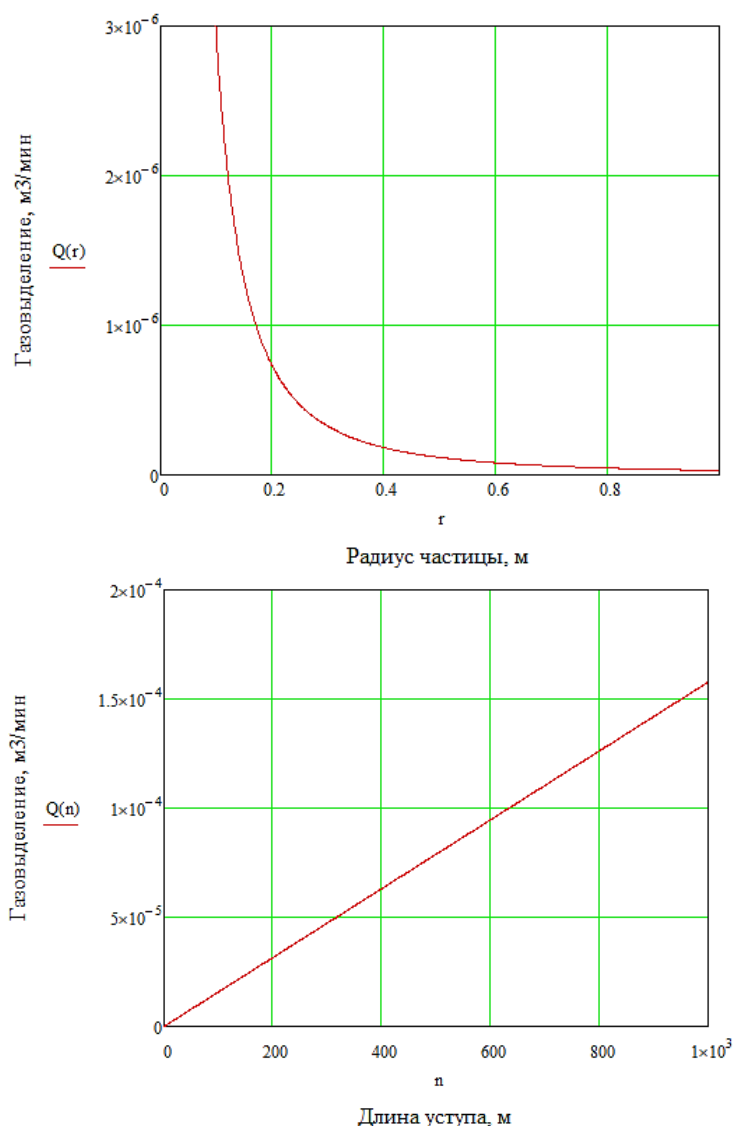


Рисунок 11. Зависимость газовыделения от длины транспортной линии и радиуса отбитых частиц вмещающих пород (разработано автором)

Таблица 7

**Исходные данные для моделирования
газовыделения от частиц отбитого угля и вмещающих пород**

v , м/мин	h , м	m , м	r , м
200–300	20–40	5–30	0–0,3

Разработано автором

Модель эмиссии метана на разрезе разработана в соответствии с циклом производства работ: сначала проведение буровзрывных работ, затем извлечение угля методом экскавации и его транспортировка за пределы разреза. Отдельно изучено газовыделение от вмещающих пород.

Обсуждение результатов

Проанализируем полученные результаты зависимости газовыделения от различных горно-технических условий добычи угля. Газовыделение экспоненциально зависит от проницаемости. В рассмотренных горногеологических условиях газовыделение будет в пределах $1 \cdot 10^{-15}$ – $4 \cdot 10^{-15}$ м³/мин.

Экспоненциальная зависимость наблюдается и при увеличении радиуса скважины. При проходке по углю увеличение происходит до $3,7 \cdot 10^{-7}$ м³/мин для скважин, радиусом 0,05 м. Далее идет постепенное замедление увеличения.

Прямая зависимость наблюдается от глубины скважин. Так, для скважин, глубиной 20 м газовыделение составит $5 \cdot 10^{-13}$ м³/мин.

Работы по добыче угля открытым способом приводят к увеличению газовыделения с поверхности обнажения горных пород. Выделение в атмосферу газовой смеси происходит в режиме фильтрации через поры и трещины угольного пласта, где газовая смесь находится под избыточным давлением.

При проницаемости угля $4 \cdot 10^{-13}$ м² газовыделение составит $1 \cdot 10^{-5}$ м³/мин, далее рост газовыделения замедляется. При длине зоны обнажения до 10 м газовыделение снижается от $6 \cdot 10^{-3}$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м³/мин при обнажении угля. Далее снижение газовыделения постепенно замедляется. Это связано с тем, что свободная часть газа выделяется при начале работ, далее происходит эмиссия сорбированного метана. При увеличении длины зоны обнажения газовыделение растет с 0 до $1 \cdot 10^{-4}$ м³/мин при обнажении угля. Зависимость от давления газа также прямая. При давлении $1 \cdot 10^6$ Па, обнажение угля приводит к газовыделению до $2 \cdot 10^{-4}$ м³/мин [17].

Чем выше значение проницаемости, тем больше газовыделение. Эмиссия увеличивается до $4 \cdot 10^{-4}$ м³/мин при транспортировке угля. При радиусе частицы 0,2 м газовыделение снижается до $2 \cdot 10^{-5}$ м³/мин.

При проведении работ по вмещающим породам зависимости схожи. Однако объем газовыделения ниже. Существенное увеличение газовыделения (до $4 \cdot 10^{-8}$ м³/мин) по вмещающим породам наблюдается уже для скважин, радиусом 0,05 м. Прямая зависимость наблюдается от глубины скважин. Так, для скважин, глубиной 20 м газовыделение составит для вмещающих пород до $5 \cdot 10^{-14}$ м³/мин.

При проницаемости $2 \cdot 10^{-13}$ м² породы газовыделение из обнажаемых пород методом экскавации составит $5 \cdot 10^{-6}$ м³/мин. При длине зоны обнажения до 10 м газовыделение снижается от $2 \cdot 10^{-3}$ м³/мин до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м³/мин при обнажении пород. При увеличении длины зоны обнажения газовыделение растет с 0 до $4 \cdot 10^{-5}$ м³/мин при выемке пород. При давлении $1 \cdot 10^6$ Па, обнажение пород приводит к газовыделению $5 \cdot 10^{-5}$ м³/мин.

Зависимость эмиссии метана от размера частиц породы прямая. Эмиссия увеличивается до $2 \cdot 10^{-6}$ м³/мин при транспортировке пород. При радиусе частицы 0,2 м газовыделение снижается до $1 \cdot 10^{-6}$ м³/мин.

Следует обратить внимание, что значения определены для усредненного разреза, работающего в метановой зоне. Среднесуточная добыча может быть намного больше, а параметры добычи (длина транспортной линии, размеры зоны обнажения, глубина скважин) могут быть значительно больше. Соответственно будет и больше эмиссия метана.

Заключение

Разработана модель эмиссии метана при добыче крутонаклонных пластов угля открытым способом.

Оценены основные источники выделения метана: от буровзрывных скважин; от обнажения угленосного массива вследствие взрыва и/или экскавации; от отбитых кусков угля.

Сделан вывод, что в случае добычи угля на усредненном разрезе, работающем в метановой зоне, возможны значительные показатели газовыделения. Это обуславливает необходимость оценки потенциальной эмиссии метана, определения возможной концентрации метана на рабочих местах возле источников газовыделения и разработки мероприятий в области обеспечения экологической и пожарной безопасности открытых горных работ с точки зрения воздействия метана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тайлаков, О.В., Застрелов Д.Н., Макеев М.П., Логинова А.В. К оценке эмиссии метана при добыче угля открытым способом. // Вестник научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2023. № 2. С. 35–40. DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.81.96.004.
2. Amnache A., Omri M., Fréchette L. A silicon rectangular micro-orifice for gas flow measurement at moderate Reynolds numbers: design, fabrication and flow analyses, Microfluidics and Nanofluidics, Springer Verlag, 2018, 22(6), DOI: 10.1007/s10404-018-2077-x.
3. Кондрачев С.А., Хамзина Т.А. Повышение качества концентрации во флотационном обогащении низкосортного угля // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 65–77. EDN RJTNNI.
4. Бахарев В.А. К теории и расчету свободных турбулентных струй. В сб. «Теория и расчет вентиляционных струй». Л., 1965. — С. 12–26.
5. Коликов К.С., Драгунский О.Н. Решение задач аэрологии и экологии карьеров в условиях взаимовлияния атмосферы выработанных пространств и окружающих их территорий. Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 35–41.
6. Гришин В.Ю., Мазаник Е.В., Шевченко Л.А. Новые технологии дегазации шахт Кузбасса / Безопасность жизнедеятельности. — 2014. — № 3 — С. 19–22.
7. Полубаринова-Кочина П.Я. О неуставновившейся фильтрации газа в угольном пласте. Прикладная математика и механика. Том XVII, 1953. Институт механики Академии наук союза СССР. С. 735–738.

8. Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластического давления методами искусственного интеллекта // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 23–32. DOI: 10.31897/PMI.2022.11.
9. Математическая модель циркуляционного движения капли жидкости в газовой среде / В.Н. Макаров, А.В. Угольников, Н.В. Макаров, А.А. Арсланов // Недропользование. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 188–192. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.7.
10. Poncelet, Jean-Pol; Fonseca-Colomb, Anabela; Grilli, Guilio. Enlarging ESA? After the Accession of Luxembourg and Greece (англ.) // ESA Bulletin: journal. — 2004. — November (no. 120). — P. 48–53.
11. Prokhorov A.V., Noskov I.V. Monitoring of main oil and gas pipelines using UAVs. The Eurasian Scientific Journal, 2022 T. 14 № 6: 40NZVN622. Available at: <https://esj.today/PDF/40NZVN622.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).
12. Киряева Т.А. К оценке энергии газовой составляющей угольного пласта. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 2. № 2. С. 3–7.
13. В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова, В.А. Трофимов, Ю.А. Филиппов. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений. Российская академия наук сибирское отделение физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 2. 2016 г. С. 16–25.
14. Nisbet G.N., Dlugokencky E.J., Bousquet P.E. Methane on the rise — Again // Science. 2014. V343. P. 493–495.
15. Солодов В.С., Папин А.В., Неведров А.В., Черкасова Т.Г. Оценка возможности применения коксовой пыли в технологии коксования. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 113–119.
16. А.Б. Жабин, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник, А. Цих. Особенности горно-геологических условий залегания угольных пластов основных бассейнов России. Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. Вып. 1. С. 250–260. DOI 10.46689/2218-5194-2022-1-1-250-260.
17. Ли Ху Ун, А.М. Рыков, Ю.М. Филатов, В.В. Огурецкий, С.А. Некрасов. Фильтрационная модель десорбции метана из отбитого угля при транспортировке его по конвейерной выработке // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2007. — № 2. — С. 9–35.

Arhipov Igor Alexandrovich

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

E-mail: Condr-95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6557-1471>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=996965

Simulation of methane emission during open coal mining

Abstract. According to statistical reports of coal enterprises for 2015–2019 43 open-pit mines are working in the methane zone. At the same time, it can be stated that enterprises are not developing measures to reduce greenhouse gas emissions.

This is largely due to the lack of a model for methane emission into the working area of the mine. The main sources of methane emissions from open-pit mines and the factors influencing them have not been identified. The purpose of the study is to determine the main sources of methane emissions during open-pit coal mining and the main characteristics on which gas emission depends.

In this regard, the paper presents the results of modeling methane emissions during open-pit coal mining and solving the analytical problem of methane emissions. The analysis was carried out for three sources of methane emissions: when drilling wells; from exposure of a carbon rock massif; and during coal transportation.

Based on the results of the study, the main sources of methane emissions into the atmosphere from open-pit coal mining were considered. It was also taken into account that methane can be emitted from both coal seams and host rocks.

An averaged cross section was analyzed, leading in the methane zone. Gas emission patterns depending on the permeability value, geometric parameters of the section field, drilling and blasting wells, coal particle sizes and other parameters were identified.

It was determined that the values of gas emission can affect the concentration of methane in the atmosphere of the section, as well as the fire safety of surface mining operations. Studies on determining the possibility of exceeding the maximum permissible concentration of methane in the atmosphere of the cut and the possibility of its ignition have been updated.

Keywords: methane emissions; environmental safety; open-pit mining; drilling and blasting; modeling; solving analytical problems; filtration; gas emission source