

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ НА РАЗРЕЗАХ, РАБОТАЮЩИХ В МЕТАНОВОЙ ЗОНЕ

И. А. Архипов✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

г. Москва, Российская Федерация

✉ condr-95@mail.ru

Аннотация: Почти половина разрезов России добывают уголь в метановой зоне. Это актуализирует исследования в области контроля концентрации метана в рабочей зоне карьера, а также в санитарной зоне. На разрезах присутствуют точечные, линейные и площадные источники метана. Ключевыми параметрами, влияющими на распространение метана, являются условия местности, форма разреза и направление воздушного потока. В статье оценены возможные концентрации метана для среднестатистического разреза, работающего в метановой зоне при направлении воздушного потока вдоль длины разреза и перпендикулярно ему. В качестве источников метана были рассмотрены буровзрывные скважины, обнажение угля и вмещающих пород, а также транспортируемые потоки полезного ископаемого. Выявлено, что на границе санитарной зоны превышение предельно допустимой концентрации метана не ожидается. Определено, что вентиляционные установки могут обеспечить необходимое количество воздуха для разбавления метана. В связи с этим упор при выборе мер по интенсификации массообмена был сделан на геометрические параметры разреза, а также мощность и энергозатратность установок. Результаты исследований могут быть полезными при определении эмиссии парниковых газов и при разработке мероприятий по охране здоровья работников угольных разрезов.

Ключевые слова: концентрация метана, микроклимат разреза, рабочая зона, санитарная зона, искусственная вентиляция карьера, направление воздушного потока, рабочие места, предельно допустимая концентрация метана

Благодарности, признательность, финансирование: автор выражает благодарность Константину Сергеевичу Коликову, д-ру техн. наук, заведующему кафедрой БЭГП НИТУ «МИСиС», за научное руководство.

Для цитирования: Архипов ИА. Оценка концентрации метана при добыче угля на разрезах, работающих в метановой зоне. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):95-102. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-95-102>.

ESTIMATION OF METHANE CONCENTRATION DURING COAL MINING AT COAL MINES OPERATING IN THE METHANE ZONE

I. A. Arhipov✉

National university of science and technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ condr-95@mail.ru

Abstract: Almost half of Russian surface mines produce coal in the methane zone. This actualizes research in the field of methane concentration control in the working zone of the mine pit, as well as in the sanitary zone. There are point, linear, and area sources of methane at surface mines. The key parameters affecting methane distribution are terrain conditions, shape of the cut and airflow direction. Possible methane concentrations were estimated for an average cut operating in a methane zone with airflow direction along the length of the cut and perpendicular to it. Drilling and blasting wells, coal and host rock outcrops, and transported mineral flows were considered as sources of methane. It was revealed that at the boundary of the sanitary zone methane maximum permissible concentration exceedance is not expected. It has been determined that ventilation units provide the necessary amount of air to dilute the methane. In this regard, the emphasis when choosing measures to intensify mass transfer was placed on the geometric parameters of the section, as well as on the power and energy consumption of installations.

Keywords: methane concentration, open-pit microclimate, working area, sanitary area, artificial ventilation of the quarry, air flow direction, workplaces, maximum permissible concentration of methane

Acknowledgments, funding, financial Support: The author expresses gratitude to Konstantin Sergeevich Kolikov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of SEMI of the NUST "MISIS" for his scientific supervision.

For citation: Arhipov IA. Estimation of methane concentration during coal mining at coal mines operating in the methane zone. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):95-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-95-102>.

Введение

Метан проявляется при ведении открытых горных работ уже на глубинах 50–150 м в смеси с азотом [1]. Глубоких карьеров (более 100 м) в отрасли насчитывается около 50, что составляет 46,7 % от их общего количества в стране [2]. Существенная часть разрезов разрабатывается в метаноопасной зоне.

На текущий момент проблема обеспечения экологической безопасности добычи угля открытым способом включает в себя следующие аспекты: разработку мероприятий по повышению экологической и пожарной безопасности разрезов, работающих в метановой зоне; снижение возможности превышения предельно допустимой концентрации метана в воздухе рабочей зоны [3–5].

Распространение метана зависит от интенсивности газовыделения, глубины разреза, соотношения глубины разреза к его ширине и доминирующего воздушного потока [6]. Если направление ведения горных работ и направление воздушного потока совпадают, то большая часть метана рассеивается в атмосферу и на большее расстояние. В обратном случае возможно формирование локального превышения предельно допустимой концентрации на рабочих местах. Содержание метана в атмосфере разреза может негативно повлиять на экологию и здоровье рабочего персонала. Кроме того, метан является пожароопасным газом.

Цель исследования: разработать модель эмиссии метана при добыче угля открытым способом и решить аналитическую задачу газовойделения на разрезе.

Методика исследований

Газовыделение бывает от точечных, линейных и распределенных по площади источников. При этом оно может быть стационарным и нестационарным в зависимости от характера работы источника. Для начала необходимо определить содержание метана в объеме воздушного потока, проходящего через разрез.

Смоделируем ситуацию для условий доминирующего направления ветра в районе расположения разреза, как это показано на рисунке 1.

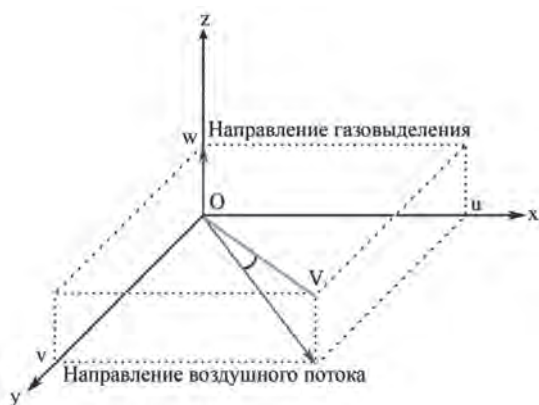


Рис. 1. Схема направления воздушного потока: OV – направление и скорость распространения метана на разрезе; w – проекция скорости воздушного потока на ось Oz; v – проекция скорости воздушного потока на ось Oy; u – проекция скорости воздушного потока на ось Ox; V – вектор скорости воздушного потока /

Fig. 1. Diagram of air flow direction: OV – direction and speed of methane propagation in the section; w – projection of air flow velocity on the Oz axis; v – projection of air flow velocity on the Oy axis; u – projection of air flow velocity on the Ox axis; V – air flow velocity

Представим, что OV – это направление и скорость распространения метана на разрезе, которое доминирует большую часть времени при производстве работ. Тогда w – это проекция его скорости воздушного потока на ось Oz, v – это проекция скорости воздушного потока на ось Oy, а u – это проекция скорости воздушного потока на ось Ox. V – это вектор скорости воздушного потока. Центр координатной оси O соответствует местоположению источника выделения метана.

Эмитируемый метан вступает в диффузионное взаимодействие с воздушным потоком. Таким образом, движение эмитируемого метана определяется диффузионным потоком количества вещества, переносимого диффузией в единицу времени через площадь рабочей зоны разреза. Диффузионные потоки движутся по молекулярному или турбулентному режиму и определяются по формулам для конвективного или турбулентного диффузионных потоков (J , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) соответственно:

$$J_M = -D_M \text{grad} C \quad (1)$$

или

$$J_T = -D_T \text{grad} C, \quad (2)$$

где D_M , D_T – коэффициенты конвективной и турбулентной диффузии; c – концентрация газа, %.

Тогда интенсивность диффузии характеризуется конвекцией по формуле

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Ox} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{Oy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Oz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

где t – время, мин.;

$D_{Ox} = D_{Mx} + D_{Tx}$; $D_{Oy} = D_{My} + D_{Ty}$; $D_{Oz} = D_{Mz} + D_{Tz}$ – компоненты суммы коэффициентов D_M , D_T по осям координат.

С учетом механизма распространения метана в рабочей зоне карьера в случае конвективного массопереноса (рис. 1) содержание метана ($\text{мг}/\text{м}^3$) можно определить на оси OV по формулам, предложенным В. С. Никитиным [7] для точечного и линейного источников непрерывной эмиссии метана соответственно:

$$C_{CH_4} = \frac{kQ}{x^2 \varphi^2 u_i} \quad (4)$$

$$C_{CH_4} = \frac{kQ}{x \varphi u_i L} \quad (5)$$

где u_i – скорость воздушного потока преобладания аэродинамических сил над термическими, принимается равной 1 м/с;

L – длина линейного источника в направлении, перпендикулярном воздушному потоку, м;

Q – эмиссия метана, мг/с;

k – безразмерный коэффициент, зависящий от схемы проветривания разреза и расположения источника метановыделения, определяемый по таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения коэффициента k [6] / Values of the coefficient k [6]

Тип источника метана	Место расположения источника метана	Схема проветривания разреза	
		Прямоточная	Рециркуляционная
Точечный	На поверхности уступа	5,7	5,7
	Над поверхностью уступа	3,0	3,6
Линейный	На поверхности уступа	2,7	3,0
	Над поверхностью уступа	1,3	1,5

φ – угол раскрытия газового факела, определяемый по формуле

$$\varphi = k' \frac{u}{u_i} + b', \quad (6)$$

где k' – безразмерный коэффициент, равный тангенсу угла наклона прямой V (табл. 2);

b' – безразмерный коэффициент, характеризующий турбулентность атмосферы (табл. 2);

u_i – скорость воздушного потока у источника, м/мин.

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициентов k' и b' / Values of coefficients k' and b'

Схема проветривания разреза	Место расположения источника метана	k'	b'
Прямоточная	На поверхности уступа	0,045	0,22
	Над поверхностью уступа	0,05	0,05
Рециркуляционная	На поверхности уступа	0,122	0,22
	Над поверхностью уступа	0,07	0,05

Концентрация метана в определяемой точке (мг/м³) для точечного и линейного источников соответственно определяется по формулам [7]:

$$c = C_{CH_4} \exp \frac{-6,3 \sqrt{(y^2 + z^2)^{1,3}}}{\varphi x^{1,3}} \quad (7)$$

$$c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9 y^2}{\varphi x^2} \quad (8)$$

Следует отметить, что присутствие на глубоких разрезах метана должно восприниматься как вредный и опасный фактор. Вместе с тем, учитывая, что увеличение метаносности характерно для глубоких разрезов, важно обратить внимание на то, что на рабочих местах уменьшается энергия ветра и на дне карьера дольше задерживаются все вредные газы, включая метан.

Для разбавления метана в зонах проведения буровзрывных работ, добычи и транспортировки угля возможно применение мероприятий по снижению концентрации метана на рабочем месте и применение искусственной вентиляции разреза [8]. Среди них на стадии проектирования возможно изменение угла откоса и профиля борта разреза. А на стадии производства работ – применение навесных рыхлителей для отказа от проведения буровзрывных работ [8] и снижение объемов извлечения горных пород для снижения интенсивности газовой выделения.

Выбор схемы и методов искусственного проветривания разрезов должен удовлетворять потребности в объеме возду-

ха ($Q_{\text{св}}$, м³/с), необходимого для разбавления газов до значений предельно допустимой концентрации метана (7 000 мг/м³ [9]).

$Q_{\text{св}}$ определяется исходя из интенсивности метановыделения с источников метана (Q , мг/с) [10]:

$$Q_{\text{св}} = \frac{Q}{k(C_{\text{д}} - C)}, \quad (9)$$

где k – коэффициент эффективности естественного проветривания (табл. 1);

$C_{\text{д}}$ и C – предельно допустимая концентрация метана на рабочем месте и его концентрация в разрезе соответственно, мг/м³.

Согласно [7], выбор способа вентиляции происходит в первую очередь исходя из проектной формы. Далее определяются заданные величины площади разреза и объема извлекаемой горной массы, а также интенсивность углубления горных работ.

Исходя из эксплуатационных характеристик разреза (длина, ширина, глубина, наличие местных сопротивлений и др.) и необходимого количества воздуха определяются установки искусственного проветривания. Ранее были разработано оборудование для вентиляции разрезов.

В таблице 3 представлены основные характеристики вентиляционных установок.

Вентиляционные установки подразделяются исходя из диаметра и дальности струи, расхода воздуха и мощности. Чем крупнее опасная зона, тем длиннее должна быть струя воздушного потока, создаваемого вентиляционной установкой. При этом необходимо обращать внимание на мощность установки для экономии электроэнергии. Для разбавления газовой выделения из скважин подойдут установки с минимальным диаметром струи.

Однако в случае обширных полей зон обнажения угля и вмещающих пород или же разветвленной транспортной сети по доставке угля за пределы разреза потребуются установки с большим диаметром струи или их количество будет необходимо увеличить. Оптимальная установка соответствует технологическим параметрам добычных работ (интенсивность газовой выделения, размеры разреза и зон обнажения угля и пород) и потребляет минимум электроэнергии.

Рассмотрим источники газовой выделения (Q , мг/с) для определения интенсивности газовой выделения. Представим ее в первом приближении в результате ведения буровзрывных работ [11–13] и работ по извлечению [14, 15] и транспортировке угля [16, 17].

В соответствии с исследованиями, газовой выделения из источников метана определяется по формулам:

$$Q_{\text{сва}} = 0,7 \left(\frac{\pi A (P_{\text{пл}}^2 - P_0^2)}{P_0 \mu \left(\ln r_{\text{сва}} + \frac{1}{k} \right)^2} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + aP_{\text{пл}})^2} \right), \text{ мг/с} \quad (10)$$

где $Q_{\text{сва}}$ – эмиссия метана от скважины буровзрывных работ, кг/с;

$r_{\text{сва}}$ и A – радиус и глубина скважин, м;

P_0 – атмосферное давление газа, Па;

$P_{\text{пл}}$ – давление газа в забое скважины на её максимальной глубине, Па;

C – размерный коэффициент;

a, b – параметры изотермы сорбции Лэнгмюра;

k – коэффициент проницаемости породы, м².

Характеристика вентиляционных установок [8] / Characteristics of ventilation units [8]

Наименование	Мощность, кВт	Тип струи	Диаметр струи, м	Дальность струи, м	Расход воздуха (начальный – конечный), м³/с
ПВУ-6	2 000	Изотермическая	1,8	700	200–33 500
УМП-1	364	Изотермическая	3,6	350	220–7 500
АИ-20КВ	2 940	Неизотермическая	4,5	800	640–45 000
НК-12КВ	11 000	Изотермическая	5,6	1 300	1 300–89 000
УВУ-1	30 000	Неизотермическая	1,15	1 300	190–93 000
УМП-14	320	Изотермическая	14,4	570	1 160–27 700
УМП-21	1 200	Изотермическая	21	1 000	3 770–78 500
УКПК-1	36 500	Конвективная	10	300	0–48 000

$$Q_{изв} = 0,7mL \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial p(n,t)}{\partial n} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + ap(n,t))^2} \right), \text{ мг/с} \quad (11)$$

где $Q_{изв}$ – эмиссия метана от обнаженного пласта, кг/с;
 $p(b, t)$ – давление газа на максимальном углублении при извлечении угля b , Па;

μ – динамическая вязкость газа, Па · с;

m, n, L – длина, ширина и глубина обнажения породы, м;

t – длительность добычи угля, с.

$$Q_{отб} = 0,7 \left(1 - \frac{v}{100} \right) v m n \frac{3}{r} \left(\frac{4\pi r^2 \int_0^t \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(r,t)}{\partial r} dt}{\frac{4\pi r^3}{3}} \right) \left(1 + C \frac{ab}{(1 + aP_r)} \right), \text{ мг/с} \quad (12)$$

где $Q_{отб}$ – эмиссия метана от отбитого угля, кг/с;

v – зольность угля, %;

r – радиус кусков угля, м;

ρ – насыпная плотность угля, принимается равной 0,85 т/м³;

$p(r, t)$ – давление газа в частице угля в момент времени t , Па.

Обозначим, что выделение метана возможно при несложном процессе бурения в случае, если $P_{пл}$ [11]:

$$P_0 < P_{пл} \quad (13)$$

где P_0 – давление в начале бурения скважины, равное атмосферному, Па;

$P_{пл}$ – пластовое давление, Па.

При этом прием условие, что

$$P(\infty, t) = P_{пл} \quad (14)$$

$$P(A, 0) = P_0. \quad (15)$$

В случае метановыделения при обнажении угольного пласта граничные и начальные условия примут следующий вид

$$P(x, 0) = P_{пл} \quad (16)$$

$$P(\infty, t) = P_{пл} \quad (17)$$

$$\frac{\partial P(\infty, t)}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$p(0, t) = p_0. \quad (19)$$

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

$$P_{нач}(r, 0) = P, \quad (20)$$

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

В качестве допущения примем следующие граничные условия:

$$P(r, t) = P_0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial p(0, t)}{\partial r} = 0. \quad (22)$$

Результаты исследований

Примем условие, что транспортировка угля является линейным источником выделения метана, бурение скважин – точечным источником газовой выделения, обнажение угля – площадным источником газовой выделения. Схема проветривания разреза – прямоточная.

Для всех источников посчитаем содержание метана на удаление до 1 000 м от границы разреза (рис. 2 и 3).

Обозначим ее как санитарно-защитную. Весь разрез разделен на зоны буровзрывных и добычных работ, а также зоны транспортировки угля.

Ширина разреза L_B – 300 м, а длина L_A – 4 000 м.

u_v возьмем равной 186 м/мин. L при направлении движения воздуха A примем равным 4 000 м, при направлении B – 300 м. Определим концентрацию метана на расстоянии 2 м и 1 000 м от границы разреза. Соответственно, для направления A x будет равным 2 000 и 3 000 м, а y – 150 м и 1 150 м. Для направления B , наоборот, z во всех случаях примем равным 2 м (замер на уровне органов дыхания). Это указывает на высоту над уровнем земли, на которой производится измерение концентрации метана. В данном случае концентрация метана измеряется на высоте 2 м от поверхности земли. m и n – длина и ширина зоны добычи угля. Зона обнажения пород характеризуется количеством

буровзрывных скважин и их диаметром $2r$, а также глубиной скважин до 22 м. УМП-14 – предполагаемое место для размещения оборудования по искусственной интенсификации воздушного потока на разрезе.

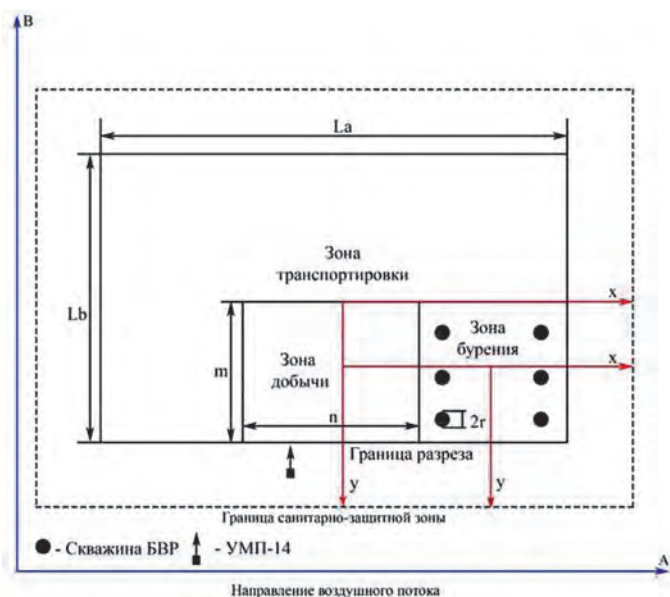


Рис. 2. Схема добычи угля на разрезе (вид сверху) /
Fig. 2. Scheme of coal mining at the open pit (top view)

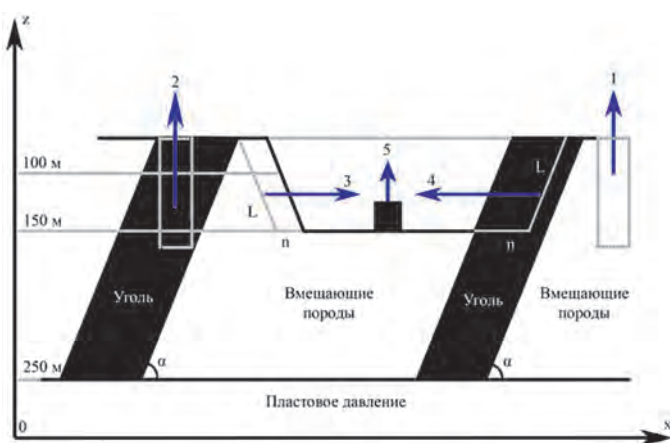


Рис. 3. Схема добычи угля на разрезе (вид сбоку) /
Fig. 3. Scheme of coal mining at the open pit (side view)

Работы выполняются в течение 12 ч. Горные породы имеют плотность $2,5\text{--}3,5 \text{ м}^3/\text{т}$, являются супесями и гранитом. Угольные пласты преимущественно залегают на глубине 250 м под углом $56\text{--}90^\circ$ с суммарной мощностью более 40 м (коксовые угли). Их остаточная и природная газонасыщенность – $2 \text{ м}^3/\text{т}$ и $5 \text{ м}^3/\text{т}$, зона газового выветривания – менее 100 м.

Оценим газовыделение по формулам (10)–(12) при условиях, представленных в таблицах 4–6.

Таблица 4 / Table 4

Исходные данные для моделирования газовыделения из скважин буровзрывных работ /
Input data for modeling gas emission from drilling and blasting wells

$k, \text{м}^2$	$P_{\text{ср}}, \text{кПа}$	$P_{\text{плр}}, \text{кПа}$	$A, \text{м}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$r_{\text{св}}, \text{м}$	$a, \text{Па}^{-1}$	$b, \text{т}/\text{м}^3$
$3,6 \cdot 10^{-12} - 3,6 \cdot 10^{-13}$	101,325	200	16–22	12	0,07–0,138	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Таблица 5 / Table 5

Исходные данные для моделирования газовыделения при обнажении угля /

Input data for modeling of gas emission during coal exposure

$k, \text{м}^2$	$L, \text{м}$	$n, \text{м}$	$m, \text{м}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$p(x, t), \text{Па}$	$a, \text{Па}^{-1}$	$b, \text{т}/\text{м}^3$
$3,6 \cdot 10^{-12} - 3,6 \cdot 10^{-13}$	300–4 000	100–1 000	5–30	12	100 000–200 000	$0,11 \cdot 10^{-6}$	50

Таблица 6 / Table 6

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

Input data for modeling of gas emission from particles of broken coal and host rocks

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

Для вариативных величин для расчета примем среднее значение.

Тогда $Q_{\text{БВР}} = 134\,000 \text{ мг}/\text{с}$, $Q_{\text{ОБН}} = 616\,000 \text{ мг}/\text{с}$, $Q_{\text{ТР}} = 166\,680 \text{ мг}/\text{с}$.

Исходные данные для определения концентрации метана представим в таблице 7, актуальные для усредненного разреза [2], работающего в метановой зоне. Условия для моделирования сведем в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Условия моделирования эмиссии метана

от открытых горных работ /

Modeling conditions of methane emission from surface mining operations

Источник метана	$Q, \text{мг}/\text{с}$	$L, \text{м}$		k	k'	b'	$u_p, \text{м}/\text{с}$	$u_{\text{ср}}, \text{м}/\text{с}$
		A	B					
$Q_{\text{СКВ}}$	134 011	-		3	0,05	0,05	1	3,1
$Q_{\text{ИЗВ}}$	616 043	4 000	300	5,7	0,045	0,22		
$Q_{\text{ОТБ}}$	166 678	4 000	300	2,7	0,045	0,22		

Также определим содержание метана в границах разреза [3] и санитарной зоны 1 000 м. Кроме того, определим содержание метана в случае направления воздушного потока B .

В этом случае L примем равной 300 м [4].

Значения x , y и z представлены в таблице 8.

Подставляя значения Q , k , k' , b' , u_p , $u_{\text{ср}}$ и L в формулы (1)–(9), получим:

Для направления A (результаты представлены в табл. 9):

– для буровзрывных работ:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{500034}{0,042025x^2} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-6,3\sqrt{(y^2+z^2)}^{1,3}}{0,205 \cdot x^{1,3}};$$

– для работ по извлечению угля:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{763862,7}{1438x} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2};$$

– для работ по транспортировке угля:

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{1663316,1}{1438x} \quad c = C_{\text{CH}_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2}.$$

Для направления В:

– для буровзрывных работ:

$$C_{CH_4} = \frac{500034}{0,042025x^2} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-6,3\sqrt{(y^2+z^2)^{1,3}}}{0,205 \cdot x^{1,3}};$$

– для работ по извлечению угля:

$$C_{CH_4} = \frac{763862,7}{7,19x} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2};$$

– для работ по транспортировке угля:

$$C_{CH_4} = \frac{1663316,1}{2,157x} \quad c = C_{CH_4} \exp \frac{-3,9y^2}{0,3595x^2}.$$

Также посчитаем среднее геометрическое газовыделение $Q_{геом}$ [18, 19].

Исходя из рисунка 2 определим, что зона буровзрывных работ и зона добычи угля занимают по 17 % пространства разреза, остальное приходится на зону транспортировки угля.

Результаты представлены в таблице 9.

Было определено, что средняя интенсивность метановыделения не приводит к превышению предельно допустимой концентрации метана. В связи с этим посчитаем концентрацию метана в атмосфере и определяемой точке по формулам (1)–(9) в границах рабочего места. Рабочим местом примем площадь 4 м² вокруг источника метана. Сохраним условия моделирования (табл. 8 и 9). Изменяются только координаты x , y и z .

Условия моделирования приведены в таблице 10, а результаты – в таблице 11.

На основе анализа результатов выявлено, что в процессе буровзрывных работ и работ по транспортировке концентрация метана в воздухе рабочей зоны сохраняется в пределах 7 000 мг/м³ (с учетом погрешности +/- 500 мг/м³). Однако при обнажении угля концентрация в определяемой точке в границах 2 м на рабочем месте может достигать 10 325 мг/м³. Для ее снижения потребуются интенсификация воздушного потока с помощью искусственной вентиляции или снижение добычи угля.

Рассмотрим возможные мероприятия по искусственной интенсификации вентиляции разреза. Источник метана – то-

Таблица 8 / Table 8

Значения координат x , y и z / Coordinate values x , y and z

Направление воздушного потока	Расстояние от разреза, м	Координаты, м								
		$Q_{скв}$			$Q_{обн}$			$Q_{отб}$		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
А	0	2 000	150	2	2 000	150	2	2 000	150	2
	1 000	3 000	1 150		3 000	1 150		3 000	1 150	
В	0	150	2 000		150	2 000		150	2 000	
	1 000	1 150	3 000		1 150	3 000		1 150	3 000	

Таблица 9 / Table 9

Концентрация метана на оси OV и концентрация метана в определяемой точке в границах разреза и защитной зоны /
Atmospheric methane concentration and methane concentration at the determined point within the boundaries
of the transect and protection zone

Направление воздушного потока	Расстояние, м	$Q_{скв}$		$Q_{обн}$		$Q_{отб}$		$Q_{грам}$	
		C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C	C_{CH_4}	C
А	0	0,265	0,25	7,525	7,07	3	2,985	3,046	2,962
	1 000	0,177	0,036	0,385	0,08	1,32	0,0001	0,9	0,019
В	0	700	256,5	1 521	560	2 900	401,57	2 095,36	371,582
	1 000	0,462	0,04	1,006	0,1	11,9	2,87	7,375	1,744

Таблица 10 / Table 10

Условия моделирования концентрации метана на рабочем месте в процессе ведения открытых горных работ /
Modeling conditions of methane concentration at the workplace, during surface mining operations

Источник метана	Q , мг/с	Координаты			L , м		k	k'	b'	u_p , м/с	u_v , м/с
		x , м	y , м	z , м	А	В					
$Q_{скв}$	134 011	2			-		3	0,05	0,05	1	3,1
$Q_{изв}$	616 043				4 000	300	5,7	0,045	0,22		
$Q_{отб}$	166 678				4 000	300	2,7	0,045	0,22		

Таблица 11 / Table 11

Концентрация метана на оси OV и концентрация метана в определяемой точке на рабочем месте /
OV methane concentration and methane concentration at the point to be determined at the workplace

Направление воздушного потока	$Q_{скв}$		$Q_{обн}$		$Q_{отб}$	
	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³	C_{CH_4} , мг/м ³	C , мг/м ³
А	2 975	675	26 560	5 162	11 240	1 032
В	29 740	6760	53 120	10 325	38 556	7 494

чечный, расположен на поверхности уступа, схема проветривания – прямоточная.

В соответствии с таблицей 1 прием среднее значение $k = 5,7$. Посчитаем необходимое количество воздуха для разбавления метана каждый час работы разреза, используя формулу (10)

$$Q_{\theta} = \frac{Q_{изв}}{k(C_{д} - C(Q_{изв}))} = \frac{616043}{5,7(10325 - 7000)} = 32,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Анализируя таблицу 3, можно сделать вывод, что почти все рабочие установки отвечают ключевым критериям установок искусственной вентиляции карьера ($Q_{\theta} = 32,5 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр струи – более 2 м для охвата всего рабочего места, а дальность – более 300 м в соответствии с шириной разреза). Тогда выбор следует сделать исходя из мощности установки. В этом случае идеально подойдет УМП-14, установленная в направлении воздушного потока B (рис. 2).

Обсуждение результатов

Прежде чем приступать к анализу полученных результатов, следует обратить внимание, что эмиссия от угля, добываемого открытым способом, превышает эмиссию от угля, добытого подземным способом за счет большего количества вновь введенных разрезов, чем шахт [1]. Анализируя модель усредненного разреза, ведущего работу в метановой зоне, мы учитывали, что газоносность углей на глубинах 150–250 м менее $5 \text{ м}^3/\text{т}$.

Таким образом, было предположено, что интенсивность газовыделения на разрезе не способна существенно повлиять на состояние окружающей среды на расстоянии от границы разреза. И действительно, при условии, что интенсивность газовыделения находится в промежутке между 100 000–650 000 $\text{мг}/\text{с}$, мы убедились, что ни на границе разреза, ни тем более на расстоянии 1 000 м от него содержание метана в атмосфере не приближается к предельно допустимым.

Так, на оси OV содержание метана не достигает и $3\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. А концентрация метана в произвольной точке не достигнет и $600 \text{ мг}/\text{м}^3$. Ни при направлении воздушного потока A , ни при направлении воздушного потока B . Примечательно, что длина и другие геометрические параметры разреза существенно влияют на наполнение метана в атмосфере. Например, содержание метана, выделившегося в процессе бурения скважины, в произвольной точке будет почти в 3 000 раз больше при направлении B , чем при направлении A .

Тем не менее выявлено, что на рабочем месте возможно накопление метана выше предельно допустимых значений при направлении воздушного потока B . При направлении

воздушного потока A – в пределах нормы. И только при добыче угля достигает $5\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. В остальных случаях концентрация метана – менее $1\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Поэтому рассмотрим результаты, полученные при вычислении концентрации метана в случае направления воздушного потока B . При добыче угля концентрация метана в произвольной точке – более $10\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. В остальных случаях она также составляет примерно $7\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$. И для разбавления метана до допустимых значений потребуется более $30 \text{ м}^3/\text{с}$ расхода дополнительного воздуха.

Обратим внимание, что данные выводы были сделаны при нормальной скорости воздушного потока – $3,1 \text{ м}/\text{с}$. В случае возникновения инверсии (скорость ветра – менее $0,8 \text{ м}/\text{с}$) [20] концентрация метана может быть еще больше. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

Заключение

Содержание метана на границе санитарно-защитной зоны в зависимости от направления воздушного потока и источника колеблется в пределах $0,0001\text{--}2,87 \text{ мг}/\text{м}^3$. Общее содержание метана не превышает $3 \text{ мг}/\text{м}^3$.

На границе разреза содержание метана в зависимости от направления воздушного потока и источника колеблется в пределах $0,25\text{--}560 \text{ мг}/\text{м}^3$. Общее содержание – не более $1\,220 \text{ мг}/\text{м}^3$. Сделан вывод, что на границе разреза и санитарно-защитной зоны превышение предельно допустимой концентрации маловероятно.

На рабочем месте содержание метана в случае направления A колеблется в пределах $675\text{--}5\,162 \text{ мг}/\text{м}^3$, что также исключает возможность превышения концентрации метана. Однако при направлении воздушного потока B концентрация метана на рабочем месте колеблется в пределах $6\,760\text{--}10\,325 \text{ мг}/\text{м}^3$. Сделан вывод, что при обнажении пласта возможно превышение концентрации метана и требуется разработка мероприятий по ее снижению.

Обоснована необходимость искусственной вентиляции на рабочем месте. Присутствие метана в рабочей зоне карьера обуславливает необходимость разработки мероприятий по снижению эмиссии метана. Предложены мероприятия по искусственному проветриванию усредненного разреза. Для разбавления метана до допустимых значений необходим расход воздуха $32,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, на основе представленных данных можно сделать вывод о необходимости принятия мер по контролю и снижению содержания метана в атмосфере разреза для обеспечения допустимых условий работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Тайлаков ОВ, Застрелов ДН, Макеев МП и др. К оценке эмиссии метана при добыче угля открытым способом. *Вестник научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2023; 2: 35–40. [Tajlakov OV, Zastrelov DN, Makeev MP, et al. Towards the assessment of methane emissions during open-pit coal mining. *Bulletin of the Scientific Center VOSTNII for Industrial and Environmental Safety*. 2023; 2: 35–40. (In Russ.)] DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.81.96.004.
2. Архипов ИА. Разработка модели среднестатистического разреза, работающего в метановой зоне. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024; 4 (10): 3–25. [Arhipov IA. Development of a model of an average section operating in the methane zone. *MIAB*. 2024; 4 (10): 3–25. (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_10_3.
3. 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.
4. Кондратьев СА, Хамзина ТА. Повышение качества концентрации во флотационном обогащении низкосортного угля. *Записки Горного института*. 2024; 265: 65–77. [Kondrat'ev SA, Hamzina TA. Improvement of concentration quality in flotation beneficiation of low-grade coal. *Notes of the Mining Institute*. 2024; 265: 65–77. (In Russ.)].

5. Бахареv BA. К теории и расчету свободных турбулентных струй. *Теория и расчет вентиляционных струй*. Ленинград, 1965: 12-26. [Baharev VA. To the theory and calculation of free turbulent jets. *Theory and calculation of ventilation jets*. Leningrad, 1965: 12-26. (In Russ.)].
6. Poncelet J, Fonseca-Colomb A, Grilli G. Enlarging ESA? After the Accession of Luxembourg and Greece. *ESA Bulletin: journal*. 2004; 120: 48-53.
7. Li Ks, CHzhan YUe, Czyan V, et al. Preliminary application of Sentinel-5P. Satellite Tropomi sensor in atmospheric pollution monitoring in Jiangsu Province [J] environmental monitoring and warning. 2019; 11 (02): 10-16.
8. Прохоров АВ, Носков ИВ. Мониторинг магистральных нефте-газопроводов при помощи беспилотных летательных аппаратов. *Вестник евразийской науки*. 2022. 6 (14): 1-10. [Prokhorov AV, Noskov IV. Monitoring of main oil and gas pipelines using UAVs. *Eurasian Scientific Journal*. 2022. 6 (14): 1-10. (In Russ.)].
9. Weidmann D, Hoffmann A, Macleod N, et al. The Methane Isotopogues by Solar Occultation (MISO) Nanosatellite Mission: Spectral Channel Optimization and Early performance Analysis. *Remote Sens*. 2017; 9 (1073): 1-20.
10. Nisbet GN, Dlugokencky EJ, Bousquet PE. Methane on the rise – Again. *Science*. 2014; 343: 493-495.
11. Рогалев МС, Саранчин НВ, Маслов ВН и др. Определение расхода газового потока при проведении гидродинамических исследований скважин: ч. 3. *Нефть и газ*. 2017; 1: 72-82. [Rogalev MS, Saranchin NV, Maslov VN, et al. Determination of gas flow rate during hydrodynamic studies of wells: Part 3. *Oil and gas*. 2017; 1: 72-82. (In Russ.)].
12. Wang G, Liu Z, Hu Y, et al. Influence of gas migration on permeability of soft coalbed methane reservoirs under true triaxial stress conditions. *R. Soc. Open. Sci*. 2019; 6 (10):190892. DOI: 10.1098/rsos.190892.
13. Григорьевский ВИ, Тезадов ЯА. Моделирование измерений концентрации метана лидаром в замутненном пространстве. *Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийская открытая научная конференция*. Муром, 2021: 186-193. [Grigor'evskij VI, Tezadov YaA. Modeling of lidar measurements of methane concentration in turbid space. *All-Russian Open Scientific Conference "Modern Problems of Remote Sensing, Radiolocation, Wave Propagation and Diffraction"*. Murom, 2021: 186-193. (In Russ.)].
14. Коликов КС, Драгунский ОН. Решение задач аэрологии и экологии карьеров в условиях взаимовлияния атмосферы выработанных пространств и окружающих их территорий. *Безопасность труда в промышленности*. 2023; 1: 35-41. [Kolikov KS, Dragunskij ON. Solving problems of aerology and ecology of quarries in conditions of mutual influence of the atmosphere of mined-out spaces and the surrounding territories. *Industrial safety*. 2023; 1: 35-41. (In Russ.)].
15. Шевченко ЛА, Ткаченко ДА, Астраков СН. Математическое моделирование газодинамического состояния угольного массива в зоне влияния скважины в процессе бурения. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2016; 1: 67-69. [Shevchenko LA, Tkachenko DA, Astrakov SN. Mathematical modeling of the gas-dynamic state of the coal massif in the zone of influence of the well during the drilling process. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 1: 67-69. (In Russ.)].
16. Азатьян ВВ, Тимербулатов ТР, Шатилов СВ. Эффективные химические методы управления горением, взрывом и детонацией газов. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2012; 2: 27-37. [Azatian V.V., Timerbulatov T.R., Shatirov S.V. Efficient chemical methods to control burning, explosion and gas detonation *Bulletin of the scientific center for safety of work in the coal industry*. 2012; 2: 27-37. (In Russ.)].
17. Захаров ВН, Малинникова ОН, Трофимов ВА и др. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016; 2: 16-26. [Zaharov VN, Malinnikova ON, Trofimov VA, et al. Dependence of coal seam permeability on gas content and effective stresses *Physico-technical problems of mineral development*. 2016; 2: 16-26. (In Russ.)].
18. Григорьевский ВИ, Садовников ВП, Элкабидзе АВ. Лазерный контроль фоновой концентрации метана в районе северо-востока Московской области. *Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийская открытая научная конференция*. Муром, 2022: 230-236. [Grigor'evskij VI, Sadovnikov VP, Elkabidze AV. Laser control of background methane concentration in the area of the north-east of the Moscow region. *All-Russian Open Scientific Conference "Modern Problems of Remote Sensing, Radiolocation, Wave Propagation and Diffraction"*. Murom, 2022: 230-236. (In Russ.)]. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-230-236.
19. Grigorievsky VI, Tezadov YA. Modeling and Experimental Study of Lidar Resolution to Determine Methane Concentration in the Earth's Atmosphere. *Cosmic Research*. 2020; 58 (5): 330-337.
20. Киряева Т. Изменение температуры при разработке углеметанового пласта – как мера его выбросоопасности. *German International Journal of Modern Science*. 2021; 6: 11-14. [Kiryaeva T. Temperature change during the development of a coal methane seam – as a measure of its outburst hazard. *German International Journal of Modern Science*. 2021; 6: 11-14. (In Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Игорь Александрович Архипов –

аспирант по направлению «Науки о Земле». Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: cond-95@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Igor A. Arhipov –

Graduate Student in the Field of Earth Science, National university of science and technology "MISIS", 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: cond-95@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.05.2025.

Поступила после рецензирования: 06.07.2025.

Принята к публикации: 25.07.2025.

Article info

Received: 12.05.2025.

Revised: 06.07.2025.

Accepted: 25.07.2025.