



Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору

С.Г.Гендлер, А.Ю.Степанцова✉, М.М.Попов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16519. С. 72-82. [EDN SIJDWE](#)

Аннотация

Ежегодное увеличение добычи угля и спроса на него приводят к необходимости организации мест временного хранения (складов) для размещения угольного сырья перед отправкой потребителю. При открытом способе складирования угля процесс пыления от погрузо-разгрузочных операций и с поверхности штабеля негативно влияет на здоровье рабочих склада и состояние прилегающих к складу территорий. Альтернативным открытому складированию является размещение угольного сырья в закрытых помещениях. Одной из главных опасностей при таком складировании угля может быть выделение в воздушную среду остаточного метана, содержащегося в угольных отдельностях, после процессов дегазации во время добычи и извлечения на поверхность, а также транспортировки до места временного хранения. В статье выполнен анализ изменения метаноносности угля в процессе добычи, транспортирования и при непосредственном размещении на закрытых складах. Рассмотрены физико-химические основы массобмена при взаимодействии газонасыщенной угольной массы с воздухом. Показано, что интенсивность метановыделения зависит от природной газоносности угольного пласта, параметров массопереноса между углем и воздухом, а также температуры окружающей среды. Для оценки динамики газообмена угольной массы с атмосферным воздухом предложен приближенный подход, основанный на использовании двух взаимосвязанных итераций, определяющих как формирование концентрационных полей метана в воздушном пространстве насыпного объема, так и величины метановыделения с поверхности штабеля к наружному воздуху. Отмечено, что безопасность эксплуатации закрытых угольных складов по газовому фактору может быть реализована с помощью искусственной вентиляции, обеспечивающей объемную концентрацию метана в воздушной среде менее 1 %. Величина расхода, достаточная для достижения отмеченной концентрации метана, получена в результате компьютерного моделирования процесса формирования полей концентраций метана в воздушной среде при теоретически вычисленном выделении метана с поверхности штабеля.

Ключевые слова

каменный уголь; угольная пыль; угольный склад; метан; остаточная метаноносность; транспортировка каменных углей; десорбция метана; эффективный коэффициент диффузии

Поступила: 17.06.2024

Принята: 17.07.2024

Онлайн: 03.10.2024

Опубликована: 25.04.2025

Введение

Угольная отрасль – одна из ключевых в российской промышленности, включает добычу, переработку, производство, транспортировку и сбыт угля. Российская Федерация занимает второе место в мире по запасам угольного сырья, большая часть из которого находится в Сибири и на Дальнем Востоке [1-3]. Добыча угля по итогам 2023 г. составила 438 млн т, в том числе 213 млн т угля было отправлено на экспорт в Китай, страны БРИКС и др. [4, 5].

Рост добычи угля и повышенный коммерческий интерес к его приобретению приводят к необходимости организации временного складирования угля в портовых терминалах и на складских площадках для последующей отправки потребителю [6-8].

На сегодняшний день наиболее распространенным способом временного складирования угля является размещение его на открытых площадках [9-11]. Как показывает анализ, при таком способе хранения, во-первых, снижается качество угольного сырья, а во-вторых, возникает аэрохимическая нагрузка на окружающую среду и на рабочий персонал из-за пылевыделений [12-14]. Причиной высокого пыления угольных штабелей является ветровой поток, величина которого достигает в некоторых регионах 20 м/с. Расчет выбросов угольной пыли в атмосферу



от эксплуатации открытых складов проведен по Отраслевой методике*. Зависимость запыленности атмосферного воздуха от скорости ветра представлена на рис.1.

Анализ полученных данных показывает, что при невысокой скорости ветра (1-5 м/с) вынос угольной пыли с поверхности штабеля и рассеивание угольной пыли будут происходить преимущественно в складской зоне и прилегающей территории предприятия, подвергая негативному воздействию обслуживающий персонал. С увеличением ветрового потока пыление от штабеля интенсифицируется, но рассеивание и оседание угольной пыли будет происходить уже преимущественно за промышленной территорией, провоцируя аэротехногенное воздействие на окружающую среду.

Альтернативным решением экологической проблемы и предотвращением снижения качества угольного сырья является использование для временного хранения угля закрытых складов [15-17]. Скорость движения воздуха при таком способе размещения определяется лишь параметрами естественной или вынужденной вентиляции и будет гораздо ниже, чем скорость ветрового потока, что обуславливает минимальный срыв пыли с поверхности угольного штабеля. При очевидных экологических преимуществах размещения угля в закрытых помещениях в случае высокой остаточной газоносности угля выделение метана из угольных отдельностей может привести к образованию взрывоопасных концентраций в воздушной среде склада [18]. Во избежание подобных случаев максимальное содержание метана в воздухе закрытого склада ограничено действующими нормативными документами (1 % объема) [19].

Выполненный анализ показал, что многие угольные месторождения России характеризуются высокой природной газоносностью, что подтверждается данными таблицы, в которой приведены значения природной метаноносности некоторых угольных пластов Кузбасса [20-22].

Метаноносность некоторых угольных месторождений Кузбасского угольного бассейна

Месторождение	Минимальная природная метаноносность, м ³ /т	Максимальная природная метаноносность, м ³ /т
Алардинское	0,10	44,7
Байдаевское	0	30,3
Березово-Бирюлинское	2,0	36,7
Егозово-Красноярское	0,3	13,5
Кедровско-Крохалевское	0,01	17,6
Киселевское	0	35
Ленинское	0	25
Ольжерасское	1	31
Распадское	1	22
Соколовское	2	17,1
Шелканское	1	23,5
Чертинское	0	35

Снижение газоносности (метаноносности) относительно начального значения проходит в несколько этапов: извлечение отбитого угля на поверхность, погрузка в вагоны, транспортировка по

* Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. 115 с.

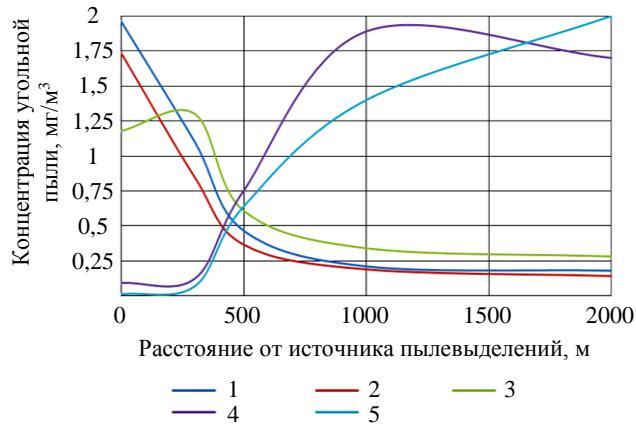


Рис.1. Зависимость рассеивания угольной пыли от расстояния от источника пыления при различных скоростях движения воздуха

1 – 1 м/с; 2 – 3 м/с; 3 – 5 м/с; 4 – 10 м/с; 5 – 20 м/с

железной дороге, разгрузка на склад. На каждой из стадий процессы дегазации угольной массы зависят от таких параметров, как петрографический состав угля, зольность, средний размер угольного куска, температура окружающей среды и др. [23-25].

Таким образом, целью работы является исследование влияния остаточной газоносности угольного сырья на безопасные условия эксплуатации закрытых угольных складов и, при необходимости, выбор режима проветривания, обеспечивающего нормализацию газового режима.

Методы

Метан в угольных пластах находится в связанном сорбированном состоянии. В процессе разрушения угольного массива часть метана, находящаяся в порах и трещинах пласта, выходит в пространство шахты моментально, а другая часть газа продолжает десорбироваться, но с меньшей скоростью. Интенсивность газовыделений из угля будет зависеть от нескольких факторов: температуры окружающей среды, параметров массопереноса, начальной газоносности угля и др. [26-28].

После добычи и извлечения на поверхность угольная продукция на разных стадиях транспортировки до момента поступления потребителю складируется в штабеля различной формы, представляющие собой насыпные объемы, содержащие угольные отдельности, окруженные воздушным пространством. К штабелям могут быть отнесены насыпи угля перед погрузкой в вагоны, объемы угля, заполняющие насыпи, а также насыпи, образованные в местах его временного хранения (портовые терминалы, складские помещения на ТЭЦ, химических и металлургических заводах и т.п.) [19, 29, 30].

В тех случаях, когда в процессе перемещения угольной массы от места добычи до конечного пункта дегазация метана, первоначально содержащегося в угле, произошла лишь частично, угольная масса будет иметь некоторую остаточную газоносность.

Процесс дегазации при складировании угольной массы в штабеля осуществляется следующим образом. В начальный период сразу после образования штабеля концентрация метана в воздухе, заполняющем межкусковые пустоты, имеет нулевое значение. С течением времени воздушные пустоты начинают заполняться метаном, поступающим с поверхности каждой угольной отдельности, и концентрация метана в воздушных пустотах непрерывно растет, достигая некоторого асимптотического значения. Если поверхность угольного штабеля омывается воздухом, то одновременно с увеличением концентрации метана в глубине штабеля происходит отток метана с поверхности, в зонах, прилегающих к поверхности штабеля, образуются зоны со сниженной относительно областей, на которые влияние газообмена с поверхности еще не распространилось, концентраций метана.

Может оказаться, что поток метана с поверхности штабеля вначале растет до некоторой величины, а затем монотонно падает.

Для оценки динамики газообмена угольной массы с атмосферным воздухом на всех стадиях ее складирования в штабелях или в железнодорожных вагонах предложен приближенный подход, основанный на использовании двух взаимосвязанных итераций, определяющих как формирование концентрационных полей метана в воздушном пространстве насыпного объема, так и величины метановыделения с поверхности штабеля к наружному воздуху.

Первая итерация выполняется при допущении, что выделение метана в единицу объема угольной массы, где поверхность угольных отдельностей равна $F_{\text{ед.об}}$, происходит при условии изоляции этого объема, в котором угольные отдельности и пустоты, заполненные воздухом, занимают соответственно объемы $1 - m$ и m , от наружного воздуха, омывающего его поверхность. Поток метана j с поверхности каждой угольной отдельности вычисляется при допущении, что она может быть представлена в форме шара радиусом r_0 , а поток метана с его поверхности определяется эффективным коэффициентом диффузии D_{eff} , величина которого установлена на основе экспериментальных исследований (рис.2) для углей Кузнецкого угольного бассейна марок Г и Ж [31].

Из графика на рис.2 следует, что значение эффективного коэффициента диффузии увеличивается с повышением температуры окружающей среды.



Дифференциальное уравнение диффузии метана в каждой угольной отдельности может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial \text{Fo}^{\text{угля}}} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial R^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial R}; \quad (1)$$

$$C(R, 0) = C_0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial R} = C(R; \text{Fo}^{\text{угля}});$$

$$C(1, \tau) = C_\tau;$$

$$\frac{\partial C(0, \text{Fo}^{\text{угля}})}{\partial R} = 0,$$

где C – концентрация метана в угольной отдельности, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\text{Fo}^{\text{угля}}$ – диффузионное число Фурье для угольных отдельностей, $\text{м}^2/\text{с}$; $\text{Fo}^{\text{угля}} = D_{\text{eff}} \tau / r_0^2$; τ – время, с ; C_0 – начальная концентрация метана в угольной массе, $\text{кг}/\text{м}^3$; R – безразмерный радиус, $R = r/r_0$; r_0 – средний радиус угольных отдельностей, слагающий насыпной объем, м ; C_τ – концентрация метана в воздушном пространстве штабеля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Решение уравнения (1), представленное в общем виде даже при $C_\tau = \text{const}$, имеет сложный вид, что затрудняет его дальнейшее использование для вычисления динамики концентрации метана в воздушных пустотах. Поэтому для определения $C(R, \text{Fo}^{\text{угля}})$ использовано асимптотическое представление общего решения при фактических значениях диффузионного числа Фурье, составляющего для рассматриваемых условий

$$\text{Fo}^{\text{угля}} = \frac{(10^{-10} - 10^{-11})(1,5-4) \cdot 10^6}{0,05^2} = 0,1-0,2. \quad (2)$$

Тогда величина диффузионного потока при этих величинах числа Фурье с высокой точностью может быть представлена в виде:

$$j(\text{Fo}^{\text{угля}}) = D_{\text{eff}} / r_0 \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \text{Fo}^{\text{угля}}}} \right) (C_0 - C_\tau). \quad (3)$$

В случае изменения C_τ по произвольному закону поток устанавливается на основе теоремы Диоамеля:

$$j(\text{Fo}^{\text{угля}}) = -\frac{D_{\text{eff}}}{r_0} \frac{\partial}{\partial \text{Fo}^{\text{угля}}} \int_0^{\text{Fo}^{\text{угля}}} \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{\pi \xi}} \right) [C_0 - C_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}} - \xi)] d\xi. \quad (4)$$

Изменения концентрации метана в единице объема воздушного пространства насыпного объема может быть описано уравнением:

$$m \frac{dC(\text{Fo}^{\text{угля}})}{d\text{Fo}^{\text{угля}}} = (1-m) F_{\text{ед.об}} j(\text{Fo}^{\text{угля}}). \quad (5)$$

Начальные условия $C(\text{Fo}^{\text{угля}})|_{\text{Fo}^{\text{угля}}=0} = 0$.

Решение уравнения (5), выполненное с помощью преобразования Лапласа, относительно концентрации метана в воздушном пространстве может быть представлено в виде:

$$C_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}}) = C_0 f(Z), \quad (6)$$

где $f(Z)$ – табулированная функция,

Эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$

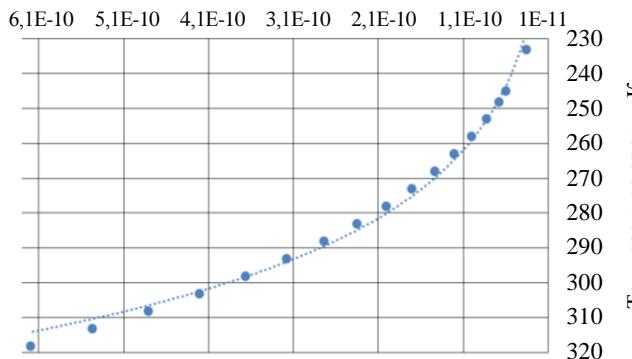


Рис.2. Зависимость изменения эффективного коэффициента диффузии от температуры окружающей среды.

Корреляционное соотношение $\sqrt{0,993}$



$$f(Z) = 1 - \exp\left(k^2 \text{Fo}^{\text{угля}}\right) \operatorname{erfc}\left(k \sqrt{\text{Fo}^{\text{угля}}}\right);$$

$$\operatorname{erfc}\left(k \sqrt{\text{Fo}^{\text{угля}}}\right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k \sqrt{\text{Fo}^{\text{угля}}}} \exp(-\xi^2) d\xi;$$

$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k \sqrt{\text{Fo}^{\text{угля}}}} \exp(-\xi^2) d\xi$ – интеграл вероятности при $k = \frac{I_0}{m} F_{\text{ед.об}} (1 - m)$; $F_{\text{ед.об}}$ – суммарная поверхность кусков угля в единице насыпного объема угольной массы, $\text{м}^2/\text{м}^3$; m – относительный объем, занимаемый воздухом в единице насыпного объема угольной массы, доли ед.

Начальная концентрация метана в угольной массе связана с газоносностью (метаноносностью) следующим соотношением:

$$C_0 = \rho_{\text{мет}} \rho_{\text{угля}} X_{\text{мет}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{мет}}$ – плотность метана, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{угля}}$ – плотность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; $X_{\text{мет}}$ – начальная газоносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$.

Одним из путей вычисления средней концентрации метана в воздушном пространстве насыпного объема $\overline{C}_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}})$ за время хранения или транспортировки $\text{Fo}^{\text{угля}}$ является интегрирование выражения (6) с последующим усреднением по времени $\text{Fo}^{\text{угля}}$. При этом выражение для вычисления $\overline{C}_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}})$ получается достаточно громоздким, что делает его малопригодным для дальнейших оценок.

Другой путь вычисления $\overline{C}_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}})$ состоит в использовании балансового уравнения, в основе которого лежит вычисление суммарного потока метана, поступающего в воздушное пространство насыпного объема из угольных отдельностей за время $\text{Fo}^{\text{угля}}$ при условии постоянства средней концентрации метана и с последующим расчетом приращения средней концентрации метана в воздушном пространстве относительно начальной величины, равной нулевому значению. Зависимость может быть представлена в виде:

$$\overline{C}_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}}) = \frac{C_0 k \left[2 \left(\frac{\text{Fo}^{\text{угля}}}{\pi} \right)^{0.5} - \text{Fo}^{\text{угля}} \right]}{1 + 0.5 k \left[2 \left(\frac{\text{Fo}^{\text{угля}}}{\pi} \right)^{0.5} - \text{Fo}^{\text{угля}} \right]}. \quad (8)$$

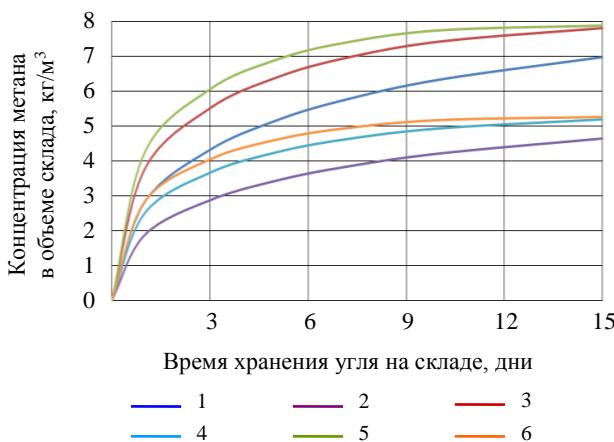


Рис.3. Зависимость изменения концентрации метана в воздушном пространстве насыпного объема с течением времени

1 – остаточная метаноносность после транспортировки 15 м³/т (-20 °C); 2 – 15 м³/т (0 °C); 3 – 15 м³/т (+10 °C); 4 – 10 м³/т (-20 °C); 5 – 10 м³/т (0 °C); 6 – 10 м³/т (+10 °C)

Расчеты $\overline{C}_\tau(\text{Fo}^{\text{угля}})$ при различных коэффициентах диффузии приведены на рис.3.

Согласно расчетам, средняя концентрация метана резко возрастает уже после одного дня хранения. Рост концентрации особенно заметен для высоких температур окружающей среды, так как с увеличением температуры повышается значение эффективного коэффициента диффузии [32, 33]. Например, при остаточной метаноносности после транспортировки 10 м³/т и длительности хранения сырья на складе 15 дней концентрация метана в объеме склада ориентировочно составит 8 кг/м³ в летний период и 7 кг/м³ в зимний период.

Вторая итерация позволяет установить метановыделения с поверхности насыпного объема в омывающий эту поверхность воздух на каждый



момент времени τ . Для определения метановыделения с поверхности насыпного объема следует, прежде всего, выбрать его геометрическую форму. Для насыпного объема, находящегося в вагоне, предлагается использовать геометрическую модель полуограниченного пространства, а для насыпного объема в виде штабеля, размещенного в закрытом складе, геометрическую модель неограниченного цилиндра с эквивалентным радиусом $R_{\text{пов.шт.}}$.

Принято допущение, что поток метана с поверхности насыпного объема в воздушную среду за время τ определяется величиной результирующего эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{eff}}^{\text{рез}}$, вычисляемого по методике, аналогичной предложенной в работе [34]. В основе этой методики лежит допущение о возможности рассмотрения угольной массы в качестве двух бинарных смесей, одна из которых состоит из угольных отдельностей, окруженных пустотами, содержащими воздух $D_{\text{eff}1}$, а другая, наоборот, из пустот с воздухом, которые окружены угольными отдельностями $D_{\text{eff}2}$. Эффективный коэффициент диффузии рассчитывается по формулам:

$$D_{\text{eff}1} = D_{\text{eff}}^{\text{возд}} \left[1 + v_{\text{угля}} \frac{\left(1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}}{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}} \right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{угля}}} \left(1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}}{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}} \right)} \right]; \quad (9)$$

$$D_{\text{eff}2} = D_{\text{eff}}^{\text{угля}} \left[1 + v_{\text{возд}} \frac{\left(1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}}{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}} \right)}{1 - \sqrt[3]{v_{\text{возд}}} \left(1 - \frac{D_{\text{eff}}^{\text{угля}}}{D_{\text{eff}}^{\text{возд}}} \right)} \right], \quad (10)$$

где $D_{\text{eff}}^{\text{угля}}$ – эффективный коэффициент диффузии метана в угле согласно графику на рис.2, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{\text{eff}}^{\text{возд}}$ – эффективный коэффициент диффузии метана в воздухе, $D_{\text{eff}}^{\text{возд}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [35-37]; $v_{\text{угля}}$ – относительный объем угольных отдельностей, $v_{\text{угля}} = 1 - m$; $v_{\text{возд}}$ – относительный объем воздушного пространства, соответствующий пористости насыпного объема, $v_{\text{возд}} = m$.

Результирующий эффективный коэффициент диффузии метана с учетом зависимостей (9) и (10) будет вычисляться следующим образом:

$$D_{\text{eff}}^{\text{рез}} = 0,2D_{\text{eff}1} + 0,8D_{\text{eff}2}. \quad (11)$$

Зависимости для вычисления метановыделений (потока метана) с поверхности вагона и с поверхности штабеля имеют вид:

$$J_{\text{ваг}} = \sqrt{\frac{D_{\text{eff}}^{\text{рез}}}{\pi\tau}} \left[\overline{C(Fo^{\text{угля}})} - C_{\text{возд}} \right]; \quad (12)$$

$$J_{\text{штаб}} = \frac{D_{\text{eff}}^{\text{рез}}}{R_{\text{пов.шт}}} \left(-0,5 + \frac{1}{(\pi Fo_{\text{штаб}})^{0,5}} \right) \left[\overline{C_{\tau}(Fo^{\text{угля}})} - C_{\text{возд}} \right], \quad (13)$$

где $Fo_{\text{штаб}}$ – диффузионное число Фурье для штабеля угля; $C_{\text{возд}}$ – концентрация метана в воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

На основе зависимости (12) несложно вычислить суммарное количество метана, поступившее в воздух, из насыпного объема угля, находящегося в вагоне. Для этого вначале находится суммарное

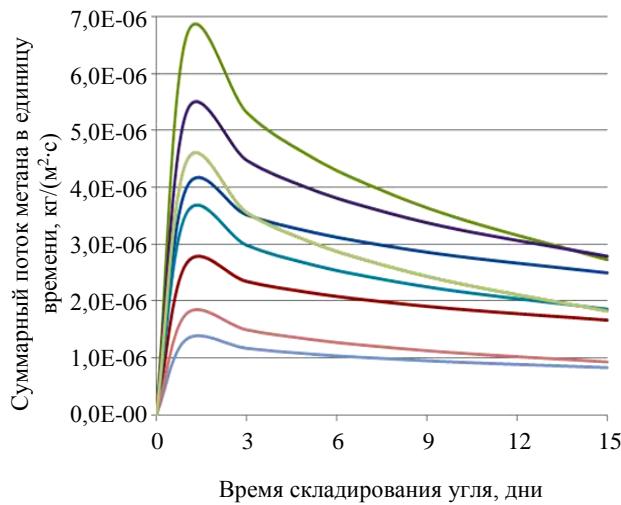


Рис.4. Зависимость потока метана с открытой поверхности угольного штабеля от времени его хранения

1 – 15 м³/т (–20 °C); 2 – 15 м³/т (+10 °C); 3 – 15 м³/т (0 °C); 4 – 10 м³/т (–20 °C);
 5 – 10 м³/т (0 °C); 6 – 10 м³/т (+10 °C); 7 – 5 м³/т (–20 °C); 8 – 5 м³/т (+10 °C);
 9 – 5 м³/т (0 °C)

той поверхности угольного штабеля от времени его хранения (рис.4). Величина начальной концентрации метана в угольном штабеле C_0 вычислялась с учетом остаточной метаноносности, рассчитанной по формуле (14).

Изменение концентрации метана в воздушном пространстве закрытого склада в предположении плоскопараллельного характера движения воздуха вдоль поверхности штабеля определяется выражением:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{штаб}} \left(1 - e^{-J_{\text{штаб}} PL}\right), \quad (15)$$

где $C_{\text{пр}}$ – предельно допустимая концентрация метана, $C_{\text{пр}} = 1\%$; P – периметр боковой поверхности штабеля, м²; L – длина штабеля, м.

На основании расчетов по формуле (15) с учетом зависимости (13) для различной остаточной метаноносности угля перед загрузкой в склад расход воздуха будет изменяться от 5 до 27 м³/с в зимний период (средняя температура окружающей среды –20 °C) и от 11 до 45 м³/с в летний период (средняя температура окружающей среды +20 °C). Максимальное значение расхода воздуха соответствует максимальному значению потока метана.

Математическое моделирование аэродинамики потока метана в объеме закрытого склада. Для проверки правомерности использования плоскопараллельной схемы движения воздуха в помещении угольного склада и установления распределения концентраций метана по длине склада осуществлено математическое моделирование процесса переноса газовой фазы с учетом аэродинамики воздушного потока, в который с поверхности штабеля поступает метан. Для этого был использован программный пакет Flow Vision. В качестве исходных данных принята реальная геометрия склада и размещенного в нем штабеля угля (высота 23 м, ширина по основанию 65 м и протяженность 600 м). В математической модели было учтено влияние на аэродинамику воздушного потока находящейся в складе погрузо-разгрузочной техники (портальный реклаймер).

Вычисления выполнялись для остаточной метаноносности угля перед загрузкой на склад, равной 15 м³/т и при температуре окружающей среды +20 °C. Для этих условий средний поток метана с поверхности угольного штабеля составил 6–10^{–6} кг/(м²·с).

Для вентиляции склада выбрана схема проветривания с подачей свежего воздуха через проемы, расположенные на боковых поверхностях в торцах помещения, и отводом загрязненного воздуха через трубу в центре склада (рис.5).

количество метана, поступившее в воздух, омывающий открытую поверхность угля, а затем определяется остаточная газоносность (метаноносность) угольной массы за время транспортировки $\tau_{\text{трансп}}$:

$$X_{\text{трансп}} = X_0 - \frac{J_{\text{ваг}} F_{\text{пов}}}{\rho_{\text{мет}} P_{\text{ваг}}}, \quad (14)$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь открытой поверхности вагона, м²; $P_{\text{ваг}}$ – грузоподъемность вагона, т.

Результаты вычислений показали, что в зависимости от температуры окружающей среды и времени транспортирования остаточная метаноносность угольной массы, загружаемой в склад, может составлять от 14 до 7 м³/т.

На основе формулы (9) построен график зависимости потока метана с открытой поверхности угольного штабеля от времени его хранения (рис.4). Величина начальной концентрации метана в угольном штабеле C_0 вычислялась с учетом остаточной метаноносности, рассчитанной по формуле (14).



Ввиду симметрии закрытого склада относительно вертикальных плоскостей, проходящих перпендикулярно (в центральном сечении склада) и параллельно (по длине склада перпендикулярно его основанию) горизонтальной оси, расчетная область была разделена на четыре равные части (рис.5). Все вычисления выполнялись для одной из этих частей.

Моделирование процесса переноса газовой примеси осуществлялось в течение 16 ч до момента стабилизации концентрации метана. Для установления закономерностей распределения концентрации метана по объему склада были выбраны точки 0-10, расположенные через каждые 30 м от воздуховыводящей трубы по направлению к воздухоподающим проемам (рис.6).

С учетом турбулентного характера течения воздушных масс, а также влияния погрузо-разгрузочной техники на траекторию их движения, распределение концентраций метана по объему закрытого склада будет выглядеть следующим образом. Концентрация метана принимает максимальное значение 0,00547-0,99 % по объему (красный цвет) у воздуховыводящей трубы (рис.6). Это объясняется постепенным накоплением метана при вращательном движении воздушных масс над поверхностью угля, выделяющей метан.

Изменения концентрации метана от времени в различных точках пространства закрытого склада показаны на рис.7. В соответствии с рис.7 рост концентрации метана до 0,99 % происходит до ее выхода на квазистационарные значения в течение ~ 45000 с, что соответствует 12,5 ч хранения угля на складе.

Таким образом, с учетом влияния сложной аэродинамики потока расход воздуха, обеспечивающий разбавление концентрации метана до пороговых значений, согласно расчетам равен $48 \text{ м}^3/\text{с}$.

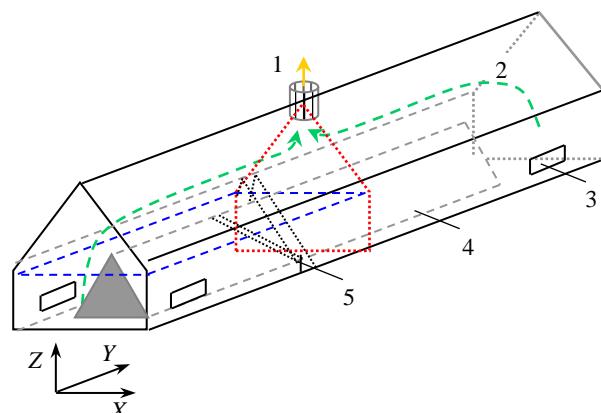


Рис.5. Схема закрытого угольного склада

1 – воздуховыводящая труба; 2 – поток воздуха; 3 – проем для поступления воздуха; 4 – угольный штабель; 5 – порталный реклаймер

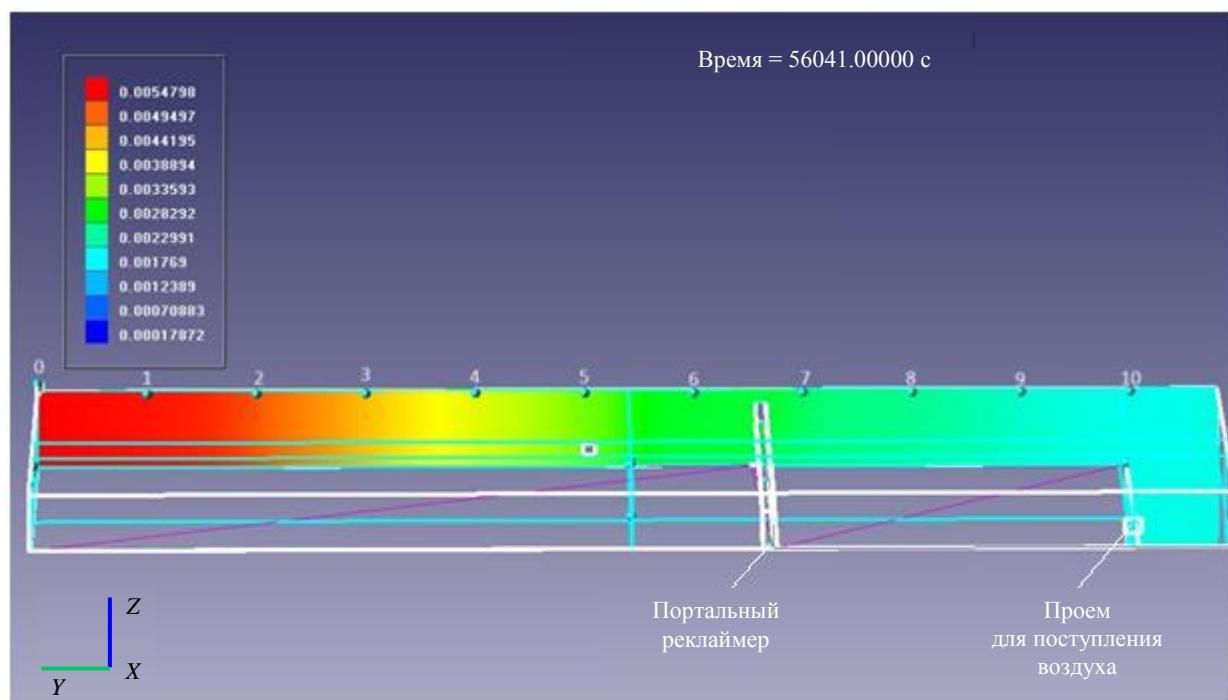


Рис.6. Массовые доли метана и расположение точек замера

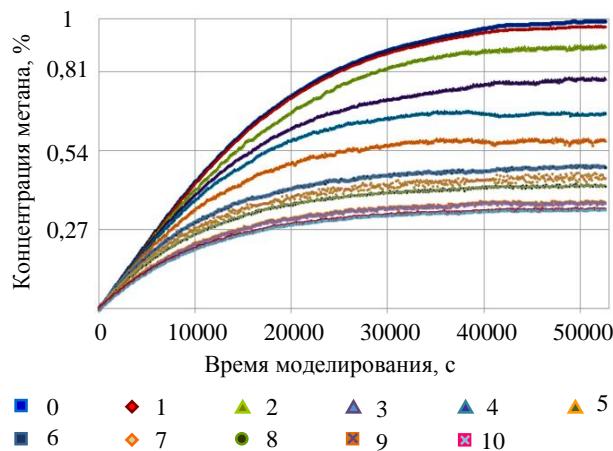


Рис.7. Зависимость изменения концентрации метана от времени в различных точках (0-10) пространства закрытого склада

временном хранении сырья ввиду ограниченности объема, складское помещение). В этой связи проблемы обеспечения безопасной эксплуатации закрытых складов будут связаны с выделяющимся газом метаном.

С целью предотвращения взрывоопасных ситуаций необходимо иметь информацию о величинах остаточной метаноносности угольной массы на каждом этапе:

- после добычи угля, его извлечения на поверхность и временного складирования перед погрузкой в вагоны;
- в период транспортировки перед размещением угля в закрытых складах;
- при непосредственном хранении угольного сырья.

Несмотря на то, что остаточная газоносность угольной массы после каждой стадии перегрузки и транспортировки снижается, ее величина может достигать значений, при которых эксплуатация закрытого угольного склада становится небезопасной в связи с возможностью превышения концентрации метана в воздухе предельно допустимого значения, принимаемого равным 1 % по объему.

Безопасность эксплуатации закрытого угольного склада по метановому фактору будет зависеть не только от величины остаточной метаноносности, но также и от температуры окружающей среды, которая напрямую влияет на скорость выхода метана из угольных отдельностей – чем выше температура, тем интенсивнее протекает процесс метановыделения.

Снижение метаноносности в летний период (средняя температура среды +20 °C) оказывается выше, чем ее уменьшение зимой (средняя температура среды –20 °C), почти в два раза. Таким образом, накопление концентрации метана в объеме закрытого склада летом будет происходить быстрее, что требует для этого периода более интенсивной вентиляции.

Результаты аналитических расчетов требуемого расхода воздуха не учитывают сложную аэродинамику потока воздуха в отличие от математического моделирования. Удовлетворительное совпадение полученных данных подтверждает правомерность использованных при разработке математической модели допущений.

Удовлетворительное совпадение данных аналитических расчетов с результатами математического моделирования (расхождение не превышает 6 %) подтверждает правомерность использованных при разработке математической модели допущений.

Заключение

Размещение угольного сырья на складах закрытого типа – актуальный способ временного хранения полезного ископаемого с возможностью ограничить воздействие на него климатических условий, а также снизить аэroteхногенное воздействие на окружающую среду.

Высокая природная газоносность некоторых угольных пластов может привести к взрывоопасным ситуациям при добыче, транспортировке и

закрытом складе. Важно учитывать факторы, влияющие на концентрацию метана в воздухе, и принимать соответствующие меры по его снижению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеев А.В., Спицын А.А., Займенцева Л.А., Зубко М.В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 180-198. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_91_0_180](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_180)
2. Overland I., Loginova J. The Russian coal industry in an uncertain world: Finally pivoting to Asia? // Energy Research & Social Science. 2023. Vol. 102. № 103150. DOI: [10.1016/jerss.2023.103150](https://doi.org/10.1016/jerss.2023.103150)
3. Коршунов Г.И., Сафина А.М., Каримов А.М. Исследование и анализ источников выделения респирабельной фракции пыли на угольных разрезах // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 10. С. 65-70. DOI: [10.24000/0409-2961-2021-10-65-70](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-10-65-70)
4. Новак А. ТЭК России сегодня и завтра: итоги и задачи // Энергетическая политика. 2024. № 1 (192). С. 6-13. DOI: [10.46920/2409-5516_2024_1192_6](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2024_1192_6)



5. Magomet R.D., Rodionov V.A., Soloviov V.B. Methodological Approach to Issue of Researching Dust-Explosion Protection of Mine Workings of Coal Mines // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 2. P. 1154-1161.
6. Руши Е.А., Власова Н.В. Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2 (78). С. 20-32. [DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2\(78\).20-32](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32)
7. Головина Е.И., Гребенева А.В. Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788-800. [DOI: 10.31897/PMI.2021.6.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2)
8. May Chan Myae Zaw, Alpatova P.N. Ambiguity in the Russian terminology of the energy industry // XLinguae. 2023. Vol. 16. Iss. 1. P. 60-69. [DOI: 10.18355/XL.2023.16.01.05](https://doi.org/10.18355/XL.2023.16.01.05)
9. Мазуренко О.И., Русинов И.А. Анализ современного состояния и перспектив развития морских угольных терминалов портов России // Транспортное дело России. 2020. № 4. С. 154-159.
10. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Магомедов Г.С., Толькин С.А. Снижение аэрохимогенного воздействия респира-бельной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7. С. 132-144. [DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_132](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_132)
11. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 71-81. [DOI: 10.31897/PMI.2022.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12)
12. Васина Д., Рапонорт И., Тесленко И. Решение экологических проблем открытых угольных терминалов Владивостока // International Journal of Professional Science. 2021. № 6. С. 27-36.
13. Khokhlov S., Abiev Z., Makkoev V. The Choice of Optical Flame Detectors for Automatic Explosion Containment Systems Based on the Results of Explosion Radiation Analysis of Methane- and Dust-Air Mixtures // Applied Science. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 1515. [DOI: 10.3390/app12031515](https://doi.org/10.3390/app12031515)
14. Кривопишина М.Е., Костенко Н.И. Рациональное оснащение терминала морского порта для экспортного угля // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2021. Т. 1. С. 86-90.
15. Qing-Wei Li, Yang Xiao, Cai-Ping Wang et al. Thermokinetic characteristics of coal spontaneous combustion based on thermogravimetric analysis // Fuel. 2019. Vol. 250. P. 235-244. [DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.003)
16. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the Parameters of a Shock Wave on the Wall of an Explosion Cavity with the Refraction of a Detonation Wave of Emulsion Explosives // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. № 3976. [DOI: 10.3390/app11093976](https://doi.org/10.3390/app11093976)
17. Jinling Guo, Junlian Gao, Kejia Yan, Bo Zhang. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions // Energy Policy. 2023. Vol. 181. № 113718. [DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113718](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718)
18. Гридина Е.Б., Ковшов С.В., Антоненко Т.И., Мирошниченко А.К. Разработка пожарно-технических мероприятий по профилактике и ликвидации очагов самовозгорания бурого угля // Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2021. № 6. С. 96-101 (in English). [DOI: 10.33271/NVNGU/2020-6/096](https://doi.org/10.33271/NVNGU/2020-6/096)
19. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Мозжсанов Д.Б. Изменение газоносности углей при транспортировке до места временного хранения // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2024. Т. 8. № 2. С. 188-198 (in English). [DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-2.188](https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.188)
20. Vasilenko T., Kirillov A., Islamov A. et al. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals // Fuel. 2022. Vol. 329. № 125113. [DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125113](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125113)
21. Ли Х.У., Мащенко И.Д., Белавенцев Л.П., Шлапаков П.А. О петрографическом методе определения сорбционной способности углей // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 1. С. 31-44.
22. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Iss. 2. P. 1917-1929.
23. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V. et al. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability // Urban Science. 2024. Vol. 8. Iss. 2. № 44. [DOI: 10.3390/urbansci8020044](https://doi.org/10.3390/urbansci8020044)
24. Dwivedi K.K., Chatterjee P.K., Karmakar M.K., Pramanick A.K. Pyrolysis characteristics and kinetics of Indian low rank coal using thermogravimetric analysis // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 102-112. [DOI: 10.1007/s40789-019-0236-7](https://doi.org/10.1007/s40789-019-0236-7)
25. Литвинова Т.Е., Царева А.А., Полторацкая М.Е., Рудко В.А. Механизм и термодинамика процесса сорбции этилового спирта на активированном нефтяном коксе // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 625-636.
26. Alpatova P.N., May Chan Myae Zaw The componential semantic reflection of Russian energy industry terms in scientific articles // Research Journal in Advanced Humanities. 2024. Vol. 5. Iss. 2. P. 29-40. [DOI: 10.58256/d498dh32](https://doi.org/10.58256/d498dh32)
27. Мустафин М.Г. Моделирование геомеханического состояния массива горных пород при добыче метана из угольных пластов // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 57-61.
28. Сикарев С.Н., Адамов Е.И., Смирнов С.Г. и др. Математическая модель поведения воздушных потоков на территории открытых угольных складов // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 62. С. 20-26. [DOI: 10.37890/jwt.vi62.37](https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.37)
29. Гончаров Е.В., Цирель С.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопропитков при скважинных методах дегазации // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 803-808. [DOI: 10.18454/PMI.2016.6.803](https://doi.org/10.18454/PMI.2016.6.803)
30. Safiullin R., Arias Z.P. Comprehensive Assessment of the Effectiveness of Passenger Transportation Processes using Intelligent Technologies // Open Transportation Journal. 2024. Vol. 18. № E26671212320514. [DOI: 10.2174/0126671212320514240611100437](https://doi.org/10.2174/0126671212320514240611100437)
31. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 135-148. [DOI: 10.3390/app12031515](https://doi.org/10.3390/app12031515)



32. Смирнов В.Г., Манаков А.Ю., Дырдин В.В. Энергия активации процесса разложения и образования гидратов метана в порах природного угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3 (103). С. 24-28.
33. Гайдаров Б.А. Обзор основных характеристик экспериментальных методов измерения коэффициента диффузии метана угольных пластов // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2022. № 4 (91). С. 24-31.
[DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-24-31](https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-91-4-24-31)
34. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей газов и их композиций. М.: Мир, 1968. 459 с.
35. Старикив Г.П., Юрченко В.М., Мельник Т.Н. и др. Активация диффузии метана в угле под воздействием изменяющихся механических и термодинамических параметров пласта // Физика и техника высоких давлений. 2019. № 3. С. 122-130.
36. Haoran Song, Baiquan Lin, Zheng Zhong, Ting Liu. Experimental study on methane diffusion kinetics in three typical metamorphic coals // Fuel. 2022. Vol. 311. № 122601. [DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122601](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122601)
37. Шапошник В.А. Энергии активации ионообменных процессов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 5. С. 622-629. [DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10683](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10683)

Авторы: Семен Григорьевич Гендлер, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Анастасия Юрьевна Степанцова, аспирант, s215060@stud.spti.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5027-4742> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Михаил Михайлович Попов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6857-7215> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.