

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА В КАМЕННЫХ УГЛЯХ

С.Г. Гендлер¹, Т.А. Василенко¹, А.Ю. Степанцова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s215060@stud.spmi.ru

Аннотация: Показано, что остаточное содержание газа метана в угольных отдельностях определяется, с одной стороны, начальной величиной метаноносности в разрабатываемом пласте, а с другой стороны – условиями транспортирования угля до места временного хранения. Отмечено, что динамика метаноносности угля при его транспортировке до складов временного хранения зависит от интенсивности процессов массопереноса между углем и воздухом. Рассмотрен термогравиметрический метод установления параметров массопереноса в ископаемых углях, который основан на изучении в лабораторных условиях десорбции метана из пористой структуры каменного угля. Показано, что с помощью этого метода ожидается регистрация изменения массы образца в условиях программированного изменения температуры среды в заданных параметрах. Описана установка для термогравиметрии МОС-120Н, состоящая из весов непрерывного взвешивания (термовесов-влажномеров); печи, в которую помещают образец; инфракрасных датчиков, регистрирующих температуру (термопары); программного регулятора температуры. Исследование проводилось для 5 навесок. Полученные результаты измерений представлены в виде временных зависимостей коэффициентов массопереноса (эффективного коэффициента диффузии и энергии активации) от температуры окружающей среды в интервале от 30 до 70 °С.

Ключевые слова: уголь, транспортировка каменных углей, угольный склад, метан, остаточная метаноносность, параметры массопереноса, термогравиметрический метод десорбции, эффективный коэффициент диффузии метана, энергия активации, уравнение Аррениуса.

Для цитирования: 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: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_135.

Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage

S.G. Gendler¹, T.A. Vasilenko¹, A.Yu. Stepantsova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: s215060@stud.spmi.ru

Abstract: It is shown that the residual content of methane gas in coal segments is determined, on the one hand, by the initial value of methane content in the seam being mined, and on the other hand, by the conditions of coal transportation to the place of temporary storage. It is noted

that the dynamics of coal methane content during its transportation to temporary storage depots depends on the intensity of mass transfer processes between coal and air. This paper describes the thermogravimetric method of establishing the parameters of mass transfer in fossil coals, which is based on the study of methane desorption from the porous structure of hard coal under laboratory conditions. It is shown that this method is expected to register the change in the mass of the sample under conditions of programmed change in the temperature of the medium in the given parameters. MOC-120H thermogravimetry setup is described, which consists of continuous weighing devices (thermo-weighers-moisture meters); a furnace in which the sample is placed; infrared sensors registering the temperature (thermocouples); a program temperature controller. The study was carried out for 5 samples. The obtained measurement results are presented in the form of time dependences of mass transfer coefficients (effective diffusion coefficient and activation energy) on the ambient temperature in the range from 30 °C to 70 °C.

Key words: coal, hard coal transportation, coal storage, methane, residual methane content, methane desorption, mass transfer parameters, thermogravimetric desorption method, effective methane diffusion coefficient, activation energy, Arrhenius equation.

For citation: Gendler S. G., Vasilenko T. A., Stepanтова A. Yu. Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9-1):135-148. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_135.

Введение

Добычаемый в России уголь имеет значительный экспортный потенциал [1 – 3]. Так, по данным Г.Б. Мешкова и И.Е. Петренко [4], в январе – марте 2023 г. угледобывающие предприятия России отгрузили потребителям 99,4 млн т угля. Из всего отгруженного объема, по статистическим данным угледобывающих компаний, на внутренний рынок отгружено 50,2 млн т, а на экспорт – соответственно, 49,2 млн т. Основная доля экспорта приходится на энергетические угли – 41,1 млн т (83,5% угольного экспорта).

Важным элементом логистической цепочки доставки угольной продукции потребителю следует считать морские порты и терминалы, куда уголь поступает для промежуточного хранения с места его добычи, преимущественно с помощью железнодорожного транспорта [5].

Для промежуточного, временного хранения угля в настоящее время в большей степени используются склады открытого типа [6 – 8]. Однако в связи со значи-

тельной экологической нагрузкой на окружающую среду в последние годы все больший интерес начинает проявляться к закрытым угольным складам [9]. При очевидной экологической привлекательности этих складов их широкое использование сдерживается возможностью формирования внутри закрытого помещения неблагоприятной газовой обстановки, связанной с выделением из складированного угля метана, оставшегося в угольных отдельных частях после извлечения угля на поверхность, его погрузки в вагоны и транспортировки.

Величина метановыделения с поверхности угольных штабелей, в которых осуществляется временное хранение угля, зависит от остаточной газоносности складированного угля и параметров массопереноса в системе «угольный штабель – воздушная среда закрытого склада».

В свою очередь, остаточная газоносность складированных углей определяется не только их начальной газоносностью в пласте, условиями и временем транспортировки, но также и параметрами

массопереноса в системе «уголь, загруженный в вагоны — наружный воздух» [10–13].

Таким образом, параметры массопереноса в каменных углях следует считать фундаментальными показателями, на основе которых представляется возможным прогнозировать остаточную газоносность складированного угля после его транспортировки, а также определять величину газовой выделенности с поверхности угольных штабелей в воздушную среду склада, что, в конечном итоге, позволяет рассчитывать концентрацию метана и планировать кратность воздухообмена для обеспечения ее безопасных значений.

Постановка задачи

Уголь, загружаемый в вагоны, а также складированный в штабелях, образует среду, содержащую угольные отдельныености с сорбированным метаном, которые окружены пустотами, наполненными воздухом и имеющими связь с атмосферным воздухом, омывающим открытую поверхность штабеля или вагона.

Физическую модель процесса массопереноса возможно представить в виде двух процессов: первый определяется диффузией метана из угольных отдельныхностей в воздушные пустоты, а второй — его диффузией по каналам, связывающим пустоты с поверхностью [14, 15].

Для математического описания первого процесса, т.е. поступления метана из угольных отдельныхностей заданного радиуса в пустоты используются зависимости, приведенные в работе [15]. В этой зависимости, наряду с временем протекания процесса массообмена, фигурирует эффективный коэффициент диффузии D_{eff} и энергия активации E , величины которых определяются экспериментально.

Процесс диффузии метана по каналам, связывающим воздушные полости с поверхностью угля, находящегося в вагоне, также можно описать зависимо-

стью, аналогичной зависимости, определяющей выделения метана от угольных отдельныхностей, за исключением представления массива загруженного в вагоны угля полуограниченным пространством и допущения о возможности использования для описания процесса диффузии в нем при помощи коэффициента диффузии метана в воздухе, величина которого известна и составляет $D_{возд.} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [16, с. 2].

Таким образом, для оценки динамики изменения газоносности транспортируемого угля и определения ее значения на момент временного складирования угля необходимо осуществить исследование параметров массопереноса, включающих эффективный коэффициент диффузии и энергию активации газа в угольных отдельныхностях.

Методология определения параметров массопереноса

Для определения параметров массопереноса метана D_{eff} и E в ископаемых углях обычно используется термогравиметрический метод анализа определения десорбции метана из пористой структуры ископаемых углей. На основе этого метода в интервале температур от 30 до 70 °С осуществляются измерения эффективного коэффициента диффузии D_{eff} и энергии активации E [17–20]. В общем случае, эти величины связаны соотношением, называемым уравнением Аррениуса [21–24]:

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Так как в выражении (1) фигурируют два неизвестных параметра D_0 и E , определяемые одновременно, то термогравиметрические измерения необходи-

мо провести как минимум для двух температурных режимов.

Для вычисления D_{eff} и E могут быть использованы выражения следующего вида [25 – 27]:

$$E = R \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \ln \left(\frac{D_{eff1}}{D_{eff2}} \right). \quad (2)$$

Следует отметить, что на величины D_{eff} и E влияет скорость десорбции, которая в начальный момент максимальна, что объясняется эмиссией метана между молекулами, находящимися в объеме пор в свободном состоянии и слабо связанными с поверхностью. На конечной стадии скорость десорбции связана с движением молекул, имеющих большую энергию связи с активными центрами на поверхности пор, микропористой структурой и твердотельной диффузией метана, обеспечивающей перенос молекул из закрытых пор через твердую матрицу угольного вещества [28 – 30].

Имеющиеся исследования свидетельствуют о том, что характер изменения относительной массы Δm метана в образце от времени может быть аппроксимирован экспоненциальной зависимостью [31, 32]:

$$\Delta m = \exp(-\alpha \cdot t), \quad (3)$$

где t – время, с; α – коэффициент, равный отношению эффективного коэффициента диффузии к квадрату радиуса угольных отдельностей, $1/с$.

$$\alpha = \frac{D_{eff}}{r_{coal}^2}. \quad (4)$$

При построении графика по формуле (3) в полулогарифмических координатах величина α , как тангенс угла наклона кривой, будет описывать динамику выхода газа метана из угля [15, 33, 34]. Практически на всем протяжении график представляет собой прямую линию, за исключением начального и конечного участков. Изменение наклона кривой на завершающей стадии обусловлено сни-

жением потока метана из поровой структуры и гигроскопичностью образца ввиду длительного процесса измерений на весах-влажномерах. Таким образом, этот участок непригоден для исследования.

Полученные таким образом коэффициенты α при разнотемпературных измерениях на установке термогравиметрии характеризуют коэффициент диффузии и соответствуют коэффициентам диффузии молекул метана, «имеющим наиболее высокие значения энергии связи с угольным веществом, что соответствует случаю проникновения метана в поры малого размера (порядка размеров молекул) при насыщении образцов в капсуле высокого давления» [15, с. 96].

Для определения энергии активации E диффузионного процесса необходимо вычислить наклон кривой экспоненциальной зависимости коэффициента диффузии от температуры в полулогарифмических координатах. Тогда логарифм коэффициента диффузии должен линейно зависеть от аргумента $1/T$ [15]:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E}{RT}. \quad (5)$$

Подготовка образцов к проведению экспериментов, лабораторное исследование десорбции метана термогравиметрическим методом

Для проведения эксперимента были отобраны бороздковым методом образцы угля шахтопластов Кемеровской области марок Г и Ж (табл. 1). Природная газоносность этих углей составляет свыше $15 \text{ м}^3/\text{т}$, достигая на некоторых горизонтах $25 \text{ м}^3/\text{т}$.

Открытая пористость угля определялась пикнометрическим методом по разности кажущейся и действительной плотностей. Радиус микропор и объем пор получены с помощью низкотемпературной сорбции азота.

Таблица 1

Общие сведения отобранных для эксперимента проб угля [составлена авторами]
General information of the coal samples taken for the experiment [compiled by the authors]

№ шахто-пласта	Марка угля	№ навески	Выход летучих веществ, V^{daf} , %	Зольность, A^d , %	Влага, W_t^r , %	Открытая пористость P_o , %	Радиус микропор, R, A	Объем пор, $см^3/г$
1	Г	1	39,4	8,5	4,8	7,246	10,648	0,013
		2	37,9	3,6	4,7	14,286	14,969	0,015
2	Г	3	42,7	6,2	3,1	6,107	12,802	0,006
		4	41,2	9,5	3,9	2,920	12,744	0,007
3	Ж	5	33,6	7,7	4	11,376	13,346	0,016

Предварительно дегазированные навески с углем массой по 100 г диаметром частиц 2 – 2,5 мм были высушены при температуре 105 °С в сушильной камере для удаления влаги из навесок. Таким образом, предполагается, что изменение в массе навески после насыщения угля метаном будет происходить за счет выхода газа.

После сушки навески с углем помещались в эксикатор при комнатной температуре на несколько часов для охлаждения. Далее каждая навеска загружалась в капсулу высокого давления, которая в кратчайший срок была герметизирована, а воздух из капсулы откачан вакуумным насосом, чтобы не допустить поступление атмосферной влаги в просушенный образец. Герметично закрытая капсула, соединенная с газовым баллоном, наполнялась газом метаном до тех пор, пока в капсуле не создавалось давление 70 атм. Давление баллона с газом и давление внутри капсулы контролировалось по показаниям манометров, входящих в конструкцию экспериментальной установки (рис. 1). Насыщение угля метаном производилось в капсуле высокого давления в течение 14 дней.

Определение параметров массопереноса проводилось с использованием установки для термогравиметрии МОС-120Н, основным элементом которой являются весы-влажмеры, способные поддержи-

вать постоянной задаваемой температурой в печи до 12 ч за счет инфракрасного излучателя, размещенного в открывающейся крышке камеры.

Так, насыщенный газом образец угля в кратчайшее время (в течение 1 – 2 мин) после вскрытия капсулы пересыпался в измерительную ячейку, входящую в состав весов-влажмеров. Весы к этому моменту уже были подготовлены к работе. Показания на приборе зафиксировали начальную массу навески, и был произведен запуск установки.

Отслеживание динамики изменения массы метана проводилось для температур от 30 до 70 °С.

В течение всего времени эксперимента (5 – 7 ч) на цифровой индикатор ве-



Рис. 1. Схема экспериментальной установки [составлена авторами]

Fig. 1. Schematic of the experimental setup [compiled by the authors]

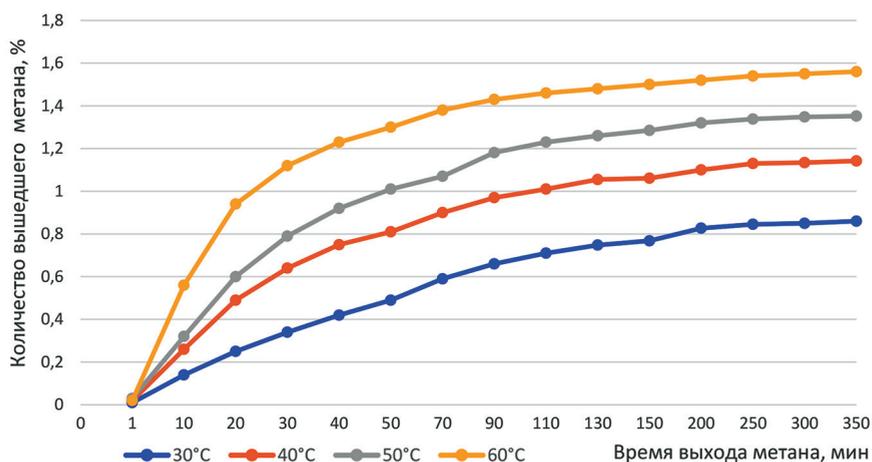


Рис. 2. График зависимости выхода метана во времени при разных температурах нагрева угля для навески угля № 5 [составлен авторами]

Fig. 2. Graph of the methane output over time at different coal heating temperatures for sample 5 [compiled by the authors]

сов-влагомеров выводилось изменение массы загруженного образца [35]. В зависимости от устанавливаемой фиксированной температуры регистрация изменения массы продолжалась до выхода

кривой десорбции на плато с постоянным значением.

Дополнительно проводились замеры потери массы ненасыщенных метаном образцов для определения влияния вла-

Таблица 2

Сводная таблица экспериментально полученных значений [составлена авторами]
Summary table of experimentally obtained values [compiled by the authors]

№ навески	Температура измерения, °C	Количество поглощенного метана, %	Коэффициент α , 10^{-4} c^{-1}	Коэффициент диффузии, $D_{\text{eff}}, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{c}$	Энергия активации, E , кДж/моль
1	50	0,83	1,99	4,4775	12,6
	60	1,54	2,21	11,1881	
	70	1,72	3,16	15,9980	
2	50	0,88	2,22	11,2386	12,8
	60	0,89	3,61	18,2756	
	70	0,90	4,30	21,7686	
3	50	0,95	2,06	10,4286	13,7
	60	1,66	2,31	11,6944	
	70	0,98	2,80	14,1750	
4	50	0,94	1,01	5,1131	48,5
	60	1,24	1,38	6,9863	
	70	1,00	7,84	39,6900	
5	30	0,88	3,35	4,2413	20,7
	40	1,15	4,27	5,4027	
	50	1,35	4,74	6,0034	
	60	1,56	8,01	10,1248	

ги воздуха на ход эксперимента. Данные значения были учтены при дальнейших расчетах и построении графиков.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На основе полученных в процессе экспериментальных исследований данных осуществлена оценка динамики количества метана, удаляемого из угольной навески при различных температурах. Графики на рис. 2. иллюстрируют временные зависимости количества метана, удаляемого из угля при различных температурах, на примере навески № 5 (см. табл. 1). Из данного рисунка следует, что динамика количества выходящего метана имеет нелинейный характер. С течением времени скорость выхода метана уменьшается, а его количество стремится к некоторому асимптотическому значению, величина которого зависит от температуры, что свидетельствует о ее влиянии на процесс десорбции (с повышением температуры скорость процесса десорбции растет).

Представление экспериментальных данных, характеризующих динамику потери массы исследуемой навески углей Δm при заданной температуре t , в полулогарифмических координатах ($\ln(\Delta m) - t$) дало возможность вычислить эффективный коэффициент диффузии D_{eff} , величина которого определялась из графика (рис. 3) как тангенс угла наклона кривой десорбции метана.

Так, согласно проведенным исследованиям и соответствующим расчетам, коэффициенты эффективной диффузии исследуемых навесок находятся в диапазоне от $4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ до $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Полученные данные сведены в табл. 2.

Энергия активации, а точнее, отношение E/R , вычислялось из наклона графика (рис. 4), построенного по формуле (5) по полученным экспериментальным значениям D_{eff} (см. табл. 2). При этом предполагается, что диффузия является твердотельной [15, с. 96].

По данным предыдущих исследований авторов [15, с. 93], энергия активации, в общем случае, изменяется в ин-

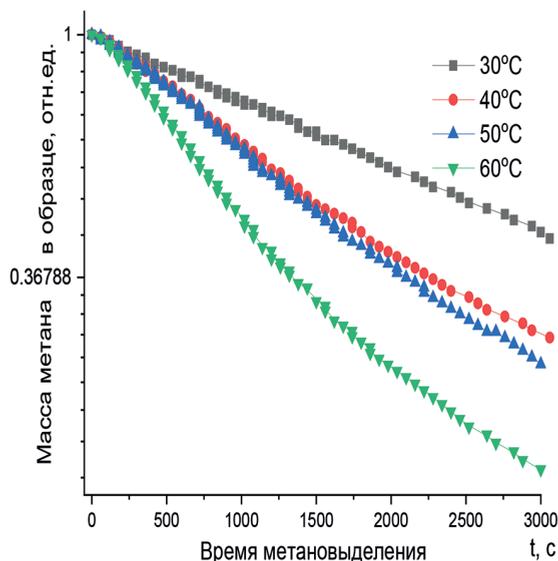


Рис. 3. Кривая десорбции метана в полулогарифмических координатах для навески № 5 [составлена авторами]

Fig. 3. Methane desorption curve in semi-logarithmic coordinates for sample 5 [compiled by the authors]

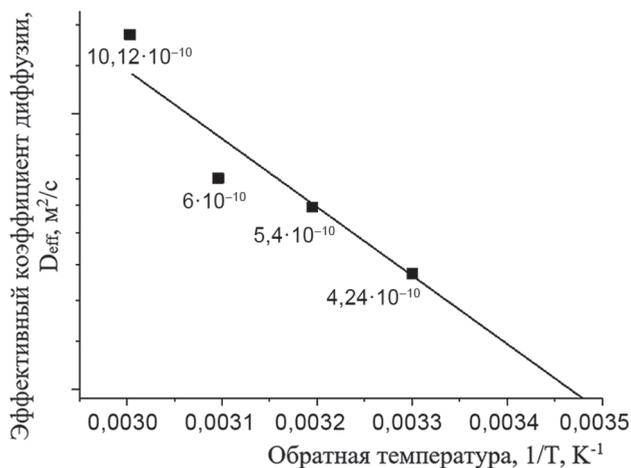


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента диффузии от обратной температуры в полулогарифмических координатах [составлена авторами]

Fig. 4. Dependence of the effective diffusion coefficient on the inverse temperature in semi-logarithmic coordinates [compiled by the authors]

тервале от 5 кДж/моль до 50 кДж/моль и определяет скорость десорбции, а следовательно, и значения коэффициентов диффузии. Такой широкий диапазон значений энергии активации связан с различными горно-геологическими условиями залегания углей (например, в нарушении, вне нарушения) и их марками.

Для каждой исследуемой пробы угля полученные значения коэффициента D_0 и энергии активации E , при условии допущения об их независимости от температуры, могут быть использованы для вычисления D_{eff} при температурах, отличных от имевших место при проведении экспериментальных исследований.

Так, например, для навески № 5 при температуре 20 °С, или 293 К, обратное

значение температуры $1/T = 0,00341$, предэкспоненциальный множитель $D_0 = 1,55 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $E/R = 2487,52$, а коэффициент диффузии D_{eff} по формуле (1) составляет $3,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Рассчитанные значения эффективных коэффициентов диффузии при других температурах для навески № 5 приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что при снижении средней температуры транспортируемого или складированного угля с 20 °С до -20 °С величина коэффициента эффективной диффузии метана может уменьшиться в 3,86 раз. В этом случае остаточная газоносность угля, размещаемого на закрытом складе, при прочих равных условиях в летний период вре-

Таблица 3

Значения эффективных коэффициентов диффузии при разных температурах для навески № 5 [составлена авторами]
Values of effective diffusion coefficients for different temperatures for sample 5 [compiled by the authors]

№ навески	$D_{eff}, 10^{-10}$ м ² /с				
	20 °С	10 °С	0 °С	-10 °С	-20 °С
5	3,2	2,4	1,7	1,2	0,8

мени будет ориентировочно, по выполненным нами оценкам, на 37% ниже, чем в зимний период.

Таким образом, в процессе транспортировки угля до места временного хранения в зимний период его остаточная газоносность будет более высокой, чем летом, при положительной температуре воздуха. Это необходимо учитывать при прогнозе метановой обстановки в помещении закрытого угольного склада и выборе мероприятий по ее нормализации.

В любом случае, прогноз метановой обстановки в помещении закрытого угольного склада должен включать первоначальное экспериментальное определение энергии активации образцов угля, который планируется транспортировать на закрытый склад, вычисление эффективных коэффициентов диффузии при фактических температурах воздуха с последующим расчетом остаточной газоносности угля и возможной концентрации метана в воздухе закрытого склада [9].

Выводы

1. Показано, что основными показателями, характеризующими процесс массопереноса, величины которых необходимо устанавливать экспериментально, являются эффективный коэффициент диффузии и энергия активации газа в угольных отдельностях. Наиболее рациональным для проведения экспериментальных исследований следует считать термогравиметрический метод анализа определения десорбции метана из пористой структуры ископаемых углей, поз-

воляющий находить значения этих показателей в широком интервале температур.

2. Экспериментально установлено, что коэффициенты эффективной диффузии исследуемых образцов находятся в диапазоне от $4,2 \cdot 10^{-10}$ м²с⁻¹ до $3,9 \cdot 10^{-9}$ м²с⁻¹. Наименьшее значение соответствует температуре 30 °С, а наибольшее — 70 °С. Величина энергии активации при этом составила от 12,6 до 48,5 кДж/моль. Разброс в значениях энергии активации исследуемых образцов связан с разницей мест их отбора, условиями залегания пластов, марок угля и других физико-химических свойств.

3. Экспериментально показано, что зависимость, описывающая связь между энергией активации и эффективным коэффициентом диффузии, имеет обратный характер, т.е. чем больше энергия связи метана с углем и энергия активации, тем меньше будет скорость диффузии метана и, соответственно, меньше коэффициент диффузии.

4. Доказано, что прогноз газовой обстановки в помещении закрытого угольного склада и последующий выбор параметров вентиляции должен базироваться на первоначальном экспериментальном определении энергии активации образцов угля, который планируется транспортировать на закрытый склад, вычислении эффективных коэффициентов диффузии при фактических температурах воздуха с последующим расчетом остаточной газоносности угля и возможной его концентрации в воздухе закрытого склада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнев А. В., Корнева М. В., Сафина А. М. Роль пылевого фактора в вопросах обеспечения промышленной безопасности и охраны труда на предприятиях угледобывающей отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S60-2. — С. 322 — 334.

2. Коршунов Г. И., Спицын А. А., Баженова В. А. Разработка способа снижения выделения респираторной фракции пыли в атмосферу разреза за счет рекультивации пыля-

щих источников // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 6. — С. 27–32. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-27-32.

3. 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.

4. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за январь — март 2023 года // Уголь. — 2023. — № 6. — С. 5–12.

5. Астафуров Н. А. Транспортировка угля в России // Научный форум. Сибирь. — 2015. — № 1. — С. 84–85.

6. Хохолов Ю. А., Гаврилов В. Л., Федоров В. И. Математическое моделирование теплообменных процессов хранения мерзлого угля на открытых складах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 6. — С. 172–182. DOI: 10.15372/FTPRPI20190617.

7. Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14

8. Московская И. В., Лазарева Л. П. Анализ эффективности применения ветро-пылезащитных экранов на открытых складах угольных терминалов // Евразийский Союз Ученых. — 2015. — № 6-2 (15). — С. 140–144.

9. Альмухаметова С. Г. Переход открытых складов угля к закрытым как решение проблемы выбросов пыли в окружающую среду / Материалы XIX молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб., 2020. — С. 25–28.

10. Зубов В. П., Голубев Д. Д. Перспективы использования современных технологических решений при отработке пологих пластов угля с учетом опасности формирования очагов его самовозгорания // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 534–541. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6.

11. Родионов В. А., Турсенев С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

12. Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 133–149. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.

13. Родионов В. А., Цыганков В. Д., Жихарев С. Я., Кормщиков Д. С. Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 69–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69.

14. 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. — С. 24–28.

15. Василенко Т. А., Кириллов А. К., Шажко Я. В., Волошина Н. И. Скейлинговое представление процесса десорбции метана из природного сорбента // Физика и техника высоких давлений. — 2007. — Т. 17. — № 4. — С. 91–99.

16. Демченко В. Б., Колесников В. Г. Исследования гравитационного расслоения метано-воздушной смеси // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2001. — Симпозиум «Неделя горняка». — С. 1–3.

17. 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.

18. Qing-Wei Li, Yang Xiao, Cai-Ping Wang, Jun Deng, Chi-Min Shu Thermokinetic characteristics of coal spontaneous combustion based on thermogravimetric analysis // *Fuel*. 2019, vol. 250, pp. 235 – 244. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.003.

19. Усенбеков М. С., Исабек Т. К., Полчин А. И., Жумабекова А. Е. Динамика метано-выделения при ведении горных работ в зонах геологических нарушений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 12. – С. 141 – 151. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_141.

20. 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, no. 2, pp. 1917 – 1929.

21. Сикарев С. Н., Адамов Е. И., Смирнов С. Г., Липатов И. В., Людмилиин М. М. 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.

22. Стариков Г. П., Юрченко В. М., Мельник Т. Н., Худолей О. Г., Кравченко А. В. Активация диффузии метана в угле под воздействием изменяющихся механических и термодинамических параметров пласта // *Физика и техника высоких давлений*. – 2019. – № 3. – С. 122 – 130.

23. Шапошник В. А. Энергии активации ионообменных процессов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2022. – Т. 22. – № 5. – С. 622 – 629. DOI: 10.17308/sorp-chrom.2022.22/10683.

24. Джигрин А. В., Поздняков Г. А., Новосельцев А. И. Предупреждение и локализация взрывов газа и пыли в угольных шахтах // *Безопасность труда в промышленности*. – 2009. – № 4. – С. 22 – 26.

25. Муханов А., Мостепанов Е., Ильченко Г. Промышленная безопасность угольной промышленности // *Энергонадзор*. – 2015. – № 10. – С. 21 – 27.

26. Borowski G., Smirnov Y. D., Ivanov A. V., Danilov A. S. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2345 – 2356. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

27. Забурдяев В. С., Подображин С. Н., Скатов В. В. Шахтный метан и угольная пыль: формирование взрывоопасных ситуаций // *Безопасность труда в промышленности*. – 2016. – № 2. – С. 42 – 46.

28. Biliaiev M. M., Karpo A. A., Yakubovska Z. M. Reducing the intensity of takeaway pulverized coal by using special solution // *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2017, no. 2(68), pp. 8 – 15. DOI: 10.15802/stp2017/99742.

29. Гончаров Е. В., Цирель С. В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метано-притоков при скважинных методах дегазации // *Записки Горного института*. – 2016. – Т. 222. – С. 803 – 808.

30. Колесниченко И. Е., Артемьев В. Б., Колесниченко Е. А. Обоснование энергетического показателя взрывоопасности пластов и взрывоопасных концентраций угольной пыли в горных выработках // *Промышленная безопасность*. – 2016. – № 2. – С. 32 – 35.

31. Литвишков Ю. Н. О физическом смысле параметров уравнения Аррениуса // *Kimya Problemleri*. 2019. – № 3. – С. 28 – 37.

32. Мустафин М. Г. Моделирование геомеханического состояния массива горных пород при добыче метана из угольных пластов // *Записки Горного института*. – 2015. – Т. 216. – С. 57 – 61.

33. Liu Y., Zhang C., Zhang Y. Evolution mechanism of methane adsorption capacity in vitrinite-rich coal during coalification // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021, vol. 96, no. 1, pp. 104 – 107. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104307.

34. Поздняков Г. А., Диколенко Е. Я., Мясников С. В. К вопросу об эффективности пылевзрывозащиты горных выработок угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 45–48.

35. Голынец О. С., Сергеева А. С., Никонова Т. А., Эпштейн С. А. Перспективы применения инфракрасных термогравиметрических влагомеров для определения общей влаги твердого минерального топлива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S60-2. – С. 118–129. **МИАБ**

REFERENCES

1. Kornev A. V., Korneva M. V., Safina A. M. The role of the dust factor in ensuring industrial safety and labor protection at enterprises of the coal mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S60-2, pp. 322–334. [In Russ].

2. Korshunov G. I., Spitsyn A. A., Bazhenova V. A. Development of a method to reduce the release of respirable dust fraction into the atmosphere at the expense of reclamation of dust sources. *Occupational Safety in Industry*. 2022, no. 6, pp. 27–32. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-27-32.

3. Smirnyakov V. V., Rodionov V. A., Smirnyakova V. V., Orlov F. A. Effect of shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 71–81. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

4. Meshkov G. B., Petrenko I. E., Gubanov D. A. Results of the work of the coal industry of Russia for January – March 2023. *Ugol'*. 2023, no. 6, pp. 5–12. [In Russ].

5. Astafurov N. A. Coal transportation in Russia. *Scientific forum. Siberia*. 2015, no. 1, pp. 84–85. [In Russ].

6. Khokholov Yu. A., Gavrilov V. L., Fedorov V. I. Mathematical modeling of heat-exchange processes of frozen coal storage in open warehouses. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 6, pp. 172–182. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPR-PI20190617.

7. Romanchenko S. B., Naganovsky Y. K., Kornev A. V. Innovative ways of controlling dust explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 927–936. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14

8. Moskovaya I. V., Lazareva L. P. Analysis of the efficiency of wind-dust shields application at open warehouses of coal terminals. *Eurasian Union of Scientists*. 2015, no. 6-2 (15), pp. 140–144. [In Russ].

9. Almukhametova S. G. Transition of open coal warehouses to closed ones as a solution to the problem of dust emissions into the environment. *Materialy XIX molodezhnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proceedings of the XIX youth international scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists], Saint-Petersburg, 2020, pp. 25–28. [In Russ].

10. Zubov V. P., Golubev D. D. Prospects of using modern technological solutions for mining flat coal seams taking into account the danger of formation of pockets of self-ignition. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 534–541. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6.

11. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Y. G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617–622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

12. Kornev A. V., Spitsyn A. A., Korshunov G. I., Bazhenova V. A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 133–149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.

13. Rodionov V. A., Tsygankov V. D., Zhikharev S. Ya., Kormshchikov D. S. Research procedure for coal dust aerodynamics in long roadways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 69–79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69.

14. Smirnov V. G., Manakov A. Y., Dyrdin V. V. Activation energy of decomposition and formation of methane hydrates in pores of natural coal. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014, pp. 24–28. [In Russ].
15. Vasilenko T. A., Kirillov A. K., Shazhko Y. V., Voloshina N. I. Scaling representation of methane desorption from natural sorbent. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*. 2007, vol. 17, no. 4, pp. 91–99. [In Russ].
16. Demchenko V. B., Kolesnikov V. G. Studies of gravitational stratification of a methane-air mixture. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2001. Symposium «Miner's Week», pp. 1–3. [In Russ].
17. Gaidarov B. A. Review of the main characteristics of the experimental methods for measuring the methane diffusion coefficient of coal seams. *Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, RAS*. 2022, no. 4(91), pp. 24–31. [In Russ]. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-24-31.
18. Qing-Wei Li, Yang Xiao, Cai-Ping Wang, Jun Deng, Chi-Min Shu Thermokinetic characteristics of coal spontaneous combustion based on thermogravimetric analysis. *Fuel*. 2019, vol. 250, pp. 235–244. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.003.
19. Usenbekov M. S., Isabek T. K., Polchin A. I., Zhumabekova A. E. Methane emission dynamics in mining in zones of geological faults. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 141–151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_141.
20. 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, no. 2, pp. 1917–1929.
21. Sikarev S. S., Adamov E. I., Smirnov S. G., Lipatov I. V., Lyudmilin M. M. Development of a mathematical model of behavior of air flows in the territory of open port coal warehouses. *Russian Journal of Water Transport*. 2020, no. 62, pp. 20–26. DOI: 10.37890/jwt.vi62.37.
22. Starikov G. P., Yurchenko V. M., Melnik T. N., Khudolei O. G., Kravchenko A. V. Activation of methane diffusion in coal under the influence of changing mechanical and thermodynamic parameters of the formation. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*. 2019, no. 3, pp. 122–130. [In Russ].
23. Shaposhnik V. A. Activation energies of ion-exchange processes. *Sorption and Chromatographic Processes*. 2022, vol. 22, no. 5, pp. 622–629. [In Russ]. DOI: 10.17308/sorp-chrom.2022.22/10683.
24. Gigrin A. V., Pozdniakov G. A., Novoseltsev A. I. Prevention and localization of gas and dust explosions in coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2009, no. 4, pp. 22–26. [In Russ].
25. Mukhanov A., Mostepanov E., Ilchenko G. Industrial safety of coal industry. *Ergonadzor*. 2015, no. 10, pp. 21–27. [In Russ].
26. Borowski G., Smirnov Y. D., Ivanov A. V., Danilov A. S. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2345–2356. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.
27. Zaburdyayev V. S., Podobrazhin S. N., Skatov V. V. Mine methane and coal dust: the formation of explosive situations. *Occupational Safety in Industry*. 2016, no. 2, pp. 42–46. [In Russ].
28. Biliaiev M. M., Karpo A. A., Yakubovska Z. M. Reducing the intensity of takeaway pulverized coal by using special solution. *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2017, no. 2(68), pp. 8–15. DOI: 10.15802/stp2017/99742.
29. Goncharov E. V., Tsirel S. V. Geodynamic methods for assessing the methane distribution in coal deposits and measures for the intensification of methane flow during borehole degassing methods. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 222, pp. 803–808. [In Russ].

30. Kolesnichenko I. E., Artemiev V. B., Kolesnichenko E. A. Justification of energy indicator of formation explosiveness and explosive concentrations of coal dust in mine workings. *Promyshlennaya bezopasnost'*. 2016, no. 2, pp. 32 – 35. [In Russ].

31. Litvishkov Yu. N. On the physical meaning of the parameters of the Arrhenius equation. *Kimiya Problemleri*. 2019, no. 3, pp. 28 – 37. [In Russ].

32. Mustafin M. G. Modeling of the geomechanical state of the rock mass during methane extraction from coal seams. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 216, pp. 57 – 61. [In Russ].

33. Liu Y., Zhang C., Zhang Y. Evolution mechanism of methane adsorption capacity in vitrinite-rich coal during coalification. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021, vol. 96, no. 1, pp. 104 – 107. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104307.

34. Pozdnyakov G. A., Dikolenko E. Y., Myasnikov S. V. On the effectiveness of dust and explosion protection of mine workings of coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2012, no. 12, pp. 45 – 48. [In Russ].

35. Golynets O. S., Sergeeva A. S., Nikonova T. A., Epstein S. A. Prospects of infrared thermogravimetric moisture meters to determine the total moisture of solid mineral fuels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S60-2, pp. 118 – 129. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гендлер Семен Григорьевич¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Sgendler@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7721-7246,

Василенко Татьяна Анатольевна¹ – д-р техн. наук,
главный научный сотрудник,

e-mail: tvasilenko@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4290-1520,

Степанцова Анастасия Юрьевна¹ – аспирант,

e-mail: s215060@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5027-4742,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Степанцова А.Ю., e-mail: s215060@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.G. Gendler¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: Sgendler@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7721-7246,

T.A. Vasilenko¹, Dr. Sci. (Eng.),

Chief Researcher,

e-mail: tvasilenko@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4290-1520,

A.Yu. Stepanцова¹, Graduate Student,

e-mail: s215060@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5027-4742,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A. Yu. Stepanцова, e-mail: s215060@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 06.04.2023; получена после рецензии 07.08.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 06.04.2023; received after the review 07.08.2023; accepted for printing 10.08.2023.