

Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-72-76>

ФИЛИН А.Э.

Доктор техн. наук,
профессор кафедры НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: aleks_filin@bk.ru

ТЕРТЫЧНАЯ С.В.

Канд. техн. наук,
старший преподаватель кафедры
НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: tertychnaia.sv@misis.ru

КУРНОСОВ И.Ю.

Ассистент кафедры
НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: kurnosovilya@yandex.ru

КОЛЕСНИКОВА Л.А.

Канд. экон. наук,
доцент кафедры НИТУ МИСИС,
ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г.В. Плеханова»,
117997, г. Москва, Россия,
e-mail: luzu@yandex.ru

Совершенствование параметров пылеосаждения в угольных шахтах, влияющих на обеспечение аэрологической безопасности, является актуальной задачей. В настоящей статье описана математическая модель процесса осаждения угольной пыли рабочей зоны горных выработок горнодобывающего производства. Математическое моделирование процесса переноса пыли согласовывалось с экспериментом по осаждению пылинок угольной пыли дисперсностью до 40 мкм в воздухе лабораторного стенда объемом 1 м³. Благодаря построенной модели перемещения частицы пыли можно исследовать поведение частиц различной природы при введении определенных параметров, таких как плотность частицы, диаметр, ее молярная масса и дисперсность.

Ключевые слова: пыль, математическое моделирование, массоперенос, импульс молекулы газа, движение молекул пыли, время и скорость осаждения пыли.

Для цитирования: Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах / А.Э. Филин, С.В. Тертычная, И.Ю. Курносов и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение и совершенствование параметров пылеосаждения рабочей зоны в горных выработках являются актуальнейшей задачей для безопасного функционирования горнодобывающего производства [1, 2]. В настоящее время существует достаточно большое количество методов пылеосаждения, однако не всегда эти методы обеспечивают требуемый результат [3]. Одним из перспективных методов пылеосаждения может быть применение пульсирующей вентиляции в паре с жидкостным орошением [4].

Поскольку описанный выше метод на сегодняшний день не получил научного подтверждения своей эффективности, необходимо провести ряд экспериментов. Для достижения желаемого результата требуется путем математического моделирования найти подходящие параметры среды, необходимые для выполнения поставленной задачи пылеосаждения [5, 6].

Предложенное описание по осаждению пыли посредством орошения предваряет исследования вентиляции с применением пульсирующей вентиляции и предполагает достаточно емкий набор экспериментов, в связи с чем было принято решение в дальнейшем разделить его на части. В первой части эксперимента бу-

дет проведен эксперимент по осаждению пыли [7]. Исходя из проведенных экспериментов по осаждению пыли угольных шахт, определены ключевые параметры поведения пыли в воздухе рабочей зоны [8]. К таким параметрам относятся время осаждения, масса частички пыли в навеске, используемой при проведении эксперимента, вероятность нахождения требуемой массы в 1 г исследуемой пробы, температура и влажность исследуемой среды [9, 10, 11].

Для подтверждения достоверности результатов эксперимента по осаждению пыли требовалось математически описать поведение пылинки в 1 м³ воздуха согласно полученным экспериментальным данным. Для этого была разработана математическая модель, учитывающая описанные выше ключевые параметры. Построенная математическая модель основана на описании процессов поведения молекулы газа при соударении о стенку пылинки, падении пылинки, обтекаемой молекулами воздуха, и импульсе, передаваемом стенке молекулой газа.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПАДЕНИЯ ПЫЛИНКИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Значения времени осаждения пыли, полученные эмпирическим путем в установке по осаждению пыли, были сведены в табл. 1. На основе этих экспериментальных значений времени будет формироваться математическая модель осаждения пылинки в воздухе лабораторного стенда [12, 13].

Пусть молекула газа массой m_m падает на стенку площадью S со скоростью $\vec{\vartheta}$ [14]. Удар молекулы о стенку сосуда будем считать абсолютно упругим. При этом изменяется только компонента скорости ϑ_x , нормальная к стенке, а компоненты скорости ϑ_y и ϑ_z остаются неизменными, так как они параллельны стенке (см. рисунок).

Импульс, передаваемый стенке молекулой, равен изменению импульса молекулы, его можно записать следующей формулой [15]:

$$\Delta p = m_m(\vartheta_x + 2u) - (-m_m \vartheta_x) = 2m_m(\vartheta_x + u).$$

Для движения стенки в обратном направлении:

$$\Delta p = m_m(\vartheta_x - 2u) - (-m_m \vartheta_x) = 2m_m(\vartheta_x - u).$$

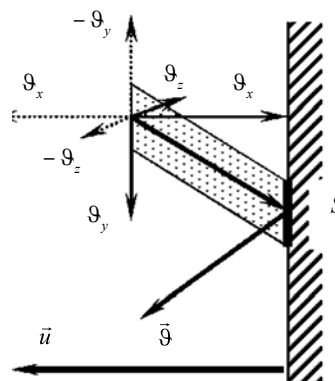


Схема взаимодействия молекулы воздуха, со стенкой сосуда: m_m – масса молекулы газа, g ; S – площадь стенки, м²; $\vec{\vartheta}$ – скорость падения молекулы газа на стенку, м/с; $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ – компоненты скорости падения, м/с; u – скорость частицы, м/с

Schematic representation of an air molecule interaction with the vessel wall: m_m – mass of the gas molecule, g ; S – the vessel wall area, м²; $\vec{\vartheta}$ – the gas molecule fall velocity on the wall, м/с; $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ – components of fall velocity, м/с; u – particle velocity, м/с

Импульс, передаваемый стенке всеми молекулами, движущимися в данном направлении со скоростью $\vec{\vartheta}$, будет равен произведению изменения импульса одной молекулы на число всех молекул.

За время Δt о площадку S могут удариться только те молекулы, которые движутся со скоростью $\vec{\vartheta}$ внутри цилиндра с площадью основания S и высотой, равной $\vartheta_x \Delta t$:

$$N_g = n_g S \vartheta_x \Delta t,$$

где n_g – число молекул в единице объема, обладающих скоростью $\vec{\vartheta}$.

В связи с тем, что молекулы в сосуде имеют любые по величине и направлению скорости, отсортируем их все по величине составляющей скорости ϑ_x . Предположим, что в единице объема газа содержится n_x молекул с составляющей скорости ϑ_{x1} , n_2 – с составляющей скорости и т. д. В силу равной вероятности всех направлений движения молекул можно считать, что если n_1 молекул в единице объема обладают составляющей скорости ϑ_{x1} , то точ-

Таблица 1

Значения времени осаждения при проведении 10 экспериментов по осаждению угольной пыли в лабораторном стенде

Deposition time values obtained in 10 tests of coal dust deposition using a laboratory bench

| № | Масса навески, г | Время (с) осаждения до 0,1 (ПДК) мг/м ³ , с |
|----|------------------|--|
| 1 | 5,08 | 300 |
| 2 | 5,04 | 156 |
| 3 | 5,02 | 873 |
| 4 | 5,02 | 1638 |
| 5 | 5,02 | 679 |
| 6 | 5,03 | 1660 |
| 7 | 5,02 | 597 |
| 8 | 5,04 | 215 |
| 9 | 5,03 | 463 |
| 10 | 5,03 | 1695 |

но такое же количество молекул n_1 должно обладать составляющей скорости $(-v_{x1})$, $n_2 - (-v_{x2})$ т. д.

Очевидно, полное число молекул в единице объема, обладающих составляющими скорости v_{x1}, v_{x2}, \dots , равно:

$$n = 2(n_1 + n_2 + \dots).$$

Молекулы с составляющей скорости v_{x1} передают стенке S за время Δt импульс, равный:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 2m_m(v_{x1} + 2u)n_1S(v_{x1} + u)\Delta t = \\ &= 2m_m n_1(v_{x1} + u)^2 S \Delta t. \end{aligned}$$

Молекулы с составляющей скорости v_{x2} передают стенке S за время Δt импульс, равный:

$$\Delta p_2 = 2m_m n_2(v_{x2} + u)^2 S \Delta t.$$

Импульс, передаваемый стенке всеми молекулами за время Δt , будет равен:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots = 2m_m[(n_1 v_{x1}^2 + n_2 v_{x2}^2 + \dots) + \\ &+ 2u(n_1 v_{x1} + n_2 v_{x2} + \dots) + (n_1 + n_2 + \dots)u^2] S \Delta t. \end{aligned} \quad (1)$$

Считая, что среднее значение квадрата составляющей скорости v_x равно:

$$\langle v_x^2 \rangle = \frac{2n_1 v_{x1}^2 + 2n_2 v_{x2}^2 + \dots}{n},$$

среднее значение составляющей скорости v_x равно:

$$\langle v_x \rangle = \frac{2n_1 v_{x1} + 2n_2 v_{x2} + \dots}{n},$$

можно записать:

$$n \langle v_x^2 \rangle = 2(n_1 v_{x1}^2 + n_2 v_{x2}^2 + \dots); n \langle v_x \rangle = 2(n_1 v_{x1} + n_2 v_{x2} + \dots).$$

Тогда полный импульс, передаваемый стенке S всеми молекулами за время Δt , будет равен:

$$\Delta p = nm_m (\langle v_x^2 \rangle + 2u \langle v_x \rangle + u^2) S \Delta t. \quad (2)$$

Этот импульс равен импульсу силы \vec{F} , действующей на стенку со стороны всех молекул:

$$\Delta p = F \Delta t.$$

Тогда давление газа на стенки сосуда будет равно:

$$p = \frac{F}{S} = nm_m (\langle v_x^2 \rangle + 2u \langle v_x \rangle + u^2).$$

Давление, создаваемое молекулами воздуха впереди частицы можно записать:

$$p = nm_m (\langle v_x^2 \rangle + 2u \langle v_x \rangle + u^2),$$

позади частицы:

$$p = nm_m (\langle v_x^2 \rangle - 2u \langle v_x \rangle + u^2).$$

Разность давлений воздуха впереди и позади пылинки (u – скорость пылинки):

$$\Delta p = 4nm_m \langle v_x \rangle u. \quad (3)$$

В силу равновероятности всех направлений движения молекул средние значения квадратов составляющих ско-

ростей по трем взаимно перпендикулярным направлениям должны быть одинаковыми:

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle.$$

Для любой молекулы среднее значение квадрата скорости равно сумме средних значений квадратов ее составляющих:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle,$$

или

$$\frac{1}{3} \langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= 4 \frac{p_a}{kT} * \frac{M}{N_a} \langle v_x \rangle u = \\ &= \frac{4p_a M}{RT} * \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3RT}{M}} * u = 4p_a \sqrt{\frac{M}{3RT}} * u. \end{aligned}$$

Следовательно, сила сопротивления будет определяться по следующей формуле:

$$F_c = \frac{\pi D^2}{4} * 4p_a \sqrt{\frac{M}{3RT}} * u, \quad (4)$$

где D – диаметр пылинки,

$$a = \frac{du}{dr} = g - \frac{6\pi D^2}{\pi D^3 \rho_{\text{угля}}} 4p_a \sqrt{\frac{M}{3RT}} * u,$$

$$\frac{du}{dr} = g - \frac{2p_a}{D \rho_{\text{угля}}} * \sqrt{\frac{3M}{RT}} * u,$$

или

$$\frac{du}{dr} + b(D)u = g,$$

параметр

$$b(D) = \frac{2p_a}{D \rho_{\text{угля}}} * \sqrt{\frac{3M}{RT}} \approx \frac{1}{D} \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (5)$$

Установившаяся скорость осаждения ($\frac{du}{dt} = 0$):

$$u^* = \frac{g}{b(D)} \approx 10D \text{ (м/с)} \quad (6)$$

и время падения

$$t^* = \frac{h}{u} \approx (10D)^{-1} \text{ (с)}. \quad (7)$$

При имеющихся порядках величин ($D \sim 10 \text{ мкм} = 10^{-5} \text{ м}$) получаем $t^* \approx 10^4 \text{ (с)}$.

При заданных параметрах: $p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$; $\rho_{\text{угля}} = 1300 \text{ кг/м}^3$; $M = 85,91 * 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $T = 296 \text{ К}$ получаем значения времени осаждения, приведенные в табл. 2.

Как следует из табл. 2, теоретическая модель хорошо согласуется с экспериментом (см. табл. 1) при размерах частиц пыли порядка 40 мкм.

Выводы

Благодаря проведенному математическому моделированию удалось вычислить разность давлений воздуха

**Значения времени осаждения пыли в зависимости
от радиуса частиц дисперсностью до 40 мкм**

Dust deposition time value as a function of radii for particles below 40 μm in size

| Радиус частиц, мкм | Время осаждения, с $t_{\text{теор}}$ |
|--------------------|--------------------------------------|
| 2,44 | $31,5 \times 10^3$ |
| 6,36 | $12,09 \times 10^3$ |
| 12,92 | $59,54 \times 10^2$ |
| 18,86 | $40,8 \times 10^2$ |
| 25,74 | $29,9 \times 10^2$ |
| 32,98 | $23,3 \times 10^2$ |
| 37,54 | $20,5 \times 10^2$ |
| 46,58 | $16,5 \times 10^2$ |

как впереди, так и позади пылинки, установившуюся скорость осаждения пылинки определенной массы и время осаждения пылинки дисперсностью до 40 мкм. Определена согласованность эксперимента с описанной в настоящей статье моделью. Значение времени осаждения пылинки, полученное эмпирическим путем, совпадает со временем осаждения, вычисленное при использовании построенной математической модели.

Таким образом, согласно описанной выше модели можно математически описать поведение пылинки в единице объема воздуха, зная плотность этой частицы, молярную массу и ее диаметр. Данная модель может применяться не только для изучения поведения частичек угольной пыли горных выработок, но и для других производств, к примеру пыли агломерационного производства металлургического комбината.

Список литературы

- Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Критерии опасности и уязвимости в структуре рангов аэрологических рисков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 10. С. 153-165. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-10-0-153.
- Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах / О.В. Скопинцева, А.С. Вертинский, С.В. Иляхин и др. // Горный журнал. 2014. № 5. С. 17-20.
- Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли / А.В. Корнев, Н.В. Ледяев, Е.И. Кабанов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6-2. С. 115-134. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-6-0-115.
- Развитие пульсирующей вентиляции в горном производстве / А.Э. Филин, Т.И. Овчинникова, О.М. Зиновьева и др. // Горный журнал. 2020. № 3. С. 67-71. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.13.
- Методы оценки смачиваемости углей растворами для пылеподавления / Е.П. Вишневецкая, А.А. Николаев, Н.Н. Добрякова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 5. С. 17-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-17-25.
- Experimental investigation on the microwettability of coal dust: considering the comprehensive effects of physical chemistry characteristics / G. Zhou, G. Luan, S. Li et al. // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15. Article 1102. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10352-7>.
- Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines / H. Han, P. Wang, R. Liu et al. // International Journal of Coal Science & Technology. 2020. Vol. 7. P. 581-596. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00329-w>.
- К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты / А.Э. Филин, И.Ю. Курносов, Л.А. Колесникова и др. // Уголь. 2022. № 9. С. 67-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.
- Effects of Metamorphic Degree of Coal on Coal Dust Wettability and Dust-Suppression Efficiency via Spraying / Pengfei Wang, Han Han, Ronghua Liu et al. // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. Article 4854391. <https://doi.org/10.1155/2020/4854391>.
- Experimental characterization of multi-nozzle atomization interference for dust reduction between hydraulic supports at a fully mechanized coal mining face / J. Wang, G. Zhou, X. Wei et al. // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. No. 10. P. 10023-10036.
- Experimental Study on the Wettability of Coal with Different Metamorphism Treated by Surfactants for Coal Dust Control / Xiaoxue Liao, Bo Wang, Liang Wang et al. // ACS Omega. 2021. Vol. 6. No 34. P. 21925-21938. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02205>.
- Calibration of the cloud and aerosol spectrometer for coal dust composition and morphology / T.L. Barone, E. Hesse, S.E. Seaman et al. // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30. Is. 9. P. 1805-1814. DOI:10.1016/j.appt.2019.05.023.
- Лабораторная установка для улавливания и концентрирования взвешенной угольной пыли / В.А. Красилова, Е.Л. Коссович, Д.И. Гаврилова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 121-130. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-6-0-121.
- Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте / А.Ю. Крайнов, О.Ю. Лукашов, К.М. Моисеева, и др. // Уголь. 2022. № 9. С. 73-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-73-78.
- Черданцев С.В., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Режимы диффузионного горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // Уголь. 2020. № 2. С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-27-32.

Original Paper

UDC 622.411.5 © A.E. Filin, S.V. Tertychnaya, I.Yu. Kurnosov, L.A. Kolesnikova, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 5, pp. 72-76
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-72-76>

Title MATHEMATICAL MODELING OF MASS TRANSFER IN COLLOIDAL SYSTEMS

Authors

Filin A.E.¹, Tertychnaya S.V.¹, Kurnosov I.Yu.¹, Kolesnikova L.A.^{1,2}

¹ Federal National Independent Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology MISIS" (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, 117997, Russian Federation

Authors Information

Filin A.E., Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: aleks_filin@bk.ru;

Tertychnaya S.V., PhD (Engineerin), Senior lecturer,

e-mail: tertychnaia.sv@misis.ru;

Kurnosov I.Yu., Department assistant, e-mail: kurnosovilya@yandex.ru;

Kolesnikova L.A., PhD (Economic), Associate professor,

e-mail: luzu@yandex.ru

Abstract

Improving the parameters of dust settling in coal mines, which affect the provision of aerological safety, is an urgent task. This article describes a mathematical model of the deposition of coal dust in the working area of mine workings. Mathematical modeling is based on part of the experiment on dust deposition by pulsed ventilation, together with spraying of liquid aerosol of dusty air, namely the experiment on deposition of coal dust particles with dispersion up to 40 microns in the air of the laboratory bench of volume 1 m³. The mathematical model described in this paper is the underlying model. Other parts of mathematical description related to the deposition of dust by irrigation and using the pulse ventilation will be based on this model. Also, due to the built model of dust particle behavior it is possible to investigate the behavior of particles of different nature by introduction of certain parameters such as particle density, its molar mass and dispersity.

Keywords

Dust, Mathematical modeling, Mass transfer, Momentum of a gas molecule, Motion of dust molecules, Time and speed of dust deposition.

References

1. Balovtsev S.V. & Skopintseva O.V. Hazard and vulnerability criteria in the rank structure of aerological risks in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022; (10): 153-165. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-10-0-153.
2. Skopintseva O.V., Vertinskiy A.S., Ilyakhin S.V., Savelev D.I. & Prokopovich A.Yu. Substantiation of efficient parameters of dust-controlling processing of coal massif in mines. *Gornyi Zhurnal*, 2014, (5), pp. 17-20. (In Russ.).
3. Kornev A.V., Ledyayev N.V., Kabanov E.I. & Korneva M.V. Estimation of predictive dust content in the faces of coal mines taking into account the peculiarities of the wettability of coal dust. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022; (6-2): 115-134. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-62-0-115.
4. Filin A.E., Ovchinnikova T.I., Zinovieva O.M. & Merkulova A.M. Advance of pulsating ventilation in mining. *Gornyi Zhurnal*, 2020, (3), pp. 67-71. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2020.03.13.
5. Vishnevskaya E.P., Nikolayev A.A., Dobryakova N.N. & Bannikov A.A. Methods for assessing the wettability of coal with dust suppression solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020; (5): 17-25. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-17-25.
6. Zhou G., Luan G., Li S., Liu Zh., Zhang Qi & Miao Ya. Experimental investigation on the microwettability of coal dust: considering the comprehensive effects of physical chemistry characteristics. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, (15), article 1102. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10352-7>.

7. Han H., Wang P., Liu R. & Tian Ch. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, (7), pp. 581-596. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00329-w>.

8. Filin A.E., Kurnosov I.Yu., Kolesnikova L.A., Ovchinnikova T.I. & Kolesnikov A.S. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'*, 2022, (9), pp. 67-72. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

9. Pengfei Wang, Han Han, Ronghua Liu, Yongjun Li & Xuanhao Tan. Effects of Metamorphic Degree of Coal on Coal Dust Wettability and Dust-Suppression Efficiency via Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, (2020), article 4854391. <https://doi.org/10.1155/2020/4854391>.

10. Wang J., Zhou G., Wei X. & Wang S. Experimental characterization of multi-nozzle atomization interference for dust reduction between hydraulic supports at a fully mechanized coal mining face. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, Vol. 26, (10), pp. 10023-10036.

11. Xiaoxue Liao, Bo Wang, Liang Wang, Jintuo Zhu, Peng Chu, Zibin Zhu & Siwen Zheng. Experimental Study on the Wettability of Coal with Different Metamorphism Treated by Surfactants for Coal Dust Control. *ACS Omega*, 2021, 6 (34), 21925-21938. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02205>.

12. Barone T.L., Hesse E., Seaman S.E., Baran A.J., Beck T.W., Harris M.L., Jaques P.A., Lee T. & Mischler S.E. Calibration of the cloud and aerosol spectrometer for coal dust composition and morphology. *Advanced Powder Technology*, 2019, Vol. 30, (9), pp. 1805-1814. DOI:10.1016/j.apt.2019.05.023.

13. Krasilova V.A., Kossovich E.L., Gavrilova D.I. & Kozyrev M.M. Laboratory installation for collection and concentration of airborne coal dust. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022; (6): 121-130. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-6-0-121.

14. Kraynov A.Yu., Lukashov O.Yu., Moiseeva K.M. & Kolegov G.A. Effect of coal dust combustion on shockwave intensity of a methane explosion in an underground mine. *Ugol'*, 2022, (9), pp. 73-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-73-78.

15. Cherdantsev S.V., Filatov Yu.M. & Shlapakov P.A. Modes of diffusion combustion of fine dust-gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings. *Ugol'*, 2020, (2), pp. 27-32. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-27-32.

For citation

Filin A.E., Tertychnaya S.V., Kurnosov I.Yu. & Kolesnikova L.A. Mathematical modeling of mass transfer in colloidal systems. *Ugol'*, 2023, (5), pp. 72-76. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.

Paper info

Received March 3, 2023

Reviewed March 15, 2023

Accepted April 27, 2023