

Научная статья

УДК 532.529

doi: 10.17223/19988621/94/9

Математическое моделирование термоаэросепарации аэрозоля в шахтных печах сушки рудных материалов

Рустам Гумарович Ахметов¹, Герман Петрович Дылдин²,
Владимир Николаевич Макаров³, Николай Владимирович Макаров⁴

¹ АО «Костанайские минералы», Житикара, Казахстан

^{2,3,4} Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

¹ info@km.kz

² German.Dyldin@yandex.ru

³ uk.intelnedra@gmail.com

⁴ mnikolay84@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель термоаэрационной сепарации частиц пыли в сушиле печи в зависимости от параметров теплоносителя и сепаратора, а также формат компьютерного анализа параметров аэрозоля в процессе сепарации. Установлена доминанта экологической эффективности шахтных печей. Верификация математической и компьютерной моделей сепарации двухфазной среды в сушиле подтвердила повышение экологической эффективности печи на 62%, снижение концентрации пыли на выходе в 2,6 раза с доверительной вероятностью 0,95 при погрешности 11%. **Ключевые слова:** термоаэросепарация, экологическая эффективность, аэрозоль, входной коллектор, критерий Стокса, критерий Фруда, пылесадительная камера

Для цитирования: Ахметов Р.Г., Дылдин Г.П., Макаров В.Н., Макаров Н.В. Математическое моделирование термоаэросепарации аэрозоля в шахтных печах сушки рудных материалов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 94. С. 109–123. doi: 10.17223/19988621/94/9

Original article

Mathematical modeling of the aerosol thermoaeroseparation in shaft furnaces for drying ore materials

Rustam G. Akhmetov¹, German P. Dyldin²,
Vladimir N. Makarov³, Nikolay V. Makarov⁴

¹ JSC “Kostanay Minerals”, Zhitikara, Kazakhstan

^{2,3,4} Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

¹ info@km.kz

² German.Dyldin@yandex.ru

³ ur.intelnedra@mail.com

⁴ mnikolay84@mail.ru

Abstract. This paper considers dust thermoaeroseparation mechanics directly in a vertical shaft drying furnace (VSDF) to substantiate an innovative technology for improving

the efficiency of dust collection and develop a methodology for creating environmentally efficient furnaces.

The novelty of theoretical studies on the two-phase medium separation in a VSDF is based on a scientifically proven hypothesis about the dominant effect on the VSDF ecological efficiency of the aerosol parameters determining the quality of dust collection: concentration, median size, dispersion, temperature, and humidity of dust at the furnace outlet. The proposed hypothesis is adequate to the nature-like commensurability of the drying process with the feedback drying of suspended aerosol particles to the parameters providing maximum dust collection efficiency.

The mathematical model of thermoaeroseparation in the VSDF is verified in JSC "Kostanay Minerals". The results confirm an increase in the ecological efficiency of the furnace by 62 % with a confidence level of 0.95 and an error of less than 11 %. Thus, the obtained data can be considered when modernizing shaft furnaces to improve their environmental efficiency.

Keywords: thermoaeroseparation, environmental efficiency, aerosol, inlet collector, Stokes forces, Froude criterion, dust-collecting chamber

For citation: Akhmetov, R.G., Dyldin, G.P., Makarov, V.N., Makarov, N.V. (2025) Mathematical modeling of the aerosol thermoaeroseparation in shaft furnaces for drying ore materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 94. pp. 109–123. doi: 10.17223/19988621/94/9

Введение

Актуальность задачи повышения энергоэффективности пылеулавливания обусловлена постоянным ростом затрат на снижение экологической нагрузки на окружающую среду, составляющих в настоящее время не менее 5% в структуре ВВП РФ.

Снижение запыленности может быть обеспечено заменой капиталоемких систем аспирации на энергосберегающие и экологически эффективные устройства, встраиваемые непосредственно в сушила печей [1–3].

Оптимизация дисперсного состава и физических параметров пыли в процессе сушки рудных материалов, снижение концентрации мелкодисперсных частиц аэрозоля на выходе в газоходы повышают экологическую эффективность непосредственно печи, способствуют улучшению работы пылегазоулавливающего оборудования, обеспечивая рост энергоэффективности процесса сушки и качества готового продукта [4–6].

Известные методы расчета параметров пылеулавливающих устройств, математического моделирования физических процессов в двухфазных средах, в том числе на базе инженерного компьютерного анализа, не исследуют процессы пылеобразования непосредственно в сушильной печи [7–9].

Объектом и предметом исследований статьи являются вертикальная шахтная сушильная печь (ВШСП) и использование механизма аэротермодинамических процессов сепарации пыли в ее сушиле для повышения экологической эффективности, т.е. минимизации запыленности газового потока, снижения негативной нагрузки на окружающую среду.

Постановка задачи

Цель данной исследовательской работы – создание математической модели определения минимального диаметра сепарируемых частиц пыли непосредственно в процессе сушки рудных материалов в ВШСП и формата компьютерного

моделирования аэротермодинамических процессов. Несмотря на сложность и многофакторность термодинамических процессов в сушиле печи, учитывая, что конечной целью является инерционная сепарация и связанное с ней время движения частиц пыли в сепараторе, в работе использована линейная модель уравнений Стокса с временным параметром релаксации и термического баланса для тонких частиц пыли. Минимальный диаметр улавливаемых частиц пыли при заданном гранулометрическом составе рудного материала фактически определяет их концентрацию в аэрозоле на выходе из печи, т.е. ее экологическую эффективность. Моделирование и эксперименты по термосепарации частиц пыли рудного материала осуществлялись во встроенном в сушило печи запатентованном воздушном инерционно-гравитационном противоточно-поворотном сепараторе [10]. Проводились расчет температуры, концентрации частиц пыли и теплоносителя в сепараторе печи и на выходе из нее, компьютерный анализ, а также верификация полученных результатов по итогам промышленных испытаний в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы». При этом на первом этапе по результатам промышленных испытаний показана актуальность сепарации частиц пыли непосредственно в печи, поскольку было доказано, что печь является интенсивным источником дополнительного пылеобразования в процессе сушки [10–12].

Для компьютерного анализа двухфазного течения, состоящего из теплоносителя и частиц пыли, в работе использована модель на базе уравнений Эйлера и Лагранжа, позволяющая исследовать траектории движения частиц пыли в форме Discrete Phase Model (ДРМ) [12, 13].

Новизна теоретических исследований сепарации двухфазной среды в ВСШП базируется на идее о существенном влиянии физико-химических характеристик теплоносителя и частиц пыли, термоаэродинамических параметров аэрозоля, которые коррелируют с геометрическими параметрами сепаратора, на энергоэффективность улавливания пыли, снижение экологической нагрузки на внешнюю систему пылеулавливания. Данная идея отражает принцип природоподобия, обуславливающий необходимость непрерывной обратной связи процесса досушивания взвешенных частиц аэрозоля до требуемой влажности, температуры и концентрации на выходе из сушила, при которых обеспечивается максимальная эффективность пылеулавливания [3, 10].

Результаты исследований

Комплексные исследования процесса термосепарации аэрозоля в ВСШП включали в себя два этапа. На первом этапе были проведены промышленные испытания в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы» по определению фактической корреляции параметров сушки в двухфазной среде с геометрией сушила. На втором этапе была построена математическая модель термоаэросепарации с учетом установленных в процессе испытаний закономерностей сепарации, проведены компьютерный анализ на базе Ansys-Fluent в модели ДРМ с учетом однонаправленного влияния теплоносителя на частицы руды и определение погрешности полученных результатов для оценки возможности использования в инженерных расчетах сепараторов, встраиваемых в сушило печей.

На рис. 1 представлены данные экспериментов по определению корреляции между медианным диаметром d_m , дисперсией σ_d взвешенных частиц исходной руды, подачей теплоносителя Q и коэффициентом пылевыведения $k_{пв}$, а также

фотографии рентгеноспектрального микроанализа асбестовой пыли в разгрузочном и загрузочном устройствах печи.

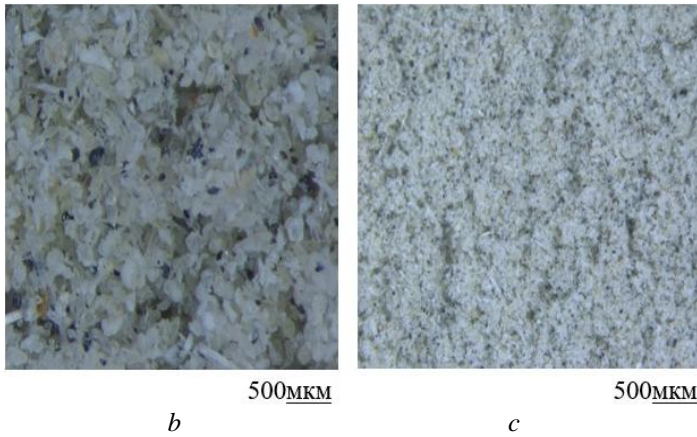
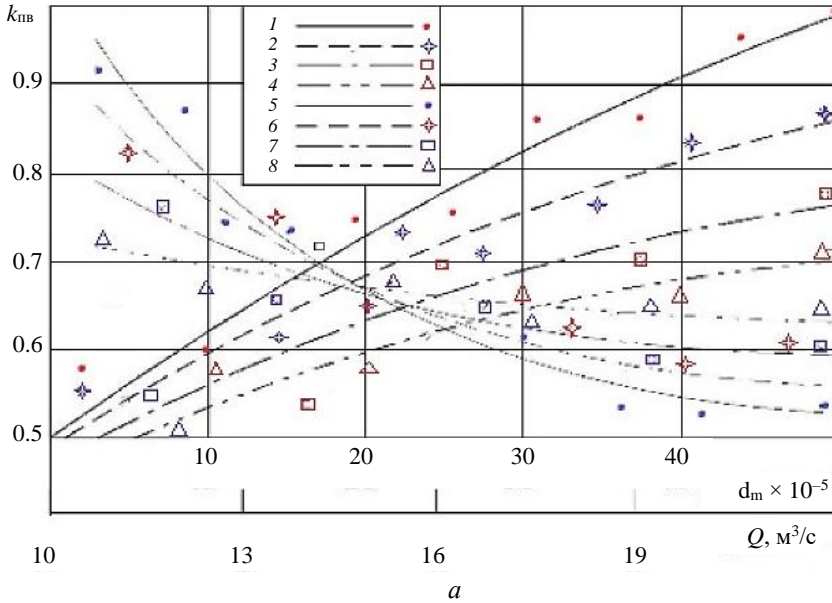


Рис. 1. (a) Зависимости коэффициента пылевыведения печи от медианного диаметра пыли при $Q = 15 \text{ м}^3/\text{с}$: 1 – $\sigma_d = \pm 0.1d_m$; 2 – $\sigma_d = \pm 0.2d_m$; 3 – $\sigma_d = \pm 0.3d_m$; 4 – $\sigma_d = \pm 0.4d_m$; и подачи теплоносителя при $\sigma_d = \pm 0.15d_m$: 5 – $d_m = 10^{-4} \text{ м}$; 6 – $d_m = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; 7 – $d_m = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; 8 – $d_m = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;

Фотографии хризотил асбестовой пыли при 56-кратном увеличении:
(b) в разгрузочном устройстве; (c) в загрузочном устройстве

Fig. 1. (a) Dust emission coefficient of the vertical shaft drying furnace (VSDf) as a function of the median dust diameter at $Q = 15 \text{ m}^3/\text{c}$ for $\sigma_d = (1) \pm 0.1d_m$; (2) $\pm 0.2d_m$; (3) $\pm 0.3d_m$; (4) $\pm 0.4d_m$ and the coolant flow rate at $\sigma_d = \pm 0.15d_m$ for $d_m = (5) 10^{-4}$; (6) $2 \cdot 10^{-4}$; (7) $2.5 \cdot 10^{-4}$; and (8) $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Photos of the chrysotile-asbestos dust at 56-fold magnification in the (b) unloading and (c) loading devices

Из анализа рис. 1 видно, что с уменьшением d_m взвешенных частиц происходит заметный рост $k_{пв}$, особенно в диапазоне $d_m < 2 \cdot 10^{-4}$ м. При этом с увеличением дисперсии медианного диаметра рост $k_{пв}$ более существен. Это приводит к повышению экологической нагрузки на пылеулавливающее оборудование и требует тщательного подхода к определению и контролю гранулометрического состава исходной руды. Увеличение скорости теплоносителя в противотоке также приводит к росту $k_{пв}$, причем в большей степени для фракций с меньшим диаметром взвешенных частиц исходной руды. Полученные результаты согласуются с известным фактом о необходимости снижения аспирируемого, в том числе инжектируемого, теплоносителя и подсоса воздуха через неплотности в ВШСП для повышения экологической эффективности сушки [2, 7, 14]. Снижение скорости и расхода теплоносителя приводит к падению коэффициента пылевыделения, причем в большей степени для фракций меньшего диаметра частиц исходной руды, что подтверждает целесообразность снижения расхода теплоносителя при сохранении тепловой мощности для повышения экологической эффективности печей.

Из анализа приведенных фотографий, полученных с использованием электронного микроскопа TESCAN VEGA LMS, видно увеличение медианного диаметра, т.е. снижение степени дисперсности взвешенных частиц рудного материала, в процессе сушки. Данные исследования подтверждают фактически происходящий процесс интенсивного агрегатирования мелкодисперсных частиц пыли непосредственно в аэрозоле в процессе сушки при конвективном теплообмене за счет их столкновения, действия сил Сафмана и компрессионного сдвигания, что приводит к росту размера частиц на выходе из печи по сравнению с дисперсным составом исходной руды в загрузочном устройстве. Кроме того, указанное обусловлено тем, что мелкие частицы дробятся менее эффективно в силу меньших значений инерционных и компрессионных сил в процессе их контактов. Промышленные испытания аэротермодинамических процессов, происходящих в двухфазной среде «асбестовая пыль–газовый поток» ВШСП показали существенное влияние на температуру и влажность асбестовой пыли на выходе из нее температуры и влажности газового потока и исходной асбестовой руды в прямотоке.

Вследствие существенно более значимого влияния на частицы руды в прямотоке поверхностных аэродинамических сил, характеризующихся критерием Фруда по отношению к объемным силам инерции, определяющих критерии Стокса, Архимеда, на выход из ВШСП поступает значительно большее количество влажной асбестовой пыли низкой температуры из прямотока по отношению к более сухой высокотемпературной пыли из противотока. Дополнительно при этом повышается вероятность конденсации влаги в рукавном фильтре при прочих равных условиях [14, 15].

Для устранения причин низкой экологической эффективности печей предложено запатентованное устройство термоинерционной сепарации, встроенное в их сушило [10].

Процесс сушки сыпучего материала в ВШСП предлагаемой конструкции включает в себя 3 последовательных этапа (рис. 2). На 1-м этапе в сыпучем материале, поступающем через загрузочное устройство 1, за счет роста динамического давления, обусловленного увеличением его скорости под действием сил гравитации, происходит нарушение аутогезионных связей пылевых частиц, формирование аэродисперсной системы, т.е. пылевого аэрозоля, состоящего из пылевых частиц и теплоносителя. На 2-м этапе за счет конфузного канала 2, образованного стенками 3,

примыкающими к верхней прямоточной части сушила 4 и являющимися ее продолжением, происходит ускорение движения аэрозоля и частичное расслоение мелкодисперсных частиц материала, в том числе пыли, за счет действия на них инерционной сепарации от контакта со стенками 3, силы Стокса, обусловленной вязкостью теплоносителя, сил Магнуса, Сафмана и Кориолиса, обуславливающих криволинейное движение из верхней прямоточной части сушила 4 в нижнюю противоточную часть 5 к горизонтальному входу 6 диффузорного канала входного коллектора 7. Траектории движения пыли определяются скоростью теплоносителя, парусностью, т.е. их плотностью, диаметром, миделевым сечением. На 3-й стадии в области нижней противоточной части сушила 5 в вертикальном диффузорном канале входного коллектора 7 и пылеосадительной камере 8 в процессе аэрационной сепарации за счет динамического витания влажные частицы пыли, оседа вследствие малой парусности, т.е. большей силы гравитации по отношению к динамическому давлению аэрозоля в область повышенных температур теплоносителя в противоточной части сушила 5, отдают влагу за счет конвективного теплообмена с ним, достигают достаточной влажности и температуры, при которой их парусности достаточно для подъема по вертикальному диффузорному каналу входного коллектора 7 и пылеосадительной камере 8 на выход из печи [10, 14, 15].

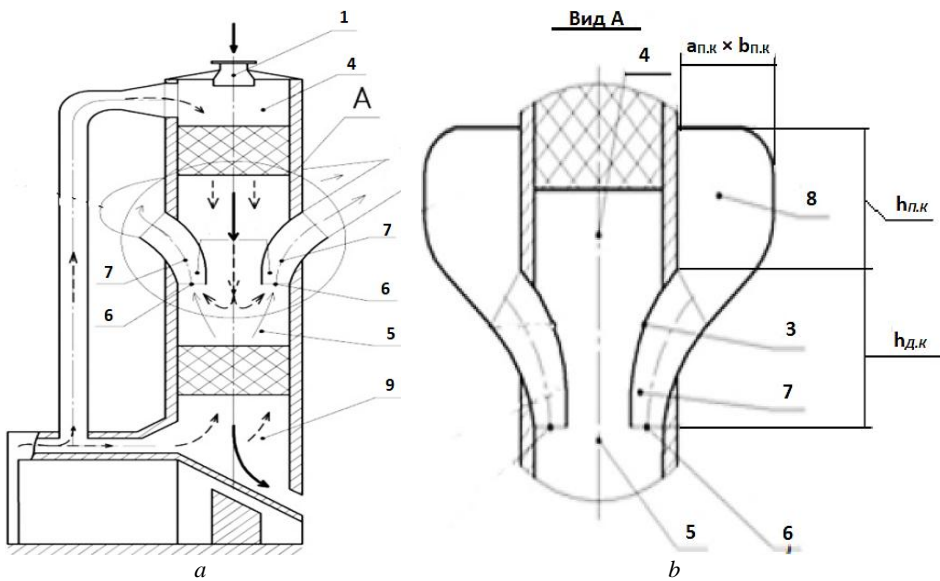


Рис. 2. Схема вертикальной шахтной сушильной печи (а);
схема устройства термоинерционной сепарации пыли (b)

Fig. 2. Design of the (a) VSDF and (b) device for thermal inertial dust separation

Парусность частиц пыли определяется их формой, размерами, физическими свойствами, а аэротермодинамические параметры прямотока и противотока зависят от их расхода, температуры, геометрии сушила, вертикального диффузорного канала входного коллектора и пылеосадительной камеры. На этом базируются математическая модель и формат компьютерного анализа с учетом результатов экспериментальных исследований для расчета параметров термоаэросепаратора и

пылеосадительной камеры, обеспечивающих вынос из сушила пыли с диаметром менее заданного, определяющего максимально допустимую концентрацию аэрозоля, поступающего на выход из печи. При этом частицы рудного материала диаметром больше выше указанного, двигаясь под действием силы гравитации в противоточной части сушила, будут поступать в устройство выгрузки 9 [16–18].

Математическая модель термоаэросепарации в виде уравнений вертикального движения частиц пыли диаметром d_i и теплового баланса для термически тонких частиц пыли при граничных условиях третьего рода, постоянной температуре теплоносителя, в том числе на входе, установившемся режиме конвективного теплообмена с постоянным коэффициентом теплоотдачи, без теплообмена с окружающей средой при малых значениях критериев Рейнольдса, Стокса и Био в термоинерционном сепараторе с учетом [16, 19, 20] может быть представлена в виде:

$$\frac{m_i dV_{bi}}{dt} = 3\pi\mu d_i k_i \cdot \left[u(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + g\tau_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] - \frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_i - \rho_r) g; \quad (1)$$

$$\frac{dT_i}{dY} = 6\Delta T_i \frac{\alpha}{\rho_i \gamma} e^{-\frac{6\alpha t_i}{\rho_i d_i \gamma}}, \quad \frac{dT_i}{dY} = 6\Delta T_i \frac{\alpha}{\rho_i \gamma} e^{-\frac{6\alpha t_i}{\rho_i d_i \gamma}}, \quad (2)$$

где $m_i = \frac{\pi d_i^3}{6} \rho_i$ – масса i -й частицы пыли, кг; μ – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с; $\tau_i = \frac{d_i^2 \cdot \rho_d}{18 \cdot \mu k_\phi}$ – время релаксации i -й частицы пыли, с; ρ_i, ρ_r – плотность частицы пыли диаметром d_i и теплоносителя соответственно кг/м³; V_{bi} – скорость i -й частицы пыли по вертикальной оси сушила, м/с; k_i – коэффициент формы i -й частицы пыли; $u(t) = \frac{Q_1 + Q_2}{S_k(h)}$ – скорость аэрозоля в инерционном сепараторе, м/с; Q_1, Q_2 – расход теплоносителя прямотока и противотока соответственно м³/с; $S_k(h)$ – площадь инерционного сепаратора, м²; $h(t)$ – текущая высота диффузорного канала входного коллектора, м; T_i, T_r – температура i -й частицы пыли и теплоносителя на входе в коллектор, К; $\Delta T_i = (T_r - T_i)$ – температурный напор между i -й частицей пыли и теплоносителем на входе в коллектор, К; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м²·К; γ – удельная теплоемкость рудного материала, Дж/кг·К; g – ускорение силы тяжести, м²/с.

Минимальный диаметр улавливаемой мелкодисперсной пыли в термоинерционном сепараторе с учетом (1), (2) после преобразования получим в виде [18]:

$$d_{min}(h) = \sqrt{\frac{18\mu k_i}{\rho_{i(h)} - \rho_r(h)} \cdot \frac{g}{\left[u(h) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + g\tau_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right]}}; \quad (3)$$

где $\rho_{i(h)} - \rho_r(h)$ – текущие плотности i -й частицы пыли и теплоносителя в функции от их положения в термоинерционном сепараторе.

Выражение скорости частицы пыли в зависимости от ее положения в термоинерционном сепараторе определяется формулой

$$u(h_i) = \frac{Q_1 + Q_2}{S_{BK} + \int_0^{h_i} D(h) dh}, \quad (4)$$

где S_{BK} – площадь входа в диффузорный канал входного коллектора, м²; $D(h)$ – локальная диффузорность термоинерционного сепаратора.

Скорость перемещения i -й частицы пыли диаметром d_i в термоинерционном сепараторе получим в виде:

$$V_{bi} = \left(g\tau_i - \frac{Q_1+Q_2}{S_{\Pi}-S_{BK}} - \frac{Q_1+Q_2}{S_{BK}+\int_0^{h_i} D(h)dh} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} - g\tau_i + \frac{Q_1+Q_2}{S_{BK}+\int_0^{h_i} D(h)dh}, \quad (5)$$

где S_{Π} – площадь сушила печи, м².

Время, в течение которого i -я частица пыли диаметром d_i достигнет высоты h_i в термоинерционном сепараторе:

$$t_i = \tau_i \cdot \ln \frac{\frac{Q_1+Q_2}{S_{BK}+\int_0^{h_i} D(h)dh} - q\tau_i}{\frac{Q_1}{S_{\Pi}-S_{BK}} + \frac{Q_1+Q_2}{S_{BK}+\int_0^{h_i} D(h)dh} - q\tau_i}. \quad (6)$$

Для обеспечения требуемых параметров температуры t_i и влажности φ_i частиц пыли и соответственно их концентрации с учетом дисперсного состава на входе в пылеосадительную камеру в соответствии с законом изменения локальной диффузорности $D(h)$ при заданном термическом напоре ΔT_i определяют необходимую высоту термоинерционного сепаратора.

Время прохождения аэрозолью пылеосадительной термокамеры определяем по формуле

$$t_{п.к.} = 0.5 \frac{h_{п.к.} \cdot a_{п.к.} \cdot b_{п.к.}}{Q_1+Q_2}, \quad (7)$$

где $a_{п.к.}$, $b_{п.к.}$ – ширина, длина, высота пылеосадительной термокамеры, м (см. рис. 2, б).

Скорость динамического витания частиц в термопылеосадительном сепараторе по мере снижения их влажности при горизонтальном перемещении к выходу из печи определяется по формуле (4) с учетом геометрических параметров термоинерционного сепаратора.

Из анализа уравнений (2)–(7) видно, что скорость, температура, влажность, время движения в термоинерционном сепараторе и, как результат, минимальный диаметр сепарируемых частиц пыли зависят от характера изменения локальной диффузорности $D(h)$ инерционного сепаратора, объема пылеосадительной камеры, параметров сушила, расхода и температуры теплоносителя.

В качестве критериев, эффективности пылеулавливания приняты коэффициенты термоаэрозионной сепарации и регуляции:

$$S_i = \frac{F_{Ai}}{\sum_{i=1}^n F_{bi}^j} = 18 \frac{\mu k_i (U_h - g \cdot \tau_i) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}})}{d_i^2 (\rho_i - \rho_r) g}; \quad (8)$$

$$S_i^T = 1 - \Delta T_i e^{-\frac{6\alpha t_i}{\rho_i d_i \gamma}}, \quad (9)$$

где F_{Ai} – приведенная сила Архимеда, включающая силы тяжести P_q и Стокса P_c , действующие на i -ю частицу пыли, н; F_{bi}^j – вертикальная составляющая j -й аэродинамической подъемной силы, действующей на i -ю частицу пыли, Н.

Интегральную и фракционную эффективность термоинерционного сепаратора с учетом логарифмического нормального закона распределения дисперсного состава пыли определяем по формуле

$$E_{TC}^{Ai} = 1 - \frac{\lg 3 \sqrt{\frac{2\mu k_i g}{[\rho_i(h) - \rho_r(h)] \left[u(h) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + g\tau_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right]}}}{\lg d_{max}}, \quad (10)$$

где d_{max} – максимальный диаметр частицы пыли, поступившей на вход в коллектор, м; Δi – фракция частиц пыли $+0 - d_{max}$.

По результатам расчета печи ВСШП № 9 ДиСхр АО «Костанайские минералы» согласно предложенной математической модели получены следующие геометрические параметры сепаратора и пылесадительной камеры, обеспечивающие минимальную концентрацию аэрозоля на выходе из печи: $d_{\min} = 85 \cdot 10^{-4}$ м; $S_{\text{БК}} = 11.5$ м²; $V_b = 1.6$ м³/с; $t_{\text{п.к.}} = 1.8$ с; $h_{\text{п.к.}} = 2.7$ м; $a_{\text{п.к.}} = 2.8$ м; $b_{\text{п.к.}} = 1.7$ м; $S_{\text{П}} = 4$ м²; $S_{\text{БК}} = 2.8$ м².

Из анализа рис. 3 с учетом (10) видно, что применение оптимально спроектированного термоинерционного сепаратора предложенной запатентованной конструкции позволяет снизить минимальный диаметр частиц пыли на выходе из печи более чем в 2 раза, тем самым повысить ее экологическую эффективность на 62%, снизив запыленность с 95 до 35 г/м³, т.е. более чем в 2,6 раза.

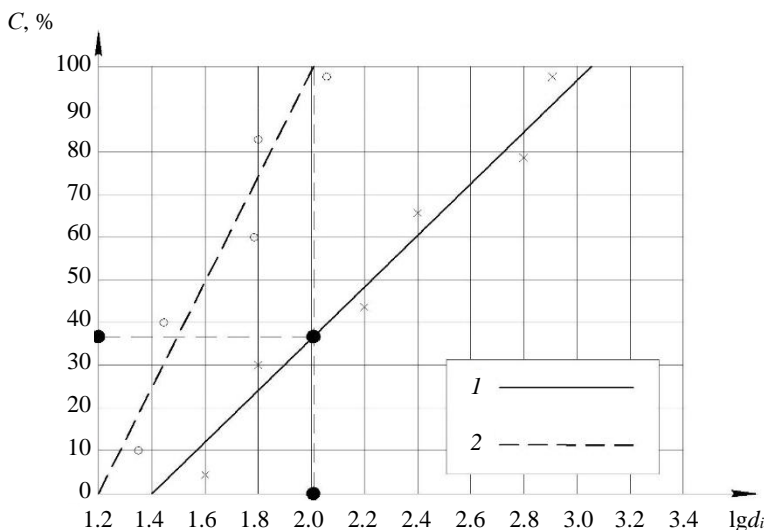


Рис. 3. Номограмма дисперсного состава асбестовой пыли на выходе из ВСШП: 1 – без термоинерционного сепаратора; 2 – с термоинерционным сепаратором
Fig. 3. Nomogram of the dispersed composition of asbestos dust at the VSDF outlet (1) without and (2) with a thermal inertial separator

Верификация построенной математической модели термоаэросепарации рудной пыли с учетом испытаний, проведенных на ВСШП № 9 ДиСхр АО «Костанайские минералы» с доверительной вероятностью 0,95 подтвердила, что ее погрешность в сравнении с экспериментальными результатами не превышает 11%.

Компьютерный анализ течения двухфазной среды в сушиле ВСШП на базе Ansys-Fluent осуществлялся при начальных условиях таких параметров, как положение, скорость, гранулометрический состав, температура частиц пыли, температура и расход теплоносителя и граничных условиях, определяемых исходной геометрией сушила. Расчет траектории движения частиц пыли проводился в стационарном режиме в условиях одностороннего сопряжения теплоносителя и частиц пыли с использованием эйлерово-лангранджевого подхода в модели дискретной фазы Discrete Phase Model (DPM). Теплоноситель моделировался на неподвижной сетке на базе эйлерова подхода, а частицы пыли моделировались на основе лангранджева подхода с помощью отслеживания их траекторий по всей расчетной

области; траектории частиц пыли определялись в заданном интервале времени по итогам расчета поля течения теплоносителя. Предложенный вариант формата DPM позволил осуществить расчет аэротермодинамических параметров теплоносителя и частиц пыли, концентрации аэрозоля в сепараторе и провести оптимизацию его топологии по критерию экологической эффективности печи [13, 15, 21].

На рис. 4, 5 приведены результаты компьютерного моделирования температуры и концентрации частиц хризотил-асбестовой пыли в области выхода из сушила ВШСП без сепаратора и с сепаратором оптимальной конструкции.

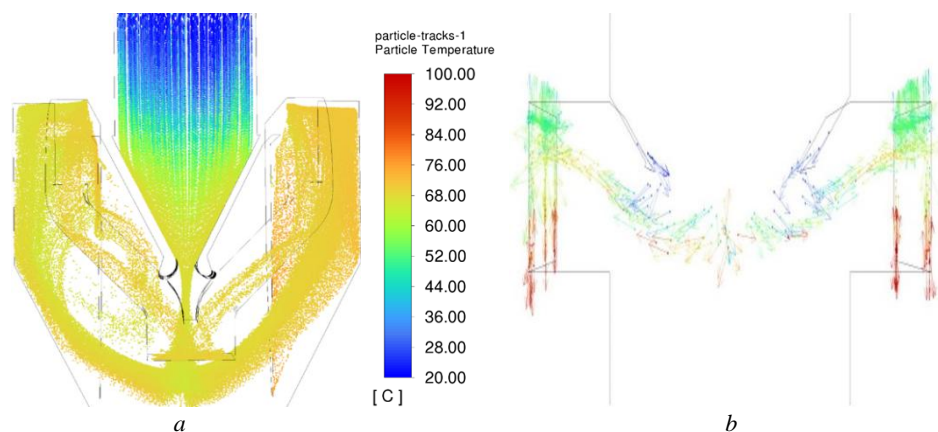


Рис. 4. Распределение по температуре частиц хризотил-асбеста фракции $(-2\ 500 + 0)$ мкм в ВШСП: *a* – с сепаратором; *b* – без сепаратора

Fig. 4. Temperature distribution of the chrysotile–asbestos particles with a fraction of $(-2\ 500 + 0)$ μm in the VSDF (*a*) with and (*b*) without a separator

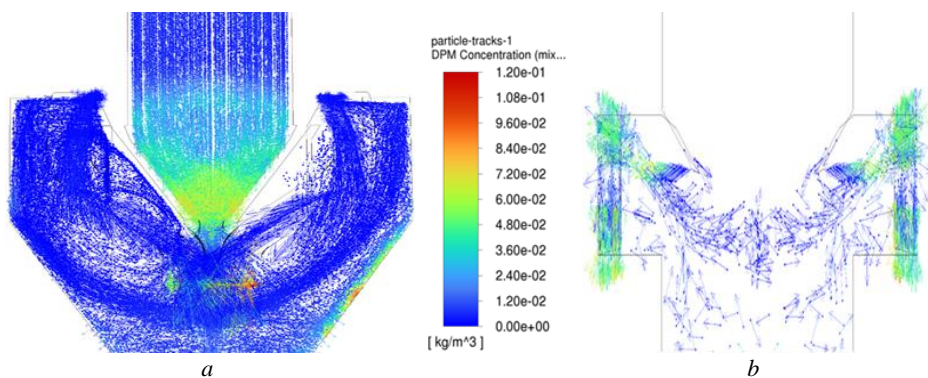


Рис. 5. Распределение по концентрации частиц хризотил-асбеста фракции $(-2\ 500 + 0)$ мкм в ВШСП: *a* – с сепаратором; *b* – без сепаратора

Fig. 5. Distribution of chrysotile–asbestos particles with a fraction of $(-2\ 500 + 0)$ μm by concentration in the VSDF (*a*) with and (*b*) without a separator

Из анализа рис. 4 видно, что в ВШСП без сепаратора температура частиц пыли в прямотоке на выходе из сушила на $30\text{--}40^\circ$ ниже температуры частиц пыли в про-

тивооке, что подтверждает результаты промышленных экспериментов и выводы о причинах низкой экологической эффективности печей.

По данным рис. 5 концентрация пыли на выходе из ВСШП без сепаратора составляет 80 г/м^3 , в то время как для ВСШП с сепаратором она не превышает 30 г/м^3 , что с погрешностью не более 11% совпадает с результатами промышленных экспериментов и математического моделирования.

Таким образом, предложенная математическая модель и компьютерный анализ аэротермодинамической сепарации в сушиле на базе модели Ansys-Fluent в формате ДРМ, несмотря на принятые упрощения по сравнению с реальными процессами сушки рудных материалов, с приемлемой для инженерных расчетов точностью могут быть использованы для проектирования термоинерционных сепараторов, встраиваемых в печь и позволяющих в 2,6 раза снизить концентрацию пыли, повысить результативность внешнего пылеулавливающего оборудования, снизить негативное влияние на окружающую среду.

Заключение

1. Экспериментальные исследования, проведенные на ВШСП АО «Костанайские минералы» подтвердили, что печи являются интенсивным источником пылеобразования, и это обосновывает необходимость учета данного факта при их проектировании.

2. Доказано существенное влияние параметров аэродинамического процесса сушки рудного материала и геометрии печи на экологическую эффективность пылеулавливания и целесообразность интеграции в сушило термоаэросепаратора.

3. Разработана математическая модель и предложен компьютерный анализ на базе модели Ansys-Fluent в формате ДРМ термоаэросепарации двухфазной среды в прямоточно-противоточном режиме движения теплоносителя, позволяющие определять геометрические параметры инерционного термоаэросепаратора и пылесадительной камеры по критерию максимальной экологической эффективности печи.

4. Верификация предложенной математической модели и формата компьютерного анализа термоаэросепарации рудной пыли в сушиле шахтной печи с достоверной вероятностью 0,95 подтвердила погрешность в сравнении с экспериментальными результатами не более 11%, что достаточно для инженерных расчетов.

5. Предложенная конструкция термоинерционного сепаратора, интегрированного в сушило печи и пылесадительной камеры, смонтированные на печи ВШСП № 9 ДиСхр АО «Костанайские минералы» в 2023 г., позволила снизить концентрацию пыли на выходе из ВШСП в 2,6 раза, повысив тем самым ее экологическую эффективность на 62%.

Список источников

1. Макаров В.Н., Давыдов С.Я. Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в технологических процессах на промышленных предприятиях // Новые огнеупоры. 2015. № 2. С. 59–63.
2. Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Мальцев В.А., Савин В.А. Сушка хризотиловой руды в вертикальных аппаратах шахтного типа // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 80–84.
3. Макаров В.Н., Ахметов Р.Г., Макаров Н.В., Арсланов А.А. Повышение экологической эффективности сушки рудных материалов на базе инерционно-гравитационной аэро-

- сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 1-1. С. 74–86. doi: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_74
4. Чистяков Я.В., Муратова К.М., Володин Н.И. Основы сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе // Экология и промышленность в России. 2016. Т. 20, № 8. С. 20–27.
 5. Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В. Исследование процесса очистки воздушных потоков от мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном аппарате пылеулавливания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 45–57.
 6. Макаров В.Н., Макаров Н.В., Угольников А.В. Оптимизация геометрических параметров гидроциклонного инерционного сепаратора Вентури // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 638–648. doi: 10.31897/PMI.2019.6.638
 7. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face // Powder Technology. 2019. V. 343. P. 754–764. doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.042.
 8. Филина В.А., Филин А.Э. Пути повышения эффективности пылеподавления орошением // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S14. С. 3–10. doi: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-3-10
 9. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Химиздат, 2005. 659 с.
 10. Пат. 281.36.45 РФ, МКИ F 04 D 17/08. Способ сушки сыпучих материалов повышения экологической эффективности шахтных печей и устройство для его осуществления / Е.С. Нурхожаев, Н.В. Макаров, А.А. Арсланов, и др. Заявл. 05.2023 г.; опубл. в П.И., 2024 г. № 2.
 11. Hu S., Huang Y., Feng G., Shao H., Liao Q., Gao Y., Hua F. Investigation on the design of atomization device for coal dust suppression in underground roadways // Process Safety and Environmental Protection. 2019. V. 129. P. 230–237. doi: 10.1016/j.psep.2019.07.010
 12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраев М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: URSS, 2017. 272 с.
 13. Фёдорова Н.Н., Вальсер С.А., Захарова Ю.В. Моделирование гидрогазодинамических процессов ПК ANSYS 17.0. Новосибирск: Новосиб. гос. арх.-строит. ун-т (Сибстрин), 2016. 168 с.
 14. Макаров В.Н., Ахметов Р.Г., Давыдов С.Я., Макаров Н.В. Экспериментальное исследование и моделирование экологической эффективности вертикальных шахтных печей для сушки огнеупорных и строительных материалов // Новые огнеупоры. 2023. № 7. С. 52–59.
 15. Han H., Wang P., Liu R. Experimental study on the atomization characteristics and dust reduction efficiency of four common types of pressure nozzles in underground coal mines // Int J Coal Sci Technol. 2020. V. 7 (3). P. 581–596. doi: 10.1007/s40789-020-00329-w
 16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 830 с.
 17. Zhang H., Xu Y., Han W., Wang Z. Analysis on the Development Status of Coal Mine Dust Disaster Prevention Technology in China // Journal of Healthcare Engineer. 2021. V. 2021. Art. 5574579. doi: 10.1155/2021/5574579
 18. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh. Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump – A Review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2021. V. 8. P. 49–58. doi: 10.32628/IJSRST218573
 19. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // South African Journal of Industrial Engineering November. 2021. V. 32 (3). P. 42–51. doi: 10.7166/32-3-2616

20. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Piliya D.E. Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. Is. 1. P. 84–94. doi: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84
21. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Suslov N.M., Luntsova A.I., Rabina E.I. Automation of design for dynamic loading at the designing stage of mining machinery // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1399 (3). Art. 033010. P. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010

References

1. Makarov V.N., Davydov S.Ya. (2015) Teoreticheskie osnovy povysheniya effektivnosti ventilyatsii v tekhnologicheskikh protsessakh na promyshlennykh predpriyatiyakh [Theoretical foundations for increasing the efficiency of ventilation in technological processes at industrial enterprises]. *Novye ognepory – New Refractories*. 2. pp. 59–63.
2. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Mal'tsev V.A., Savin V.A. (2016) Sushka khrizotilovoy rudy v vertikal'nykh apparatakh shakhtnogo tipa [Drying chrysotile ore in vertical shaft-type apparatuses]. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*. 8. pp. 80–84.
3. Makarov V.N., Akhmetov R.G., Makarov N.V., Arslanov A.A. (2024) Povyslenie ekologicheskoy effektivnosti sushki rudnykh materialov na baze inertsionno-gravitatsionnoy aereoseparatsii [Increasing the environmental efficiency of drying ore materials based on inertial-gravity aereoseparation]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 1-1. pp. 74–86. doi: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_74
4. Chistyakov Ya.V., Muratova K.M., Volodin N.I. (2016) Osnovy separatsii melkdispersnoy pyli v tsentrobezhno-inertsionnom pyleulovitele [Fundamentals of separation of fine dust in a centrifugal-inertial dust collector]. *Ekologiya i promyshlennost' v Rossii – Ecology and Industry of Russia*. 20(8). pp. 20–27.
5. Kalaeva S.Z., Muratova K.M., Chistyakov Ya.V. (2017) Issledovanie protsessa ochistki vozdushnykh potokov ot melkdispersnoy pyli v tsentrobezhno-inertsionnom apparate pyleulavlivaniya [Study of the process of cleaning air flows from fine dust in a centrifugal-inertial dust collection apparatus]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle – News of Tula State University. Geosciences*. 3. pp. 45–57.
6. Makarov V.N., Makarov N.V., Ugol'nikov A.V. (2019) Optimizatsiya geometricheskikh parametrov gidrotsiklonnogo inertsionnogo separatora Venturi [Optimization of geometric parameters of a hydrocyclone inertial Venturi separator.]. *Zapiski gornogo instituta – Notes of the Mining Institute*. 240. pp. 638–648. doi: 10.31897/PMI.2019.6.638
7. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. (2019) Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face. *Powder Technology*. 343. pp. 754–764. doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.042
8. Filina V. A., Filin A. E. (2020) Puti povysheniya effektivnosti pylepodavleniya orosheniem [Ways to increase the efficiency of dust suppression by irrigation]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. S14. pp. 3–10. doi: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-3-10
9. Logachev I.N., Logachev K.I. (2005) *Aerodinamicheskie osnovy aspiratsii* [Aerodynamic principles of aspiration]. Saint Petersburg: Khimizdat.
10. Nurkhozhaev E.S., Makarov N.V., Arslanov A.A., Akhmetov R.G., Balandin V.N., Makarov V.N., Novitskiy M.V., Gol'tsev V.A. (2024) *Sposob sushki sypuchikh materialov povysheniya ekologicheskoy effektivnosti shakhtnykh pechey i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for drying bulk materials to improve the environmental efficiency of shaft furnaces and a device for its implementation]. RF Patent 2813645, MKI F 04 D 17/08.

11. Hu S., Huang Y., Feng G., Shao H., Liao Q., Gao Y., Hua F. (2019) Investigation on the design of atomization device for coal dust suppression in underground roadways. *Process Safety and Environmental Protection*. 129. pp. 230–237. doi: 10.1016/j.psep.2019.07.010
12. Kaplun A.B., Morozov E.M., Shamraev M.A. (2017) *ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in hands of an engineer: a practical guide]. Moscow: URSS.
13. Fedorova N.N., Valger S.A., Zakharova Yu.V. (2016) *Modelirovanie gidrogazodinamicheskikh protsessov PK ANSYS 17.0* [Modeling of hydrogasdynamic processes PC ANSYS 17.0]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin).
14. Makarov V.N., Akhmetov R.G., Davydov S.Ya., Makarov N.V. (2023) Eksperimental'noe issledovanie i modelirovanie ekologicheskoy effektivnosti vertikal'nykh shakhtnykh pechey dlya sushki ogneupornykh i stroitel'nykh materialov [Experimental study and modeling of the environmental efficiency of vertical shaft kilns for drying refractory and building materials]. *Novye ogneupory – New Refractories*. 7. pp. 52–59.
15. Han H., Wang P., Liu R. (2020) Experimental study on the atomization characteristics and dust reduction efficiency of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*. 7(3). pp. 581–596. doi: 10.1007/s40789-020-00329-w
16. Loytsyanskiy L.G. (2003) *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa.
17. Zhang H., Xu Y., Han W., Wang Z. (2021) Analysis on the development status of coal mine dust disaster prevention technology in China. *Journal of Healthcare Engineer*. 2021. Article 5574579. doi: 10.1155/2021/5574579
18. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh (2021) Parameters affecting efficiency of centrifugal pump – A review. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 8. pp. 49–58. doi: 10.32628/IJSRST18573
19. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. (2021) Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 32(3). pp. 42–51. doi: 10.7166/32-3-2616
20. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pilieva D.E. (2023) Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1. pp. 84–94. doi: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84
21. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Suslov N.M., Luntsova A.I., Rabina E.I. (2019) Automation of design for dynamic loading at the design stage of mining machinery. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399(3). Article 033010. pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010

Сведения об авторах:

Ахметов Рустам Гумарович – главный механик АО «Костанайские минералы» (Житикара, Казахстан). E-mail: info@km.kz

Дылдин Герман Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики Уральского государственного горного университета (Екатеринбург, Россия) E-mail: German.Dyldin@yandex.ru

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета (Екатеринбург, Россия). E-mail: uk.intelnedra@gmail.com

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики Уральского государственного горного университета (Екатеринбург, Россия). E-mail: mnikolay84@mail.ru

Information about the authors:

Akhmetov Rustam G. (Chief Mechanic, JSC “Kostanay Minerals”, Zhitikara, Kazakhstan). E-mail: info@km.kz

Dyldin German P. (Candidate of Technical Sciences, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation). E-mail: German.Dyldin@yandex.ru

Makarov Vladimir N. (Doctor of Technical Sciences, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation). E-mail: uk.intelnedra@gmail.com

Makarov Nikolay V. (Candidate of Technical Sciences, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation). E-mail: mni-kolay84@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; принята к публикации 10.04.2025

The article was submitted 13.11.2023; accepted for publication 10.04.2025