

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГОРНО- МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Угольников¹, Е.С. Нурхожаев², В.Н. Макаров¹, Н.В. Макаров¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail ugolnikov@yandex.ru

² АО «Костанайские минералы», Житикара, Казахстан

Аннотация: Актуальность данной темы определяется возрастающими требованиями к экологической безопасности горно-металлургического производства, обусловленными усилением государственного контроля над качеством атмосферы и повышением ответственности предприятий перед обществом. Несмотря на развитие технологий пылеулавливания, применяемое оборудование часто оказывается недостаточно эффективным для достижения необходимых нормативов чистоты воздушного пространства. Горно-металлургические предприятия характеризуются значительным объемом выбросов, включающих различные виды загрязнений – от мелкодисперсных частиц до сложных многокомпонентных смесей. Простые традиционные пылеуловители типа циклонов и фильтров зачастую неспособны обеспечить требуемый уровень защиты окружающей среды, что требует разработки инновационных решений и модернизации существующих схем пылеулавливания. Кроме того, рост объемов производства и расширение номенклатуры выпускаемых продуктов ведут к увеличению количества специфичных видов загрязнений, очистка которых представляет собой отдельную технологическую проблему. Именно поэтому внедрение высокоэффективных систем пылеулавливания является приоритетной задачей для современного промышленного комплекса, обеспечивающей устойчивое развитие отрасли при минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Разработанная математическая модель позволила модернизировать сушилку печи в цехе дробления и сушки хризотила на АО «Костанайские минералы» и, как следствие, повысить эффективность улавливания частиц минералов, снизив в два раза концентрацию пыли в аэрозоли на выходе из печи.

Ключевые слова: аспирационные системы, пылеулавливание, фракционная эффективность пылеулавливания, система безопасности горных предприятий, критерий Стокса, критерий Фруда, сила Архимеда, инерционно-гравитационная сепарация.

Для цитирования: Угольников А. В., Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Макаров Н. В. Повышение эффективности пылеулавливания тепломассообменного оборудования для горно-металлургического производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 98–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_98.

Increasing the efficiency of dust collection of heat and mass exchange equipment for mining and metallurgical production

A.V. Ugolnikov¹, E.S. Nuhorzhaev², V.N. Makarov¹, N.V. Makarov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail ugolnikov@yandex.ru

² Joint Stock Company Kostanay Minerals, Gitikara, Kazakhstan

Abstract: The relevance of this topic is due to the increasing requirements for environmental safety of mining and metallurgical production, caused by strengthening state control over the quality of the atmosphere and increasing responsibility of enterprises to society. Despite the development of dust collection technologies, the equipment used is often not effective enough to achieve the required standards for air purity. Mining and metallurgical enterprises are characterized by a significant volume of emissions, including various types of pollutants – from fine particles to complex multicomponent mixtures. Simple traditional dust collectors such as cyclones and filters are often unable to provide the required level of environmental protection, which requires the development of innovative solutions and modernization of existing dust collection schemes. In addition, the growth of production volumes and the expansion of the range of products lead to an increase in the number of specific types of pollutants, the purification of which is a separate technological problem. That is why the introduction of highly efficient dust collection systems is a priority for the modern industrial complex, ensuring sustainable development of the industry while minimizing the negative impact on the environment. The developed mathematical model made it possible to modernize the drying furnace in the chrysotile crushing and drying shop at Kostanay Minerals JSC and, as a result, increase the efficiency of capturing mineral particles by reducing the dust concentration in the aerosol at the exit of the furnace by two times.

Key words: aspiration systems, dust collection, fractional efficiency of dust collection, mining safety system, Stokes criterion, Froude criterion, Archimedes force, inertial-gravitational separation.

For citation: Ugolnikov A. V., Nuhorzhaev E. S., Makarov V. N., Makarov N. V. Increasing the efficiency of dust collection of heat and mass exchange equipment for mining and metallurgical production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):98-111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_98.

Введение

Проблема пылегазовых выбросов является актуальной и важной темой исследования в современном промышленном производстве, особенно в горно-металлургической отрасли [1, 2]. Высокая концентрация пылевых частиц в атмосфере оказывает негативное влияние на здоровье человека и экосистемы, вызывая серьезные экологические последствия. К основным аспектам влияния относятся:

- загрязнение воздуха: пылегазовые выбросы являются одной из основных причин загрязнения атмосферного воздуха и представляют собой комплексные смеси твердых частиц, газов и паров, образующихся в процессе различных технологических операций на горно-металлургических предприятиях. Частицы и газы могут привести к образованию смога и ухудшению качества воздуха, что вызовет респираторные заболевания и другие проблемы со здоровьем;

- загрязнение почвы и воды: устойчивые загрязнители могут оседать на поверхности почвы и попадать в водоемы;
- изменение климата: некоторые газообразные выбросы, такие как CO_2 и метан, способствуют парниковому эффекту и глобальному потеплению.

Зарубежными и российскими учеными убедительно доказано и не вызывает сомнений, что мелкодисперсная пыль является одним из самых существенных загрязнителей атмосферного воздуха, негативно влияющих на здоровье человеческого организма, в том числе работающих в горно-металлургической отрасли. Необходимо отметить, что в большинстве опубликованных материалов представлены валовые выбросы в массовом объеме (т/год, г/с и т.п.) и достаточно редко указано количество и дисперсный состав наиболее опасного и трудноуловимого компонента — мелкодисперсной пыли (< 10 мкм), от которой необходимо защитить атмосферу, технику и биосферу в целом, для чего в первую очередь требуется разработать нестандартные технические средства, позволяющие из полидисперсного газопылевого потока выделить с высокой эффективностью наиболее опасную составляющую, а именно мелкодисперсную пыль [3—5].

Повышение требований к контролю уровня выбросов пыли при сушке строительных, огнеупорных материалов и в первую очередь минерального сырья на горно-металлургических предприятиях заставляют организации выбирать между прекращением роста объема выпуска продуктов вследствие нехватки средств на приобретение высокотехнологичного очистного оборудования и откладыванием решений экологических задач на неопределенный срок с потенциальным риском закрытия производств [6—8].

Оптимизация параметров, связанных с концентрацией пыли на выходе из су-

шильного агрегата, улучшение распределения ее частиц по размерам и физическому состоянию, достигаемые благодаря использованию эффективных технологий фильтрации и минимизации загрязнения окружающей среды, позволяют повысить экономичность и безопасность технологических процессов сушки, снизить удельные затраты на обеспечение экологических норм, повысить общую производительность и устойчивость предприятий строительной и промышленной отраслей [9—11].

Наукоемкость представленного исследования определяется оригинальной гипотезой о ключевой роли учета комплексного набора факторов, влияющих на динамику поведения и структуру пылевых аэрозолей — концентрации, размерных распределений, температуры и влажности пыли, формирующихся в ходе процесса тепловой обработки и взаимодействующих с потоками нагретого теплоносителя. Важнейшей особенностью проведенного научного изыскания стало рассмотрение шахтных сушильных установок как целостной замкнутой технической системы, внутри которой происходят процессы образования новых фракций твердых веществ, сопровождающиеся выделением тепла и рассеиванием взвешенных частиц, включая детальное моделирование материальных и тепловых балансов всей системы [12—14].

Исходя из результатов исследований, в качестве наилучшего решения проблемы повышения экологической эффективности производственных процессов предложен новый подход: совершенствование конструкции теплообменного оборудования (ТМО) путем встраивания непосредственно в его сушило гравитационно-кинетического сепаратора; построение математической модели аэродинамического процесса сепарации в неинерционной системе ко-

ординат с учетом влияния динамических эффектов вращения частиц аэрозоля, возникающих в результате проявления инерциальных сил Кориолиса и Магнуса [15–17].

В статье [18] на базе природоподобия предложена принципиально новая конструкция сушила ТМОО, в которое непосредственно интегрирован сепаратор, что обеспечивает одновременность проведения основного (сушка) и вспомогательного (сепарация) процессов пылевых частиц.

Однако разработанная математическая модель не учитывает силы Магнуса и Кориолиса, которые возникают вследствие вращательного криволинейного движения частиц минералов, тем самым оказывая существенное влияние на эффективность как процесса сепарации, так и теплообмена.

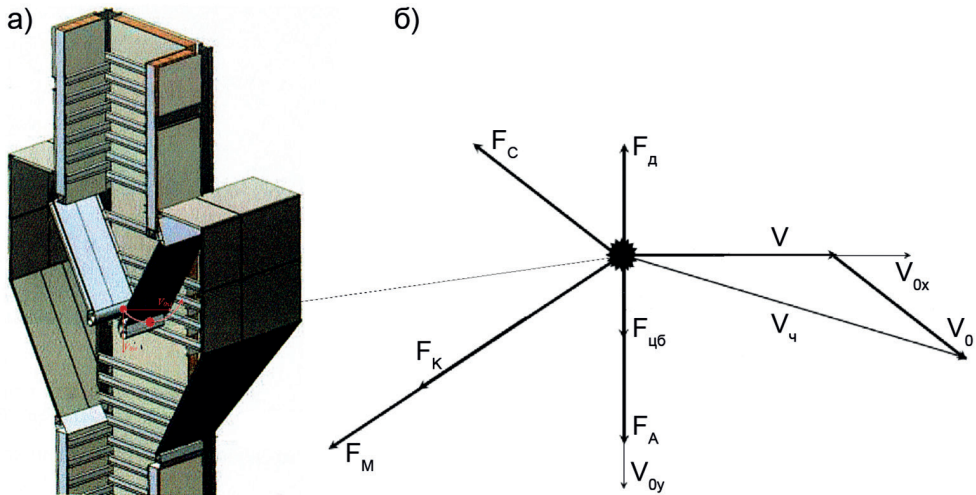
Предмет и объект исследований

Тепломассообменное оборудование сушки минералов и аэротермодинамические процессы, влияющие на эффективность сепарации частиц, с учетом сил Кориолиса и Магнуса.

Цель исследований заключается в разработке метода повышения эффективности ТМОО на базе разработки математической модели сепарации частиц аэрозоли непосредственно в сушиле печи с учетом инерционных сил, обусловленных вращением частиц минералов, т.е. сил Кориолиса и Магнуса.

Методика исследований

Разработка методов повышения экологической эффективности ТМОО базируется на применении метода суперпозиции, основанного на гипотезе об аналогии механизма формирования ре-



F_C – сила Стокса, Н; F_D – сила давления, Н; V – скорость теплоносителя, м/с;
 V_{0x} – начальная скорость i -й частицы в неинерционной системе координат по оси Ox , м/с;
 V_0 – относительная скорость частицы, м/с; $V_ч$ – скорость частицы, м/с; $F_{цб}$ – центробежная сила, Н;
 F_A – сила Архимеда, Н; V_{0y} – начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с; F_K – сила Кориолиса, Н; F_M – сила Магнуса, Н

Рис. 1. Вертикальная шахтная сушильная печь и графическая модель сил, действующих на частицу в процессе сепарации в ее сушиле: 3Д-модель сепаратора в сушиле печи (а); схема влияния сил и скоростей на i -ю частицу (б)

Fig. 1. Vertical shaft drying furnace and a graphical model of the forces acting on a particle during the separation process in its drying chamber: 3D model of the separator in section (a); diagram of the influence of forces and speeds on the i -th particle (b)

зультирующей силы, действующей на частицу материала в процессе сепарации в сушиле печи от ее взаимодействия с теплоносителем, и сил, действующих на объекты природы под воздействием естественно закрученных потоков — торнадо. Данный метод помогает аналитически учитывать сложное сочетание физических эффектов, происходящих одновременно в процессах сепарации и сушки материалов [19–21]. Построение математической модели базируется на дифференциальных уравнениях движения частиц в комбинированном, прямом-противоточном движении теплоносителя. При этом силы, действующие на частицы минералов, целесообразно рассматривать в инерционной и неинерционной системах отсчета, с учетом сил, обусловленных вращением одной системы координат относительно другой.

Результаты

Экспериментальные исследования эффективности процесса сепарации частиц минералов в процессе их сушки в ТМОО были проведены в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы» на вертикальных шахтных сушильных печах ВСШП 18х2х2 (см. рис. 1, а).

Экспериментально установлено, что модернизация конструкции сушила, позволяющая обеспечить вращение частиц руды в процессе их движения, существенно снижает максимальный диаметр сепарируемых частиц, что соответственно повышает эффективность аспирации, т.е. снижает концентрацию пыли в аэрозоли на выходе из печи.

Указанное обусловлено тем, что в классических системах пылеулавливания эффект осаждения частиц минерала обеспечивается за счет массовых сил, в то время как силы сопротивления снижают эффективность сепарации. При вращении частиц минерала вокруг них возникает вихревое поле, которое способст-

вует перераспределению поверхностных сил, возникновению циркуляции и, как результат, появлению дополнительной поверхностной силы, которая по своему воздействию аналогична объемной массовой силе, дополнительно увеличивая или снижая результирующую силу гравитации. При этом одновременно за счет изменения критерия Рейнольдса, т.е. относительной скорости теплоносителя, снижается негативное влияние поверхностных сил трения. Приведенная на рис. 1, а конструкция встроенного сепаратора позволяет закручивать частицы минерала, движущиеся по ее поверхности [22].

В момент схода вращающейся частицы с наклонной поверхности сепаратора траектория ее движения будет определяться физическими свойствами частицы и теплоносителя, ее кинетической энергией, плотностью энергии теплоносителя (рис. 1, б). Для построения математической модели, описывающей процесс сепарации частицы минерала в сушиле печи, воспользуемся дифференциальным уравнением ее движения по координатам в неинерционной системе координат, привязанной к движению центра масс частицы на криволинейной траектории, привязанной к инерционной системе координат.

Уравнение движения i -й частицы минерала в проекции на ось Oy в неинерционной системе координат, направленной по действию силы гравитации, запишем в виде

$$m_i \frac{dV_{0yi}}{dt} = F_{Ayi} + F_{\text{цб}yi} + F_{\text{К}yi} + F_{\text{М}yi} + F_{\text{С}yi} + F_{\text{Д}yi}, \quad (1)$$

где m_i — масса i -й частицы, кг; V_{0yi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с; F_{Ayi} — составляющая силы Архимеда по оси Oy , Н;

$$F_{Ayi} = \frac{1}{6} \pi d_i^3 (\rho_i - \rho_T) g,$$

где d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; ρ_T — плотность теплоносителя, кг/м³; g — сила тяжести, Н.

$F_{цбyi}$ — составляющая центробежной силы по оси Oy , Н:

$$F_{цбyi} = (V^0)^2 \cdot \frac{\pi d_i^3}{6R_i} \cdot \rho_i,$$

где V^0 — начальная скорость i -й частицы, м/с; d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; R_i — радиус движения i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³;

$F_{Кyi}$ — составляющая силы Кориолиса по оси Oy , Н:

$$F_{Кyi} = \frac{2\pi d_i^3 \rho_i V_{0yi}^2}{6R_i},$$

где d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; V_{0yi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с; R_i — радиус движения i -й частицы, м;

F_{Myi} — составляющая силы Магнуса по оси Oy , Н:

$$F_{Myi} = \frac{\pi \rho_T d_i^2}{4} \cdot V_i^0 \cdot (V_{ТHyi} - V_{0yi}),$$

где ρ_T — плотность теплоносителя, кг/м³; d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; $V_{ТHyi}$ — скорость теплоносителя противотока, м/с; V_{0yi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с.

F_{Cyi} — составляющая силы Стокса по оси Oy , Н:

$$F_{Cyi} = \frac{K_{\phi i} v_i \rho_i \pi d_i (-V_{ТHyi} - V_{0yi})}{2},$$

где $K_{\phi i}$ — коэффициент формы i -й частицы; v_i — скорость движения i -й частицы, м/с; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; d_i — диаметр i -й частицы, м;

$V_{ТHyi}$ — скорость теплоносителя противотока, м/с; V_{0yi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с.

$F_{дyi}$ — составляющая силы давления по оси Oy , Н:

$$F_{дyi} = -\frac{1}{6} \pi d_i^3 \rho_i \frac{\rho_T}{R_i} (V^0)^2,$$

где d_i — диаметр i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; ρ_T — плотность теплоносителя, кг/м³; R_i — радиус движения i -й частицы, м; V^0 — начальная скорость i -й частицы, м/с.

Уравнение движения i -й частицы минерала в проекции на ось Ox в неинерционной системе координат, направленной по действию силы гравитации, запишем в виде

$$m_i \frac{dV_{0xi}}{dt} = F_{цбxi} + F_{Кxi} + F_{Mxi} + F_{Cxi} + F_{дxi}, \quad (2)$$

где V_{0xi} — начальная скорость i -й частицы в неинерционной системе координат по оси Ox , м/с; $F_{цбxi}$ — составляющая центробежной силы по оси Ox , Н:

$$F_{цбxi} = V_0^2 \cdot \frac{\pi d_i^3}{6R_i} \rho_i,$$

где V_0 — начальная скорость i -й частицы, м/с; d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; R_i — радиус движения i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³;

$F_{Кxi}$ — составляющая силы Кориолисса по оси Ox , Н;

$$F_{Кxi} = \frac{\pi d_i^3}{3R_i} \cdot V_{0xi}^2,$$

где d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; R_i — радиус движения i -й частицы, м; V_{0xi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси x , м/с;

F_{Mxi} — составляющая силы Магнуса по оси Ox , Н;

$$F_{\text{Мxi}} = \frac{\pi \rho_T d_i^2}{y} \cdot V_i^0 \cdot (V_{\text{ТНxi}} + V_{0xi}),$$

где ρ_T — плотность теплоносителя, кг/м³; d_i^3 — диаметр i -й частицы, м; $V_{\text{ТНxi}}$ — скорость теплоносителя противотока, м/с; V_{0xi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с.

$F_{\text{Сxi}}$ — составляющая силы Стокса по оси $0x$, Н:

$$F_{\text{Сxi}} = \frac{K_{\phi i} v_i \rho_i \pi d_i}{2} (V_{\text{ТНxi}} \cdot V_{\text{ТНxi}}),$$

где $K_{\phi i}$ — коэффициент формы i -й частицы; v_i — скорость движения i -й частицы, м/с; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; d_i — диаметр i -й частицы, м; $V_{\text{ТНxi}}$ — скорость теплоносителя противотока, м/с; V_{0xi} — начальная скорость i -й частицы в момент схода в неинерционной системе координат по оси y , м/с;

$F_{\text{дxi}}$ — составляющая силы давления по оси $0x$, Н;

$$F_{\text{дxi}} = -\frac{1}{6} \pi d_i^3 \rho_i \cdot \frac{\rho_T}{R_i} (V^0)^2,$$

где d_i — диаметр i -й частицы, м; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³; ρ_T — плотность теплоносителя, кг/м³; R_i — радиус движения i -й частицы, м; V^0 — начальная скорость i -й частицы, м/с.

С учетом полученной математической модели траектории движения частиц минерала в сушиле печи под действием объемных и поверхностных сил, в том числе сил Кориолиса и Магнуса, уравнение вертикального движения по оси $0y$ i -й частицы в нижней точке траектории можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} V_{y0i} = & \frac{1}{K_{\phi} \rho_T v_i} \cdot \left(\frac{1}{3} d_i^2 (\rho_i - \rho_T) g + \frac{1}{3} V_{0i}^2 \cdot d_i^2 \cdot \rho_i \cdot \frac{1}{R_i} + \frac{2}{3} \frac{d_i^2 \cdot V_{0xi}^2 \cdot V^0}{R_i} + \right. \\ & \left. + \frac{1 \rho_T d_i V_{0i} (V_{\text{ТНxi}} \cdot V_{0yi})}{2} - \frac{K_{\phi} \rho_T v^2 (V_{\text{ТНyi}})}{3} \frac{1}{3} \frac{d_i^2 \rho_T V_0^2 - \frac{1}{2} \alpha_i d_i (V_{\text{ТНxi}} - V_{0xi})^2}{3} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

Из анализа формулы (3) можно сделать вывод о том, что нижняя точка траектории движения центра масс i -й частицы минерала массой m_i в инерционной системе координат при $V_{y0i} = 0$ является для нее равновесной: все частицы большего диаметра, находящиеся на этой траектории, сепарируются, а меньшего диаметра поступают вместе с теплоносителем на выход из печи, т.е. в аспирационную систему пылеулавливания.

Уравнение (3) представляет собой квадратное уравнение типа

$$a_i d_i^2 + b_i d_i + c_i = 0, \quad (4)$$

где $a_i = \frac{1}{3} \frac{\rho_i - \rho_T \cdot g}{\rho_T \cdot K_{\phi} \cdot v_i} + \frac{1}{3} \rho_i \frac{V_{0i}^2}{R_i} + \frac{2}{3} \frac{V_{0i} \cdot V_{x0i}}{R_i} \rho_i$; g — сила тяжести;

$$b_i = \frac{1}{2} \rho_T V_{0i} \cdot (V_{\text{ТНxi}} - V_{0xi}) - \frac{1}{2} \alpha_i (V_{\text{ТНxi}} - V_{0xi})^2; c_i = K_{\phi} \rho_T v_i V_{\text{ТНyi}}.$$

Решение вышеуказанного уравнения может быть представлено в виде

$$d_{(1,2)i} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}, \quad (5)$$

где $D = b^2 - 4ac$;

$$\begin{aligned} D &= \frac{\rho_T^2 \cdot V_{0i}^2 (V_{ТНxi} - V_{0xi})^2}{4} + \frac{4}{3} \rho_i \left(\frac{g}{\rho_T K_\phi v_i} + \frac{V_{0i}^2}{R_i} \right) \times (K_\phi \cdot \rho_T \cdot v_i \cdot V_{ТНyi}) = \\ &= \frac{\rho_T^2 \cdot V_{0i}^2 (V_{ТНxi} - V_{0xi})^2}{4} + \frac{4}{3} \rho_i \cdot g \cdot V_{ТНyi} + \frac{4}{3} \frac{\rho_T \rho_i}{R_i} \cdot V_{0i}^2 \cdot K_\phi \cdot v_i \cdot V_{ТНyi} + \\ &\quad + \frac{8}{3} \frac{V_{x0i} \cdot V_{0i} \cdot V_{ТНyi}}{R_i} \cdot \rho_i \cdot \rho_T \cdot K_\phi \cdot v_i \end{aligned}$$

Из анализа уравнения (3) видно, что $D > 0$, $b > 0$, т.е. $(-b - \sqrt{D}) < 0$. Следовательно, вышеуказанное квадратное уравнение имеет одно решение:

$$d_i = \frac{\sqrt{D} - b_i}{2a_i}.$$

После соответствующих преобразований с учетом вышеизложенного минимальный диаметр частиц минерала, сепарируемых в сушиле печи, с учетом сил Кориолиса и Магнуса определяем по формуле

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{1}{\frac{\rho_i - \rho_T}{\rho_T} \cdot \frac{g}{K_\phi v_i} + \rho_i \frac{V_{0i}^2}{R_i} + 2 \frac{V_{0i} \cdot V_{0xi}}{R_i} \rho_i} \cdot \\ &\cdot \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_T^2 V_{0i}^2 (V_{ТНxi} - V_{0xi})^2}{4} + \frac{\rho_i g V_{ТНyi}}{3} + \frac{\rho_i \rho_T V_{0i}^2 V_{ТНyi} K_\phi v_i}{3 R_i} + \frac{2}{3} V_{0i} V_{x0i} V_{ТНyi} \rho_i \rho_T K_\phi v_i - \frac{\rho_T V_{0i} (V_{ТНxi} - V_{0xi})}{2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Из анализа формулы (6) видно, что за исключением физических параметров теплоносителя и частиц минералов основное влияние на минимальный диаметр сепарируемых частиц оказывают скорость частицы минерала в точке схода ее с наклонной поверхности сепаратора, интегрированного в сушило печи V_{0yi} , и составляющие скорости теплоносителя в сепараторе. Указанные аэродинамические параметры фактически определяются геометрическими параметрами встроеного в сушило гравитационно-кинетического сепаратора, в том числе углом наклона α кинетической поверхности сепаратора, площадью выходного сечения сепаратора F_c и площадями симметричных сечений входных коллекторов F_a газоотводящих каналов. Увеличение коэффициента диффузорности сепаратора $K_c = F_a / F_c$, угла установки наклонной поверхности α приводит к существенному уменьшению числителя и увеличению знаменателя формулы (6) за счет влияния слагаемых, определяемых силами Кориолиса и Магнуса. Наиболее существенное влияние оказывает четвертое слагаемое в числителе формулы (6), обусловленное влиянием силы Магнуса при практически неизменном влиянии силы Кориолиса. Таким образом,

чтобы повысить эффективность сепарации частиц минералов непосредственно в сушиле печи, необходимо определение максимально возможного угла установки кинетической поверхности сепаратора α , увеличение горизонтальной составляющей скорости теплоносителя, что определяется диффузорностью сепаратора. Следует заметить, что силы Кориолиса и Магнуса снижают скорость относительного движения частиц минерала за счет увеличения импульса сил Магнуса, т. е. времени нахождения в сепараторе частиц минерала.

В целях верификации полученной математической модели были проведены промышленные исследования экологической эффективности предложенного сепаратора на шахтных печах ВШСП 18x2x2 в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы». В процессе испытаний были использованы два типа сепараторов, встроенных в сушило печи с различным углом установки наклонной поверхности с использованием вихревой камеры в выходном сечении для обеспечения

закрутки частиц минералов. На рис. 2 приведены графики зависимости экологической эффективности встроенного сепаратора в зависимости от его геометрических параметров.

Из анализа рис. 2 видно, что по мере увеличения закрутки частиц минерала снижается минимальный диаметр сепарируемых частиц, причем по мере уменьшения коэффициента диффузорности сепаратора эффективность от закрутки увеличивается, аналогично, вращательное движение частиц минералов повышает эффективность сепарации при изменении высоты камеры сепаратора. Причем минимальное значение диаметра сепарируемых частиц — при высоте камеры 2,5 м, т.е. при 125% относительно размеров сушила печи ВШСП 18x2x2, поскольку изменение высоты одновременно влияет на соотношение горизонтальных и вертикальных скоростей теплоносителя.

Из графиков на рис. 2 видно, что минимальный диаметр сепарируемых в сушиле печи частиц хризотил-асбеста

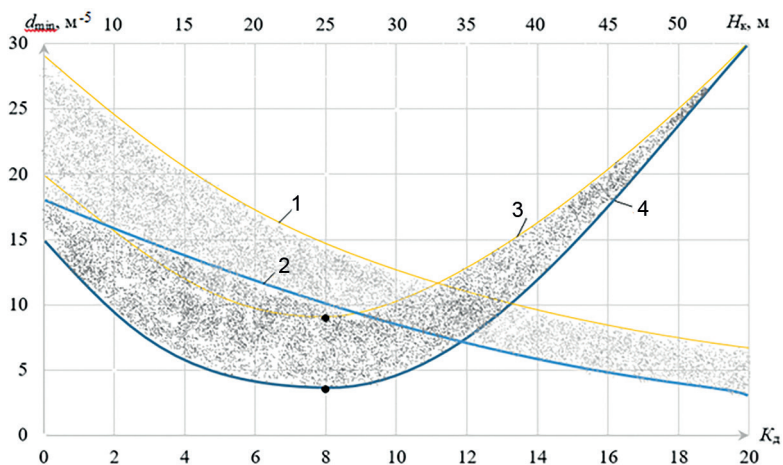


Рис. 2. График зависимости минимального диаметра частиц хризотил-асбеста, сепарируемых в сушиле печи: 1, 2 — в зависимости от диффузорности сепаратора K_d ; 3, 4 — от высоты камеры сепаратора H_k ; 1, 3 — без вихревой камеры; 2, 4 — с вихревой камерой

Fig. 2. Graph of the minimum diameter of chrysotile asbestos particles separated in the dryer furnace: 1, 2 — depending on the diffusivity of the separator K_d ; 3, 4 — depending on the height of the separator chamber H_k ; 1, 3 — without a vortex chamber; 2, 4 — with a vortex chamber

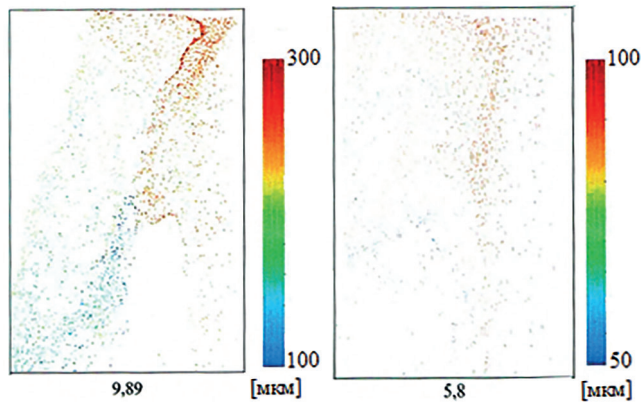


Рис. 3. Распределение диаметра фракции 50–300 мкм хризотил-асбестовой пыли на выходе из сепаратора

Рис. 3. Распределение диаметра фракции 50–300 мкм хризотил-асбестовой пыли на выходе из сепаратора

в результате положительного влияния вихревой камеры составляет 50 мкм. Поскольку фракционный состав пыли соответствует диапазону 0,1–100 мкм, фактически достигается двукратное снижение концентрации пыли на выходе из печи.

Дополнительно было проведено компьютерное моделирование аэротермодинамических процессов, которое также подтвердило эффективность сепарации частиц минералов в сушиле печи (рис. 3) [23].

Статистическая достоверность испытаний была определена с использованием t -критерия Стьюдента. При числе степеней свободы, т.е. количестве проведенных экспериментов по каждому фактору, равном 19, с доверительной вероятностью 0,95 критическое значение Стьюдента $t_{кр} = 2,093$, при этом его фактическое значение $St_{\phi} \leq 2,012$. Указанное подтверждает статистическую значимость среднестатистических аэродинамических характеристик сушила печи.

Таким образом, предложенный метод суперпозиции, аналогичный принципу аддитивного аэрологического расчета двухфазной полидисперсной среды частиц минералов, отличающихся высокой парусностью, позволяет построить

траекторию движения частиц непосредственно в сушиле печи, в которой интегрирован сепаратор, конструкция которого позволяет создавать вращательное движение частиц минерала, обеспечивая тем самым повышение эффективности процесса сепарации одновременно с улучшением теплообмена. Использование эффекта действия сил Магнуса, определяемого, как показано выше, скоростью выхода частиц с наклонной плоскости сепаратора, т.е. фактически их угловой скоростью вращения и кинематикой движения теплоносителя, определяемых геометрическими параметрами и конструкцией сепаратора, позволяет повысить эффективность сепарации и тем самым снизить концентрацию аэрозолей на выходе из печи, повышая при этом экологическую эффективность ТМОО и уменьшая ее негативное влияние на окружающую среду.

С учетом построенной математической модели можно получить критерий сепарации, характеризующий аспирационную эффективность сепаратора и определяемый отношением объемных и поверхностных сил, действующих на частицу в вертикальном направлении, отнесенную к приведенным силам тяжести. Поскольку в данной статье иссле-

дуются главным образом влияние силы Магнуса на аспирационную эффективность, коэффициент сепарации гравитационно-кинетического сепаратора без вихревой камеры с учетом уравнений (1), (2) можно получить в виде

$$K_C = \frac{\omega_i V_{ТХxi}}{4V_{ТHyi}}, \quad (7)$$

где ω_i — угловая частота вращения частицы.

Коэффициент сепарации гравитационно-кинетического сепаратора без вихревой камеры с учетом кинематики вращательного движения частиц минералов по кинетической плоскости сепаратора, без влияния завихрителей (7), при $V_{0yi} = 0$, $V_{0xi} \ll V_{ТХxi}$ представлен в виде

$$K_C = \frac{d_i V_i^0 (V_{ТХxi} \cdot V_{0xi})}{2K_\phi v_i V_{ТHyi}}. \quad (8)$$

Обсуждение результатов

Таким образом, разработана математическая модель сепарации аэрозоли непосредственно в сушиле печи с учетом инерционных сил Кориолиса и Магнуса, обусловленных вращением частиц минералов.

Согласно результатам экспериментальных исследований, расчетам мате-

матического и компьютерного моделирования, формула (8) подтверждает существенное влияние начальной скорости движения частицы и соотношения вертикальной и горизонтальной скорости теплоносителя на эффективность сепарации, как показано выше.

Заключение

1. Предложен метод повышения экологической эффективности ТМОО, включающий в себя применение встроенных в них сушил ТМОО сепараторов, что обеспечивает вихревое закручивание частиц минералов и способствует существенному снижению концентрации аэрозоля на выходе за счет положительного влияния инерционных сил Кориолиса и Магнуса.

2. Разработана математическая модель, на базе которой показано основное влияние на минимальный диаметр сепарируемых частиц скорости теплоносителя в сепараторе.

3. Разработанная математическая модель позволила модернизировать сушило печи в цехе дробления и сушки хризотила на АО «Костанайские минералы» и, как следствие, повысить эффективность улавливания частиц минералов, снизив в два раза концентрацию пыли в аэрозоли на выходе из печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Босиков И. И., Ключев Р. В., Ревазов В. Ч., Пилиева Д. Э. Структурно-геологические особенности рудных зон юго-восточной части Сибирской платформы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 1. — С. 84–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84.
2. Дылдин Г. П., Косарев Н. П., Мартынов В. В., Дылдин А. Г. Анализ технологии и оборудования предприятия по добыче и переработке щебня как источника загрязнения атмосферы // Известия Уральского государственного горного университета. — 2024. — № 3(75). — С. 95–106. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-3-95-106.
3. Стась Г. В., Калаева С. З., Муратова К. М., Чистяков Я. В. К вопросу защиты окружающей среды от мелкодисперсной пыли горных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 1. — С. 92–109.
4. Евтушенко А. И., Евтушенко И. И., Нор-Аревян С. Л., Бельская Я. В. К вопросу исследования путей повышения эффективности пылеподавления орошением // Инженерный вестник Дона. — 2016. — Т. 42. — № 3 (42). — С. 46–55.
5. Филин А. Э., Овчинникова Т. И., Зиновьева О. М., Меркулова А. М. Развитие пульсирующей вентиляции в горном производстве // Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 67–71. DOI: 10.1016/gzh.2020.03.13.

6. Васенин И. М., Крайнов А. Ю., Исайченков А. Б. Математическое моделирование сушки угольных частиц в потоке газа // Компьютерные исследования и моделирование. — 2012. — Т. 4. — № 2. — С. 357 — 367.

7. 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.

8. 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.

9. 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 (IJSRST). 2021, vol. 8, no. 6, pp. 49 — 58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.

10. 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, vol. 343, pp. 754 — 764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042.

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, vol. 129, pp. 230 — 237. DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.010.

12. Каплунов Д. Р., Калаева С. З., Муратова К. М., Чистяков Я. В. Анализ конструкций пылеуловителей циклонного типа для мелкодисперсной пыли // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 2. — С. 49 — 71.

13. Азаров В. Н., Кошкарев С. А. Повышение экологической безопасности стройиндустрии совершенствованием систем обеспыливания с использованием комплексного дисперсионного анализа пылевых выбросов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2016. — № 43(62). — С. 161 — 174.

14. 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.

15. Han H., Wang P., Liu R. 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 and Technology. 2020, vol. 7, no. 3, pp. 581 — 596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

16. 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 Engineering. 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.

17. 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. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42 — 51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

18. Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Ахметов Р. Г., Шакирзянова А. Ф. Методика определения экологической эффективности вертикальных шахтных сушильных печей и пути ее повышения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 4. — С. 525 — 532. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-525-526.

19. Угольников А. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В. Оптимизация геометрических параметров гидровихревого инерционного стратификатора Вентури // Записки Горного института. — 2019. — Т. 240. — С. 638 — 648. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.638.

20. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. — 2019. — Т. 89. — № 5. — С. 455 — 465.

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, vol. 1399, no. 3, article 033010. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010.

22. Нурхожаев Е. С., Макаров Н. В., Арсланов А. А. и др. Патент № 2813645 С1 Российская Федерация, МПК F26B 3/14, F26B 17/12. Способ сушки сыпучих материалов, повышение экологической эффективности шахтных печей и устройство для его осуществления: № 2023111796: заявл. 05.05.2023: опубл. 14.02.2024.

REFERENCES

1. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Revazov V. Ch., Pilieva D. E. Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 84–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84.
2. Dyldin G. P., Kosarev N. P., Martynov V. V., Dyldin A. G. Analysis of technology and equipment of an enterprise for the extraction and processing of crushed stone as a source of air pollution. *News of the Ural State Mining University.* 2024, no. 3(75), pp. 95–106. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-3-95-106.
3. Stas G. V., Kalayeva S. Z., Muratova K. M., Chistyakov Ya. V. On the issue of environmental protection from fine dust from mining enterprises. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2019, no. 1, pp. 92–109. [In Russ].
4. Evtushenko A. I., Evtushenko I. I., Nor-Arevyan S. L., Belskaya Ya. V. On the issue of studying ways to improve the efficiency of dust suppression by irrigation. *Engineering journal of Don.* 2016, vol. 42, no. 3 (42), pp. 46–55. [In Russ].
5. Filin A. E., Ovchinnikova T. I., Zinovieva O. M., Merkulova A. M. Development of pulsating ventilation in mining production. *Gornyi Zhurnal.* 2020, no. 3, pp. 67–71. [In Russ]. DOI: 10.1016/gzh.2020.03.13.
6. Vasenin I. M., Kraynov A. Yu., Isaichenkov A. B. Mathematical modeling of drying coal particles in a gas flow. *Computer research and modeling.* 2012, vol. 4, no. 2, pp. 357–367. [In Russ].
7. Kalayeva S. Z., Muratova K. M., Chistyakov Ya. V. Study of the process of cleaning air flows from fine dust in a centrifugal-inertial dust collection device. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2017, no. 3, pp. 45–57. [In Russ].
8. Chistyakov Ya. V., Muratova K. M., Volodin N. I. Fundamentals of fine dust separation in a centrifugal-inertial dust collector. Ecology and industry in Russia. *Ecology and Industry of Russia.* 2016, vol. 20, no. 8, pp. 20–27. [In Russ].
9. 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 (IJSRST).* 2021, vol. 8, no. 6, pp. 49–58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
10. 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, vol. 343, pp. 754–764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042.
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, vol. 129, pp. 230–237. DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.010.
12. Kaplunov D. R., Kalayeva S. Z., Muratova K. M., Chistyakov Ya. V. Analysis of the designs of cyclone-type dust collectors for fine dust. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2018, no. 2, pp. 49–71. [In Russ].
13. Azarov V. N., Koshkarev S. A. Improving the environmental safety of the construction industry by improving dust removal systems using complex dispersion analysis of dust emissions. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering.* 2016, no. 43(62), pp. 161–174. [In Russ].
14. Yuryev B. P., Goltsev V. A., Maltsev V. A., Savin V. A. Drying of chrysotile ore in vertical shaft-type apparatuses. *Construction Materials.* 2016, no. 8, pp. 80–84. [In Russ].
15. Han H., Wang P., Liu R. 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 and Technology.* 2020, vol. 7, no. 3, pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.
16. 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 Engineering.* 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.
17. 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.* 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42–51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

18. Nurkhozhaev E. S., Makarov V. N., Akhmetov R. G., Shakirzyanova A. F. Methodology for determining the environmental efficiency of vertical shaft drying kilns and ways to improve it. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2024, no. 4, pp. 525–532. [In Russ]. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-525-526.

19. Ugolnikov A. V., Makarov V. N., Makarov N. V. Optimization of geometric parameters of the Venturi hydro-cyclone inertial separator. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 638–648. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.638.

20. Kovalchuk M. V., Naraykin O. S., Yatsishina E. B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019, vol. 89, no. 5, pp. 455–465. [In Russ].

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, vol. 1399, no. 3, article 033010. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010.

22. Nurkhozhaev E. S., Makarov N. V., Arslanov A. A., etc. *Patent RU 2813645 C1, MPK F26B 3/14, F26B 17/12*. 14.02.2024. [In Russ].

23. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Zakharova Yu. V. *Modelirovanie gidrogazodinamicheskikh protsessov PK ANSYS 17.0* [Modeling of hydrogasdynamic processes PC ANSYS 17.0], Novosibirsk, 2016, 168 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Угольников Александр Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: ugolnikov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8442-4841,

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич — председатель правления, АО «Костанайские минералы», e-mail: info@km.kz,

Макаров Владимир Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

Макаров Николай Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Угольников А.В., e-mail: ugolnikov@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Ugolnikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: ugolnikov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8442-4841,

E.S. Nuhorzhaev, Chairman of Management Board, Joint Stock Company Kostanay Minerals, 110700, Gitikara, Kazakhstan, e-mail: info@km.kz,

V.N. Makarov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

N.V. Makarov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A.V. Ugolnikov, e-mail: ugolnikov@yandex.ru.

Получена редакцией 30.07.2025; получена после рецензии 08.10.2025; принята к печати 17.11.2025.

Received by the editors 30.07.2025; received after the review 08.10.2025; accepted for printing 17.11.2025.