



УДК 622.276+669.054.8:658.567.1

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ГИДРОВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, А.В. Угольников, Н.В. Макаров, А.В. Лифанов¹

Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

¹Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш» (142103, Россия, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 2Д)

EFFECTIVE METHOD FOR HYDROCHEMICAL CLASSIFICATION OF THIN-DISPERSED TECHNOGENIC MINERAL WASTE IN THE MINING AND METALLURGICAL COMPLEX

N.P. Kosarev, V.N. Makarov, A.V. Ugolnikov, N.V. Makarov, A.V. Lifanov¹

Ural State Mining University (30 Kuybysheva st., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation)

¹Scientific-Production Complex "OylGazMash" (2D Zheleznodorozhnaya st., Podolsk, 142103, Russian Federation)

Получена / Received: 10.06.2019. Принята / Accepted: 01.11.2019. Опубликовано / Published: 27.12.2019

Ключевые слова:

утилизация, классификация, гидровихревая гетерокоагуляция, труба Вентури, критерии Рейнольдса и Эйлера, надстоксовское движение.

Освещены создание эффективного способа и технологии гидровихревой классификации в кипящем слое наночастиц техногенных минеральных образований (ТМО) и разработка математического аппарата для расчета его геометрических и энергетических характеристик. Многочисленные исследования показывают, что эффективность утилизации техногенных минеральных образований ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианному размеру и дисперсности их частиц. Сдерживающим фактором использования ТМО является недостаточное совершенство техники и технологии и их классификации. Жесткие требования классификации по дисперсии медианных размеров ТМО обуславливают необходимость поиска способов и технических средств их реализации, которые в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров микрочастиц могут эффективно их реализовывать. С использованием гидродинамических уравнений Буссинеска и теории размерностей построена математическая модель гидровихревой классификации микро- и наночастиц ТМО. Получены уравнения движения дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» в условиях неустановившегося гидродинамического инерционного надстоксовского движения в процессе классификации в функции критериев Эйлера и Рейнольдса. Подтверждена зависимость диаметра полностью поглощаемых частиц компонентов сыпучих ТМО от угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой классификации. Установлено, что время релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в процессе гидровихревой классификации зависит от их медианного размера. Получено уравнение для расчета геометрических параметров классификатора Вентури от потребной производительности и энергетических характеристик гидровихревого аэратора. Сертификационные испытания опытно-промышленного образца гидровихревого классификатора Вентури ГКВ-200 подтвердили возможность разделения микрочастиц ТМО в диапазоне (0,5–5,0)10⁻⁶ с дисперсией не более 20 %.

Key words:

utilization, classification, hydro-vortex heterocoagulation, Venturi tube, Reynolds and Euler criteria, over-Stokes movement.

The article is devoted to the creation of an effective method and technology of hydro-vortex classification in a fluidized bed of nanoparticles of technogenic mineral formations (TMF) and the development of a mathematical apparatus for calculating its geometric and energy characteristics. Numerous studies show that the efficiency of technogenic mineral formations utilization is limited by high requirements to the fractional composition, median size and dispersion of their particles. The limiting factor in the use of TMF is the insufficient perfection of equipment and technology and their classification. The stringent classification requirements for the variance of the median sizes of TMF necessitate the search for methods and technical means for their implementation, which, under the conditions of the probabilistic distribution of physico-mechanical, geometric, kinematic parameters of microparticles, can effectively implement them. Using the hydrodynamic equations of Boussinesq and the theory of dimensions, a mathematical model of the hydro-vortex classification of micro- and nanoparticles of TMF particles was constructed. The equations of motion of the dispersed system "liquid drop - TMF microparticle" were obtained under conditions of unsteady hydrodynamic inertial supra-Stokes motion during classification as a function of the Euler and Reynolds criteria. The dependence of the diameter of the completely absorbed particles of the components of bulk TMF on the angular velocity of liquid droplets rotation during the hydro-vortex classification was confirmed. It was established that the relaxation time of liquid droplets with integrated micro- and nanoparticles of TMF in the process of hydro-vortex classification depends on their median size. An equation was obtained for calculating the geometric parameters of the Venturi classifier from the required performance and energy characteristics of the hydro-vortex aerator. Certification tests of a pilot industrial model of the Venturi GKV-200 hydro-vortex classifier confirmed the feasibility of separating the TMF microparticles in the range (0.5–5.0) 10⁻⁶ with a dispersion of no more than 20%.

Косарев Николай Петрович – доктор технических наук, профессор (тел.: +007 343 295 13 05, e-mail: ursmu@bk.ru).

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики (тел.: +007 343 295 04 48, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники (тел.: +007 343 283 03 72, e-mail: ugonnikov@yandex.ru). Контактное лицо для переписки.

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горной механики (тел.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Лифанов Александр Викторович – генеральный директор (тел.: +007 495 505 66 97, e-mail: info@oilgazmash.ru).

Nikolay P. Kosarev (Author ID in Scopus: 6602443934) – Doctor of Engineering, Professor (tel.: +007 343 295 13 05, e-mail: ursmu@bk.ru).

Vladimir N. Makarov (Author ID in Scopus: 56682510900) – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Mining Mechanics (tel.: +007 343 295 04 48, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Aleksandr V. Ugolnikov (Author ID in Scopus: 57206674668) – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering (tel.: +007 343 283 03 72, e-mail: ugonnikov@yandex.ru). The contact person for correspondence.

Nikolay V. Makarov (Author ID in Scopus: 57196121902) – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mining Mechanics (tel.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Aleksandr V. Lifanov (Author ID in Scopus: 57211516049) – General Director (tel.: +007 495 505 66 97, e-mail: info@oilgazmash.ru).

Введение

Конкурентоспособность горно-металлургического комплекса Российской Федерации основана на внедрении современного высокотехнологического оборудования для производства изделий и материалов с уникальными функциональными свойствами. В значительной степени это касается технологических переделов подготовки, классификации исходного сырья, существенно влияющих на качество конечного продукта.

Одним из путей повышения эффективности классификации является создание менее энергоемких разделительных аппаратов и совершенствование структуры и технологии подготовки и разделения исходного сырья [1–5].

Применение наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок, а также в качестве индивидуального материала открывает новые возможности. Так, использование нанопорошков для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании тугоплавких дисперсно-проченных композиционных материалов [6–10].

Возвратная наносодержащая глиноземная пыль в подобном случае представляет собой оборотный балласт, массовая доля которого достигает 7–14 % от общего количества получаемого глинозема. Учитывая, что годовой объем производства глинозема в Российской Федерации оценивается в 11,5 млн т, масса оборотной глиноземной пыли составляет значимую величину [7, 11, 12].

Глиноземная наносодержащая пыль, собираемая в газоочистных установках, в ходе технологического процесса получения товарного глинозема подвергается интенсивной термической обработке и механическим воздействиям. С этой точки зрения глиноземную пыль также можно рассматривать в качестве товарного продукта, обладающего определенными потребительскими свойствами. Следовательно, разработка рациональных методов использования глиноземной пыли представляет практический интерес [13–20].

Не менее важным является рынок композитных материалов и сплавов, для производства которых требуются легирующие материалы, к ним также предъявляются жесткие требования по медианным размерам и дисперсии. По прогнозам, динамика ежегодного роста потребности композиционных материалов, широко применяемых в горно-металлургическом комплексе России, составляет не менее 8 % до 2025 г. Однако их качество напрямую зависит от

того, насколько качественно используемые компоненты, легирующие добавки и в первую очередь их дисперсия фракционного состава [21–28].

Существенным недостатком данных средств классификации является небольшая эффективность формирования узкого диапазона улавливаемых фракций частиц микро- и наноразмера.

Объект и методы исследования

Предложенная в статьях [29, 30] графо-аналитическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции, подтвердившая существенное отличие механизма взаимодействия твердой частицы и капли жидкости в процессе столкновения, влияние угловой скорости вращения капли жидкости не только на кинематические параметры взаимодействия, но и на энергетические характеристики, использована в данной статье для создания математической модели гидровихревой классификации частиц компонентов техногенных минеральных образований (ТМО) по фракциям с заданной дисперсией.

Для абсолютно гидрофобных частиц, каковыми являются наночастицы, в том числе ТМО с диаметром частиц $6 \cdot 10^{-6}$ м, математически и экспериментально подтверждена гипотеза о прямой корреляции минимального диаметра полностью поглощаемых твердых частиц с угловой скоростью вращения капель жидкости при гидровихревой инерционной кинематической гетерокоагуляции. При этом физико-механические и химические свойства частиц не влияют на конечный результат процесса смачивания в диапазоне диаметров поглощаемых твердых частиц $d_{\text{ч} \omega \min} \leq d_{\text{ч}} \leq d_{\text{ч} \min}$, т.е. при кинетической энергии поступательного движения капель жидкости, превышающей порог аэродинамического барьера [31].

С учетом статей [32–36] уравнение для минимального диаметра поглощаемой гидрофобной частицы можно представить в виде

$$d_{\text{ч} \omega \min} = 24 \frac{\delta_{\text{ж-г}}}{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) V_{\text{ж}}^2} \times \left(\cos \theta \sqrt{1 - K_{\omega}^2 \cdot \omega_{\text{ж}}^4} - \sin \theta \cdot K_{\omega}^2 \cdot \omega_{\text{ж}}^2 \right), \quad (1)$$

где $d_{\text{ч} \min}$ – минимальный диаметр поглощаемой твердой частицы в условиях классической

коагуляции при $\omega_{ж} = 0$, м; $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотность частицы и газа соответственно, кг/м^3 ; $V_{ж}$, $V_{г} = V_{ч}$ – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы, м/с; $\delta_{ж-г}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость – газ», Дж/м^2 ; θ – краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость – газ», рад; $K_{\omega} = \frac{\pi \rho_{ж} d_{ч \min}^3 \sin^4 \theta}{8 \delta_{ж-г} \cos \theta}$; $\rho_{ж}$ – плотность капли жидкости, кг/м^3 . По результатам экспериментальных исследований относительная угловая скорость вращения капли жидкости $K_{\omega} \leq \omega^2 \leq 0,3$.

Коэффициент вариаций критического диаметра поглощаемых наночастиц компонентов ТМО от угловой скорости вращения капель жидкости на вариацию минимального диаметра полностью поглощаемых наночастиц получим в виде

$$K_{\omega}^d = 48 \frac{\delta_{ж-г}}{(\rho_{ч} - \rho_{г}) V_{ж}^2} \times \times K_{\omega}^2 \cos \theta (\omega_{ж}^3 - K_{\omega}^2 \cdot \omega_{ж}^7) - K_{\omega} \cdot \sin \theta \cdot \omega_{ж}. \quad (2)$$

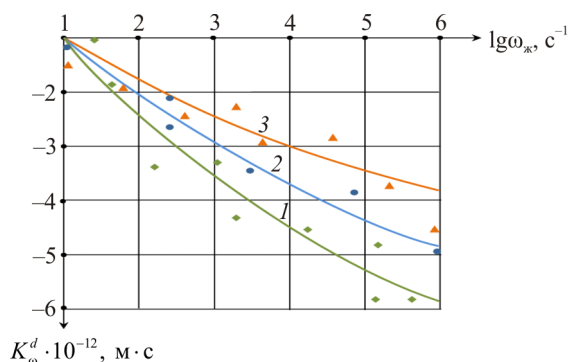


Рис. 1. Зависимость коэффициента вариации минимального диаметра поглощаемых частиц компонентов от угловой скорости вращения при гидровихревой гетерокоагуляции: 1 – уголь, 2 – окись кремния, 3 – глинозем

График зависимости коэффициента вариаций критического диаметра поглощаемых наночастиц компонентов ТМО от угловой скорости вращения при гидровихревой коагуляции для наночастиц с различным углом смачивания приведен на рис. 1.

Из анализа графиков, приведенных на рис. 1, видно, что с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости во всем рассматриваемом диапазоне изменения коэффициента вариации минимального диаметра

поглощаемых частиц компонента от угловой скорости вращения при гидровихревой гетерокоагуляции K_{ω}^d имеет отрицательное значение, т.е. гидровихревая гетерокоагуляция способствует уменьшению диаметра полностью поглощаемых частиц компонентов, при этом производная от K_{ω}^d с ростом ω уменьшается. Монотонность, идентичность характера изменения коэффициента вариации K_{ω}^d для различных компонентов ТМО подтверждает гипотезу о корреляции минимального диаметра поглощаемых частиц с угловой скоростью вращения капель жидкости при гидровихревой коагуляции. При этом эффективность влияния угловой скорости вращения капель жидкости на снижение минимального диаметра поглощаемых частиц компонентов тем выше, чем меньше удельная энергия поверхностного натяжения частиц ТМО, т.е. чем больше краевой угол смачивания.

Для практического решения задачи утилизации наночастиц ТМО в статье предложено универсальное устройство гидровихревой классификации, обеспечивающее их разделение по фракциям заданным медианным размерам и дисперсией.

Конструктивно гидровихревой классификатор Вентури включает в себя пневмотранспортный трубопровод для вертикального перемещения частиц сыпучих материалов ТМО и устройство для гидровихревого разделения частиц по фракциям за счет инерционной гетерокоагуляции их вращающимися каплями жидкости, состоит из трубы Вентури, по оси которой в критическом сечении установлен азратор с вихревыми форсунками, а по периметру – приемный кольцевой бункер.

На рис. 2 приведена принципиальная схема гидровихревого классификатора Вентури.

Классификатор Вентури содержит загрузочный питатель 1, установленный над коллектором 2 классификатора. В смесительной камере 3 размещены пористая газораспределительная перегородка 4 и патрубок 5 для подачи сжатого воздуха и формирования на входе в коллектор 2 кипящего слоя сыпучего материала ТМО. Непосредственно перед входом в трубу Вентури 7 установлен хонейкомб для выравнивания скорости движения частиц сыпучего материала по всему сечению пневмотранспортного трубопровода. В критическом сечении у трубы Вентури по ее оси установлен гидровихревой азратор с форсунками 8, а по его периметру расположен коллектор

классификации 9 с бункерами 10 сбора частиц компонентов ТМО по фракциям, на выходе из трубы Вентури находится бункер 11 для отходов, не соответствующих размерам классификации.

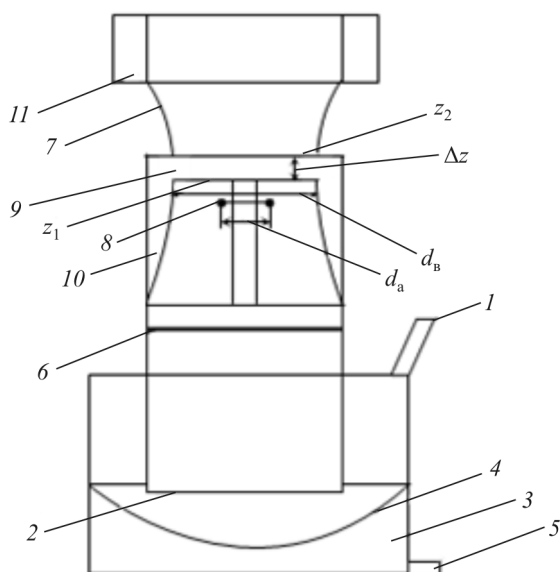


Рис. 2. Принципиальная схема гидровихревого классификатора Вентури

Классификатор Вентури работает следующим образом. Сыпучий материал частиц ТМО из загрузочного питателя 1 непрерывно направляют в смесительную камеру 3, в которую через патрубок 5 и пористую газораспределительную перегородку 4 под слой ТМО подают сжатый газ. Сжатым газом сыпучий материал аэрируют до псевдосжиженного состояния и подают через входной коллектор 2, выравнивающий хонейкомб 6 на вход в трубу Вентури 7. Капли жидкости, закрученные вокруг собственной оси в гидровихревых форсунках аэратора 8, смачивают частицы сыпучего материала, находящегося в состоянии кипящего слоя. Кинетическая энергия и скорость вращения капель жидкости обеспечивают гарантированную коагуляцию частиц сыпучего материала ТМО с заданным минимальным диаметром.

Диаметр d_a аэратора и диаметр трубы Вентури d_b в критическом сечении, а также энергию капель жидкости выбирают таким образом, чтобы коагуляция капель жидкости и частиц сыпучего материала ТМО с заданным минимальным медианным диаметром происходила в зоне до 80 % от диаметра трубы Вентури. Таким образом, в кольцевой зоне 20 % диаметра трубы Вентури по ее периметру частицы компонента ТМО в кипящем слое поднимаются в бункер отходов, не смачиваясь в силу недостаточности энергии капель жидкости

для преодоления аэродинамического энергетического барьера. Указанное необходимо для обеспечения гарантированной эффективности классификации частиц по фракциям с заданной дисперсией за счет исключения из процесса классификации зоны неустойчивой коагуляции вблизи входа в бункер классификации. Положение коллектора классификации 9 и бункера классификации 10 по отношению к плоскости расположения форсунок гидровихревого аэратора 8 определяется в соответствии с траекториями движения капель жидкости с интегрированными в них частицами сыпучего материала ТМО в процессе инерционной гидровихревой гетерокоагуляции, рассчитанными по предложенной математической модели.

Траектория движения наночастиц ТМО определяется инерционным взаимодействием наночастиц, вращающихся капель жидкости и потоком энергии кипящего слоя.

Результаты исследований

Для построения математической модели неустановившегося гидродинамического взаимодействия капли жидкости с частицами компонентов в условиях больших чисел Рейнольдса примем допущение о том, что в процессе движения капля жидкости сохраняет сферическую форму $d_{ж}$ той же плотности, что и жидкость капли, у которой аэродинамические характеристики движения в газовой среде соответствуют фактическим характеристикам движения капель при тех же числах Рейнольдса. Диаметр $d_{ж}$ принятой сферической частицы будем считать аэродинамическим диаметром капли.

Для обеспечения однозначности и определенности решения с учетом предложенной научной гипотезы примем условие, при котором энергии поступательного движения капель жидкости достаточно для преодоления аэродинамического энергетического барьера во всей области кипящего слоя частиц легирующих компонентов ТМО, т.е. $Stk_k \geq Stk_{кр}$ в диапазоне диаметра кипящего слоя не более 80 % от диаметра классификатора Вентури, а именно диаметра расположения входа в бункер классификации. Таким образом, в кольцевой зоне 20 % диаметра трубы Вентури по ее периметру частицы компонента ТМО в кипящем слое поднимаются в бункер отходов, не смачиваясь, в силу недостаточности энергии капель жидкости для преодоления аэродинамического энергетического барьера.

Учитывая равномерность распределения наночастиц компонентов в кипящем слое, дискретность траекторий идентичных частиц будет определяться их поглощением в крайних точках трубы Вентури, т.е. соответственно по периметру диаметра аэратора d_a и по периметру диаметра $d = 0,8d_b$. Для построения системы уравнений движения наночастиц компонентов с учетом предложенной гипотезы введем понятия приведенных аэродинамического диаметра и плотности наночастиц и представим их в виде [31]

$$d_{\Sigma} = \frac{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}(d_{\text{ж}}^3 + d_{\text{ч}}^3)}}{\pi}; \quad \rho_{\Sigma} = \frac{d_{\text{ж}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}} + d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{ч}}}{d_{\text{ж}}^3 + d_{\text{ч}}^3}. \quad (3)$$

Уравнение движения i -й частицы при ее полном поглощении каплей жидкости в проекции на ось Or , в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора, в соответствии с классическим уравнением Ньютона запишем в виде [37]

$$m_i \frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = F_{ri}, \quad (4)$$

где F_{ri} – сила сопротивления движению частицы компонентов ТМО в классификаторе Вентури, $F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{\text{г}} \cdot V_{\Sigma i}^2$; k_i – коэффициент сопротивления i -й частицы; $d_{\Sigma i}$ – диаметр i -й частицы, м; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³; $V_{\Sigma i}$ – скорость i -й частицы, м/с.

Уравнение движения i -й частицы в проекции на ось Oz имеет вид

$$m_i \frac{\partial V_{zi}}{\partial t} = -F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Di}, \quad (5)$$

где F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\text{г}}) g$; F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{Ci} = \frac{\phi}{2} \mu_{\text{г}} \pi d_{\Sigma i} V_{zi}$; F_{Di} – сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой, $F_{Di} = C_{\text{сг}} \rho_{\text{г}} V_{\text{г}}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2$; $C_{\text{сг}}$ – коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой, действующий на

i -ю частицу; $V_{\text{г}}$, V_{zi} – скорость сжатого газа, создающего кипящий слой, и вертикальная составляющая скорости i -й частицы, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ϕ_i – коэффициент формы частицы в законе Стокса; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, кг/мс.

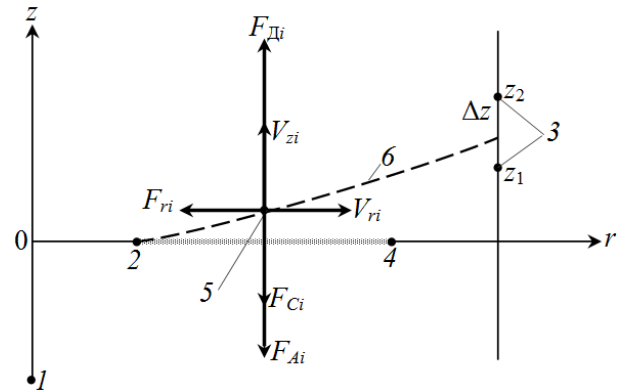


Рис. 3. Принципиальная схема движения капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО и действующие на нее силы в условиях гидровихревой классификации: 1 – ось классификатора Вентури; 2 – координата расположения гидровихревой форсунки аэратора; 3 – координаты нижней и верхней границ коллектора классификации; 4 – плоскость кипящего слоя; 5 – капля жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО; 6 – траектория движения капли жидкости с частицей компонента ТМО

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось Oz i -й частицы компонентов исходного сырья под действием управляемого направленного потока воздуха с учетом действия сил Стокса, Архимеда и силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой, может быть представлено в виде

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2} C_{\text{сг}} \rho_{\text{г}} V_{\text{г}}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\text{г}}) g}{\phi \cdot \mu_{\text{г}}}. \quad (6)$$

Уравнение (4) представляет собой уравнения гидродинамически неустойчившегося режима инерционного движения капли жидкости до и после коагуляции наночастицы компонента ТМО.

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = \frac{V_{ri}}{\tau_{qi}}, \quad (7)$$

где $\tau_{qi} = \tau_{\Sigma i} = k_i \frac{2 + 3\bar{\mu}}{3 + 3\bar{\mu}} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\text{г}})}{18\mu_{\text{г}}}$; $\bar{\mu} = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{г}}}$.

Уравнение Буссинеска позволяет определить время релаксации как капли жидкости, так и наночастицы и связывает его с коэффициентом сопротивления. При этом коэффициент сопротивления в уравнении Буссинеска соответствует k_i в уравнении (4).

Многочисленные исследования коагуляционного взаимодействия частиц компонентов с каплями жидкости до настоящего времени не позволили окончательно разобраться в механизме поглощения, не разработано эффективных способов управления этим процессом. По этой причине аэрогидродинамика неустановившегося инерционного взаимодействия капель жидкости и частиц твердого тела в области надстоксовского режима, т.е. при $Re > 1$, в динамически активной области высоконапорного распыления жидкости, требуют серьезных теоретических и экспериментальных исследований в части соотношения и взаимовлияния инерционных сил и сил вязкого трения. Динамически активный участок коагуляционного взаимодействия капель жидкости и частиц компонентов отличается непрерывным, а главное существенным изменением чисел Рейнольдса и Эйлера от значений, превышающих 10^4 , до значений менее 1 на участке инерционного пробега их в газовой среде. Экспериментальные исследования показали, что сила сопротивления возрастает существенно нелинейно с ростом числа Рейнольдса на участке надстоксовского движения в отличие от линейного роста ее при числах $Re < 1$ и при одновременном уменьшении времени релаксации τ , что существенно усложняет нахождение его фактической величины, препятствуя тем самым использованию классических уравнений стоксовского движения при коагуляции [31, 38].

Поскольку в уравнении (4) аэрогидродинамики капли жидкости в горизонтальной плоскости классификатора Вентури существенно переменной величиной является коэффициент сопротивления газовой среды движению капли жидкости k_i , установим его зависимость от физических величин, характеризующих гидродинамический процесс инерционного движения капли жидкости под действием ускорения с начальной скоростью V_0 , в форме безразмерного симплекса в условиях установившегося движения.

Уравнение зависимости коэффициента k_i от независимых переменных в виде безразмерной степенной зависимости запишем в виде [39]

$$k_i = C \cdot \mu_\Gamma^\alpha \cdot \rho_\Gamma^\beta \sqrt{V_{ri}^2 + 0,25\omega_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta^2 \cdot \omega_{\Sigma i}^2}^\gamma \times \\ \times d_{\Sigma i}^\varepsilon \cdot \left(\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{\Sigma i} - \rho_\Gamma}{\rho_\Gamma} \right)^\varphi \cdot V_0^\psi. \quad (8)$$

Для определения индикаторов подобия воспользуемся матрицей независимых размерностей, ранг которой равен трем [39].

С учетом однородной системы линейных уравнений, составленной из показателей степеней уравнения (8), матрица индикаторов подобия примет вид

	μ_Γ	ρ_Γ	$\sqrt{V_{\Sigma i}^2 + 0,25\omega_{\Sigma i}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2}$	$d_{\Sigma i}$	$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{\Sigma i} - \rho_\Gamma}{\rho_\Gamma}$	V_0
π_1	-2	2	2	2	0	0
π_2	0	0	0	1	1	-2
π_3	-2	2	0	2	0	+2

(9)

Раскрывая определители матрицы (9), получим три индикатора подобия физического процесса установившегося аэрогидродинамического движения капли жидкости в газовой среде при больших числах Рейнольдса.

$$\pi_1 = \frac{\rho_\Gamma^2 (V_{\Sigma i}^2 + 0,25\omega_{\Sigma i}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2) d_{\Sigma i}^2}{\mu_\Gamma^2} = Re_{\Sigma i}^2; \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{P_i}{\rho_\Gamma \cdot V_{0i}^2} = \frac{\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot d_{\Sigma i} (\rho_{\Sigma i} - \rho_\Gamma)}{\rho_\Gamma \cdot V_{0i}^2} = Eu_i; \quad (11)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_\Gamma^2 V_{0i}^2 d_{\Sigma i}^2}{\mu_\Gamma^2} = Re_{\Sigma i}^2. \quad (12)$$

Таким образом, уравнение (8) в критериальной форме примет вид

$$k_i = C \cdot (Re_{\Sigma i}^2)^a \cdot Eu_i^b \cdot (Re_{\Sigma i}^2)^c. \quad (13)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности C и показатели степени a , b , c в уравнении (13) определяем из уравнения установившегося движения капли жидкости в газовой среде:

$$\frac{m_i \partial V_{ri}}{\partial t} = Eu_i \cdot \rho_\Gamma \cdot V_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}. \quad (14)$$

С учетом вышеизложенного получим уравнение, связывающее между собой критерии Эйлера, Рейнольдса и коэффициент аэродина-

мического сопротивления k_i при движении капли жидкости в газовой среде:

$$k_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{Eu_i}{Re_{ж0i}^2 \cdot Re_{ж0i}^2}. \quad (15)$$

После преобразований относительно числа Рейнольдса уравнение для определения времени релаксации дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» получим в виде

$$\tau_{\text{чи}} = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) Re_{0i}^2}{Eu_i \cdot \mu_r \cdot Re_{жи}^2}. \quad (16)$$

Учитывая, что критерии Рейнольдса и Эйлера функционально связаны между собой, а главное непрерывно и существенно изменяются по длине инерционного пробега капли жидкости в условиях надстоксового режима, рассмотрим возможность решения задачи посредством осреднения кинематических параметров. Классическая теория гидродинамического движения в условиях установившегося режима позволяет в квадратурах получать выражения для времени релаксации капель жидкости и частиц компонентов в зависимости от кинематических параметров течения. В статьях [31, 38] получено выражение для изменения времени релаксации при больших числах Рейнольдса путем осреднения их значений.

С учетом вышеуказанного выражение для среднего значения коэффициента сопротивления в уравнении (4) получим в виде:

$$k_{\text{ср}i} = \frac{72}{Re_{0i}} (1 + 0,07_{0i}^{0,687}). \quad (17)$$

После соответствующих преобразований выражение для среднего значения времени релаксации дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» будет иметь вид

$$\tau_{\Sigma \text{ср}i} = 4d_{\Sigma i}^2 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)(1 + 0,07_{0i}^{0,687})(3 + 3\bar{\mu})}{Re_{0i} \cdot (2 + 3\bar{\mu})\mu_r}. \quad (18)$$

Из уравнения (18) видно, что среднее время релаксации капель жидкости с интегрированными в них компонентами ТМО является функцией квадрата диаметра капель жидкости, что позволяет использовать данный факт для разработки технологии эффективной классификации мелкодисперсных сыпучих ТМО.

Предложенный вариант поэтапного осреднения значений коэффициента сопротивления движению капли жидкости в газовой среде и времени релаксации позволяет с достаточной степенью точности использовать уравнение классической аэрогидродинамики установившегося движения капли жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса до 10^4 на длине свободного инерционного пробега капель жидкости в газовой среде.

Уравнение для расчета диаметра классификатора Вентури в критическом сечении расположения входного коллектора классификации и гидровихревых форсунок аэратора с учетом предложенной математической модели в статье [30] получим в виде

$$d_b = 2 \left(V_0 - 1,6 \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{\rho \Sigma d \Sigma m}} \right) \tau_{\Sigma \text{ср}} + d_a. \quad (19)$$

При условии, что в техническом задании на проектирование гидровихревого классификатора Вентури заложенное требование необходимо для производительности утилизации по массе сыпучих материалов ТМО Q , т/ч, определяющим фактором для проектирования будет скорость капли жидкости на выходе из гидровихревых форсунок аэратора V_0 .

В этом случае диаметр классификатора Вентури d_b определяем по формуле

$$d_b = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi \rho q V_z}}, \quad (20)$$

при этом скорость капель жидкости в процессе классификации на выходе из гидровихревых форсунок аэратора, характеризующая энергетические параметры, найдем по выражению

$$V_0 = 3,2 \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{\rho \Sigma d \Sigma m}} + \frac{d_b - d_a}{\tau_{\Sigma \text{ср}}}. \quad (21)$$

Координаты входного коллектора классификации бункера сбора частиц компонентов ТМО с заданными параметрами медианного диаметра и его дисперсии d_m , σ_m соответственно для верхней и нижней его границы вычислим по формулам

$$\begin{aligned} z_2 = \tau_{\Sigma \text{ср} \min} \times & \left(\frac{1}{2} C_c \rho_r V_r^2 d_{\Sigma \min} - \frac{1}{3} (\rho_{\Sigma \min} - \rho_r) \times \right. \\ & \times g \cdot d_{\Sigma \min}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_{ж-г} \cdot \rho_{\Sigma \min}^{-1} \cdot d_{\Sigma \min}^5 \times \\ & \left. \times d_{\Sigma \min}^{-3} \left(1 + \frac{d_a}{d_k} \right) \right) \left/ \left(\varphi \mu_r \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \cdot \delta_{ж-г} \cos \theta \rho_{\Sigma \min}^{-1} d_{\Sigma \min}^{-1}}} \right) \right); \end{aligned} \quad (22)$$

$$z_1 = \tau_{\Sigma \text{срmax}} \left(C_{\text{ср}} \rho_{\text{г}} V_{\text{г}}^2 d_{\Sigma \text{max}} - \frac{2}{3} (\rho_{\Sigma \text{max}} - \rho_{\text{г}}) g \times \right. \\ \left. \times d_{\Sigma \text{max}}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \rho_{\Sigma \text{max}}^{-1} \cdot d_{4 \text{max}}^5 \times \right. \quad (23) \\ \left. \times d_{\Sigma \text{max}}^{-3} \left(1 + \frac{d_a}{d_{\text{к}}} \right) \right) / \left(10 \phi_{\text{г}} \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \cdot \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta \rho_{\Sigma \text{max}}^{-1} d_{\Sigma \text{max}}^{-1}}} \right).$$

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований и их сравнение с результатами расчетов по предложенной математической модели.

Данные экспериментальных исследований в сравнении с расчетом по предложенной математической модели, приведенные на рис. 4, подтверждают эффективность управления минимальным диаметром поглощаемых гидрофобных частиц ТМО с помощью угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой классификации.

Данные экспериментальных исследований в сравнении с расчетом по предложенной математической модели, приведенной на рис. 4, б, подтверждают увеличение времени релаксации в процессе гидровихревой классификации частиц с большим медианным размером, что является одним из ключевых факторов, обеспечивающих классификацию микро- и наночастиц по дисперсии их медианных диаметров.

Приведенные на рис. 4, в, г результаты показывают зависимость положения входного коллектора классификации и его размера от медианного диаметра классифицируемых микро- и наночастиц ТМО и его дисперсии. Увеличение медианного диаметра монотонно уменьшает высоту положения входного коллектора классификации по плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора и его высоту. Таким образом, чем меньше медианный диаметр микро- и наночастиц подлежит классификации, тем ближе входной коллектор классификации расположен в плоскости гидровихревых форсунок. Уменьшение дисперсии медианного размера потребной фракции микро- и наночастиц требует уменьшения высоты одного коллектора классификации.

Результаты экспериментальных исследований гидровихревого классификатора Вентури, проведенных в «СМК-ТЕСТ», подтвердили достаточную для инженерных расчетов сходимость с предложенной математической моделью.

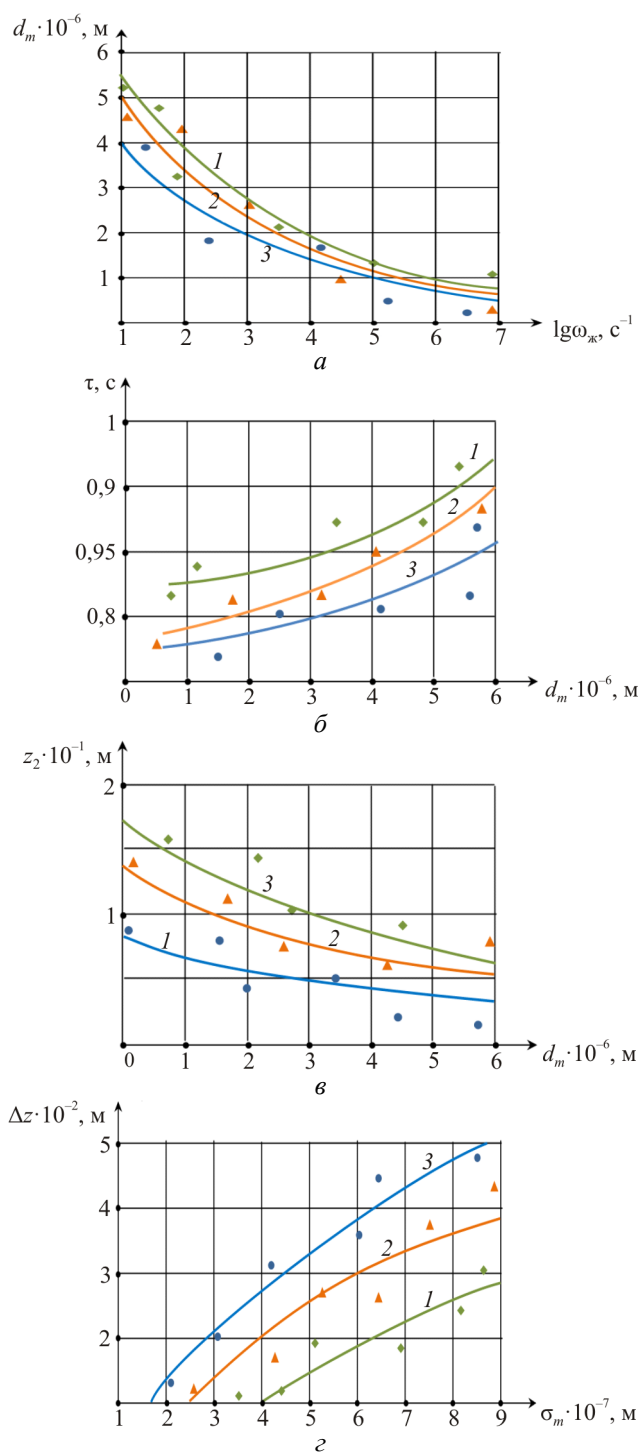


Рис. 4. Зависимость: а – медианного диаметра смачивания частиц компонента ТМО от угловой скорости вращения капель жидкости при гидровихревой классификации; б – среднего времени релаксации капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО от медианного диаметра ($Re_0 = 40$); в – координаты входного коллектора классификации от медианного диаметра частиц классификации; г – ширины входного коллектора классификатора от дисперсии медианного размера частиц классификации ($d_m = 2 \cdot 10^{-6}$ м); 1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия

Заключение

1. Управление скоростью вращения каплями жидкости в процессе гидровихревой классификации позволяет эффективно разделять на фракции с заданной дисперсией микрочастицы с номинальным диаметром от $(0,5-5,0) \cdot 10^{-6}$ м.

2. Время релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в процессе гидровихревой классификации зависит от медианного диаметра, что является основным определяющим фактором достижения высокой эффективности классификации за счет управления динамикой инерционных сил неустановившегося гидровихревого движения дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО».

3. Геометрические параметры классификатора Вентури определяются потребной производительностью и энергетическими характеристиками гидровихревого азуратора.

Библиографический список

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. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-2-59-63
2. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015. – Vol. 56, iss. 1. – P. 103–106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7
3. Давыдов С.Я. Использование кипящего слоя для энергосберегающего пневмоподъема мелкодисперсной пыли // Новые огнеупоры. – 2012. – № 9. – С. 17–22.
4. Результаты обследования схемы пневмотранспорта известковой пыли, содержащей наночастицы, на ОАО «Серовский завод ферросплавов» / С.Я. Давыдов, Р.А. Апакашев, В.С. Кийко [и др.] // Новые огнеупоры. – 2015. – № 11. – С. 17–22. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-11-17-22
5. Устройство для пневмоподъема сыпучих материалов, содержащих наночастицы: пат. 2613980 Рос. Федерация / Давыдов С.Я., Зобнин Б.Б., Апакашев Р.А., Вожегов А.В., Валиев Н.Г. – № 2015144394; заявл. 15.10.2015; опубл. 22.03.2017. – Бюл. № 9.
6. Давыдов С.Я., Семин А.Н. Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство. – М.: Кадровый резерв, 2016. – 472 с.
7. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю.И. Гордеев, А.К. Абкарян, Г.М. Зеер [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 3. – С. 174–181.
8. Использование глиноземистой пыли печей кальцинации гидроксида алюминия / С.Я. Давыдов, Н.П. Косарев, Н.Г. Валиев [и др.] // Новые огнеупоры. – 2013. – № 4. – С. 52–58. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-4-52-58
9. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Utilization of alumina calcining furnace dust containing nanoparticles // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 291–294. DOI: 10.1007/s11148-014-9711-2
10. Kovshov S.V., Kovshov V.P. Chemical technology of dust suppression on open-pit mines // International Journal of Ecology and Development. – 2015. – 30 (3). – P. 55–67.
11. Nikulin A., Kovshov S., Mráčková E. Recycling of liquid and solid waste into fuel pellets and briquettes // Production Management and Engineering Sciences – Scientific Publication of the International Conference on Engineering Science and Production Management, ESPM 2015. – 2016. – P. 223–228. DOI: 10.9774/GLEAF.9781315673790_41
12. Gendler S.G., Kovshov S.V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry // Eurasian Mining. – 2016. – 3. – P. 3–12. DOI: 10.17580/em.2016.01.08
13. Kovshov S.V., Kovshov V.P. Aero-technogenic evaluation of the drilling rig operator workplace at the open-pit coal mine // Ecology, Environment and Conservation. – 2017. – 23 (2). – P. 897–902.
14. Cecala A.B., Andrew D. Dust control handbook for industrials minerals mining and processing / Office of Mine safety and Health Research. – 2012. – P. 159.
15. Давыдов С.Я., Апакашев Р.А., Корюков В.Н. Утилизация пыли печей кальцинации глинозема, содержащей наночастицы // Новые огнеупоры. – 2014. – № 8. – С. 10–13. DOI: 10.17073/1683-4518-2014-8-10-13
16. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification

block / V.N. Makarov, V.Ya. Potapov, S.Ya. Davydov, N.V. Makarov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2017. – Vol. 38, № 3. – P. 288–292. DOI: 10.1007/s11148-017-0098-8

17. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Capturing nanoparticles in alumina production // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2016. – Vol. 57, № 1. – P. 9–12. DOI: 10.1007/S11148-016-99-17-6

18. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants / V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolniiy, N.A. Taran // *Metallurgical and mining industry*. – 2017. – № 4. – P. 8–17.

19. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Utilization of alumina calcining furnace dust containing nanoparticles // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 291–294. DOI: 10.1007/s11148-014-9711-2

20. Давыдов С.Я., Апакашев Р.А., Корюков В.Н. Улавливание наноразмерной фракции частиц глиноземного производства // *Новые огнеупоры*. – 2016. – № 2. – С. 12–15. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-2-12-15

21. Результаты обследования известковой пыли, содержащей наночастицы, на ОАО «Серовский завод ферросплавов» / С.Я. Давыдов, Р.А. Апакашев, В.С. Кийко [и др.] // *Новые огнеупоры*. – 2015. – № 3. – С. 20–21. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-11-17-22

22. Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 894, № 1 – P. 12067 DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067

23. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supplyshaft in underground mine / N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.I. Petrov // *Eurasian mining*. – 2016. – № 2. – P. 45–47. DOI: 10.17580/em.2016.02.11

24. Korshunov G.I., Kovshov S.V., Safina A.M. Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical & chemical research // *Ecology, Environment and Conservation*. – 2017. – Vol. 23, iss. 2. – P. 883–889.

25. Application of equipment for aerological researching of characteristics of wood dust / S. Kovshov, A. Nikulin, V. Kovshov, E. Mračková // *Acta Facultatis Xylologiae*. – 2015. – 57(1). – P. 111–118.

26. Фенченко В.Н., Кравченко О.В., Момот В.И. Движение заряженных диэлектрических мелко-

дисперсных частиц в аппаратах электронно-ионной технологии // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 3/10. – С. 50–53.

27. Program evaluation and information resources, standardized information system / Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. – Arlington, 2009.

28. Ханамирова А.А., Апресян Л.П., Адимосян А.Р. Получение малощелочного высокодисперсного корунда из глиноземной пыли // *Химический журнал Армении*. – 2008. – № 1. – С. 37–44.

29. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, В.В. Потапов, Э.М. Горшкова // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2018. – Т. 24, № 5. – С. 13–20. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-13-20

30. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции / В.Н. Макаров, Н.П. Косарев, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, А.В. Лифанов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 178–189. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7

31. Фролов А.В., Телегин В.А., Сечкерев Ю.А. Основы гидрообеспыливания // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2007. – № 10. – С. 1–24.

32. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control / D. Wu, K. Yin, Q. Yin, X. Zhang, J. Cheng, D. Ge, P. Zhang // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2017. – Т. 7, № 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005

33. Listak J.M., Reed W.R. Water separator shows potential for reducing respirable dust generated on small-diameter rotary blasthole drills // *Int J Min Reclam Environ*. – 2007. – № 3. – P. 160–172. DOI: 10.1080/17480930601176846

34. Математическое моделирование вихревого гидрообеспыливания на горно-обогачительных предприятиях / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, Н.С. Плотноков, В.В. Потапов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 4. – С. 210–217. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217

35. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces // *High temperature*. – 2015. – Vol. 53, № 6. – P. 928–930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X

36. Bautin S.P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. – 2014. – Vol. 52, № 2. – P. 259–263. DOI: 10.1134/S0018151X14020035

37. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

38. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.

39. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики: учеб. для вузов. – 4-е изд. – М.: Либроком, 2014. – 439 с.

References

1. Makarov V.N., Davydov S.Ia. Teoreticheskie osnovy povysheniia effektivnosti ventilatsii v tekhnologicheskikh protsessakh na promyshlennykh predpriatiiakh [Theoretical basis for the in-process ventilation systems efficiency increasing at industrial enterprises]. *Novye ognepory*, 2015, no.2, pp.59-63. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-2-59-63

2. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2015, vol.56, iss.1, pp.103-106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7

3. Davydov S.Ia. Ispolzovanie kipiashchego sloia dlia energosberegaiushchego pnevmopodema melkodispersnoi pyli [Use of a fluidized bed for energy-saving pneumatic lifting of fine dust]. *Novye ognepory*, 2012, no.9, pp.17-22.

4. Davydov S.Ia., Apakashev R.A., Kiiko V.S. et al. Rezultaty obsledovaniia skhemy pnevmotransporta izvestkovoi pyli, soderzhashchei nanochastitsy, na OAO “Serovskii zavod ferrosplavov” [The results of the inspection of the scheme of pneumatic transport of lime dust containing nanoparticles at OJSC “Serov Ferroalloy Plant”]. *Novye ognepory*, 2015, no.11, pp.17-22. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-11-17-22

5. Davydov S.Ia., Zobnin B.B., Apakashev R.A., Vozhegov A.V., Valiev N.G. Ustroistvo dlia pnevmopodema sypuchikh materialov, soderzhashchikh nanochastitsy [Device for pneumatic lifting of bulk materials containing nanoparticles]: patent 2613980 Russian Federation, 2017.

6. Davydov S.Ia., Semin A.N. Energo-sberegaiushchee oborudovanie pnevmaticheskogo transporta: vchera, segodnia, zavtra: teoriia,

raschet, issledovaniia, proizvodstvo [Energy-saving equipment for pneumatic transport: yesterday, today, tomorrow: theory, calculation, research, production]. Moscow, Kadrovyy rezerv, 2016, 472 p.

7. Gordeev Iu.I., Abkarian A.K., Zeer G.M. et al. Vliianie dobavok legiruiushchikh keramicheskikh nanochastits na strukturnye parametry i svoystva tverdykh splavov [Effect of alloying additives of the ceramic nanoparticles on the structural parameters and properties of hard alloys]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2013, no.3, pp.174-181.

8. Davydov S.Ia., Kosarev N.P., Valiev N.G. et al. Ispolzovanie glinozemistoi pyli pechei kaltsinatsii gidroksida aliuminiia [The application of aluminous dust after aluminum hydroxide kiln calcining]. *Novye ognepory*, 2013, no.4, pp.52-58. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-4-52-58

9. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Utilization of alumina calcining furnace dust containing nanoparticles. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2014, vol.55, no.4, pp.291-294. DOI: 10.1007/s11148-014-9711-2

10. Kovshov S.V., Kovshov V.P. Chemical technology of dust suppression on open-pit mines. *International Journal of Ecology and Development*, 2015, 30(3), pp.55-67.

11. Nikulin A., Kovshov S., Mráčková E. Recycling of liquid and solid waste into fuel pellets and briquettes. *Production Management and Engineering Sciences*, 2016, pp. 223-227. DOI: 10.9774/GLEAF.9781315673790_41

12. Gendler S.G., Kovshov S.V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry. *Eurasian Mining*, 2016, 3, pp.3-12. DOI: 10.17580/em.2016.01.08

13. Kovshov S.V., Kovshov V.P. Aerotechnogenic evaluation of the drilling rig operator workplace at the open-pit coal mine. *Ecology, Environment and Conservation*, 2017, 23 (2), pp.897-902.

14. Cecala A.B., Andrew D. Dust control handbook for industrials minerals mining and processing. Office of Mine safety and Health Research, 2012, p.159.

15. Davydov S.Ia., Apakashev R.A., Koriukov V.N. Utilizatsiia pyli pechei kaltsinatsii glinozema, soderzhashchei nanochastitsy [The recycling of the alumina calciner kiln dust containing

nanoparticles]. *Novye ognepory*, 2014, no.8, pp.10-13. DOI: 10.17073/1683-4518-2014-8-10-13

16. Makarov V.N., Potapov V.Ya., Davydov S.Ya., Makarov N.V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block. *Refractions and Industrial Ceramics*, 2017, vol. 38, no.3, pp.288-292. DOI: 10.1007/s11148-017-0098-8

17. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Capturing nanoparticles in alumina production. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, no.1, pp.9-12. DOI: 10.1007/S11148-016-99-17-6

18. Lyashenko V.I., Gurin A., Topolny F.F., Taran N.A. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no.4, pp.8-17.

19. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N. Utilization of alumina calcining furnace dust containing nanoparticles. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2014, vol.55, iss.4, pp.291-294. DOI: 10.1007/s11148-014-9711-2

20. Davydov S.Ia., Apakashev R.A., Koriukov V.N. Ulavlivanie nanorazmernoi fraktsii chastits glinozemnogo proizvodstva [The collection of nanoscale particles in alumina production]. *Novye ognepory*, 2016, no.2, pp.12-15. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-2-12-15

21. Davydov S.Ia., Apakashev R.A., Kiiko V.S. et al. Rezultaty obsledovaniia izvestkovoi pyli, soderzhashchei nanochastitsy, na OAO "Serovskii zavod ferrosplavov" [The results of the examination of calcareous dust containing nanoparticles at the Serov Ferroalloy Plant OJSC]. *Novye ognepory*, 2015, no.3, pp.20-21. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-11-17-22

22. Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol.894, no.1, pp.12067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067

23. Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Nikolaev A.V., Petrov A.I. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supplyshaft in underground mine. *Eurasian mining*, 2016, no.2, pp.45-47. DOI: 10.17580/em.2016.02.11

24. Korshunov G.I., Kovshov S.V., Safina A.M. Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical & chemical research. *Ecology,*

Environment and Conservation, 2017, vol.23, iss.2, pp.883-889.

25. Kovshov S., Nikulin A., Kovshov V., Mračková E. Application of equipment for aerological researching of characteristics of wood dust. *Acta Facultatis Xylogiae*, 2015, 57(1), pp.111-118.

26. Fenchenko V.N., Kravchenko O.V., Momot V.I. Dvizhenie zariazhennykh dielektricheskikh melkodispersnykh chastits v apparatakh elektronno-ionnoi tekhnologii [The movement of charged dielectric fine particles in the apparatus of electron-ion technology]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2012, no.3/10, pp.50-53.

27. Program evaluation and information resources, standardized information system. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. Arlington, 2009.

28. Khanamirova A.A., Apresian L.P., Adimosian A.R. Poluchenie maloshchelchnogo vysokodispersnogo korunda iz glinozemnoi pyli [Preparation of low-alkali high-dispersity corundum from the alumina dust]. *Khimicheskii zhurnal Armenii*, 2008, no.1, pp.37-44.

29. Makarov V.N., Makarov N.V., Potapov V.V., Gorshkova E.M. Perspektivnyi sposob povysheniia effektivnosti vysokonapornogo gidroobespylivaniia A promising method of high-pressure hydro-dusting efficiency increasing]. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, vol.24, no.5, pp.13-20. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-13-20

30. Kosarev N.P., Makarov V.N., Makarov N.V., Ugolnikov A.V., Lifanov A.V. Effective localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.18, no.2, pp.178-189. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7

31. Frolov A.V., Telegin V.A., Sechkerev Iu.A. Osnovy gidroobespylivaniia [Water dedusting basics]. *Bezopasnost zhiznedielatnosti*, 2007, no.10, pp.1-24.

32. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2017, vol.7, no.1, pp.5-20. DOI: 10.3390/APP7010005

33. Listak J.M., Reed W.R. Water separator shows potential for reducing respirable dust generated on small-diameter rotary blasthole drills. *Int J Min Reclam Environ*, 2007, no.3, pp.160-172. DOI: 10.1080/17480930601176846

34. Makarov V.N., Makarov N.V., Plotnikov N.S., Potapov V.V. Matematicheskoe modelirovanie vikhrevogo gidroobespylivaniia na gorno-obogatitelnykh predpriatiiakh [Mathematical modeling of vortex hydrodedusting at mining and processing plants]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 2018, no.4, pp.210-217. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217
35. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces. *High temperature*, 2015, vol.53, no.6, pp.928-930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X
36. Bautin S.P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. *High temperature*, 2014, vol.52, no.2, pp.259-263. DOI: 10.1134/S0018151X14020035
37. Loitsianskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Drofa, 2003, 840 p.
38. Fuks N.A. Mekhanika aerolei [Aerosol mechanics]. Moscow, Izdatelstvo AN SSSR, 1955, 352 p.
39. Venikov V.A. Teoriia podobiia i modelirovaniia primenitelno k zadacham elektroenergetiki [The theory of similarity and modeling in relation to the problems of the electric power industry]. Moscow, Librokom, 2014, 439 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Эффективный способ гидровихревой классификации тонкодисперсных техногенных минеральных отходов в горно-металлургическом комплексе / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, А.В. Угольников, Н.В. Макаров, А.В. Лифанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №4. – С.388–400. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.4.7

Please cite this article in English as:

Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V., Lifanov A.V. Effective method for hydrochemical classification of thin-dispersed technogenic mineral waste in the mining and metallurgical complex. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.4, pp.388-400. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.4.7