УДК 622.23.05 DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-40-49

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

EFFICIENT METHOD OF RECYCLING OF FINELY DISPERSED MAN-MADE WASTES OF MINING AND METALLURGICAL PRODUCTION



В. Н. Макаров, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург uk.intelnedra@gmail.com

V. Makarov, Ural State Mining University, Yekaterinburg



А. В. Угольников, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург ugolnikov@yandex.ru

A. Ugolnikov, Ural State Mining University, Yekaterinburg



Н. В. Макаров, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург mnikolay84@mail.ru

N. Makarov, Ural State Mining University, Yekaterinburg



А.В.Лифанов, ООО Научнопроизводственный комплекс «ОйлГазМаш», г.Подольск info@oilgazmash.ru

A. Lifanov, OilGasMash Research and Production Complex LLC, Podolsk

Эффективность утилизации техногенных минеральных образований (TMO) ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианным размерам и дисперсности их частиц. Существенными факторами, сдерживающими внедрение эффективности утилизации мелкодисперсных TMO, являются не совершенство техники и технологии и отсутствие должной классификации. Жесткие требования стратификации по дисперсии медианных размеров улавливаемых наночастиц сыпучего материала TMO обусловлены необходимостью поиска способов и технических средств их реализации, которые в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров наночастиц будут эффективными. Для обеспечения качественного сырья в производстве материалов с уникальными свойствами необходима технология, в которой управляющее внешнее воздействие на процесс классификации по дисперсии медианного размера будет автомодельно, т. е. независимо от вероятностных характеристик физико-механических свойств TMO.

Создание эффективного способа и технологии гидровихревой классификации в кипящем слое наночастиц ТМО и разработка математического аппарата для расчета его геометрических и энергетических характеристик основаны на гипотезе о том, что в диапазоне кинетической энергии поступательного движения капли жидкости, обеспечивающей полное поглощение наночастиц с максимальным диаметром их гидрофобности инерционные силы движения наночастиц в плоскости кипящего слоя на порядок больше инерционных сил в направлении его движения. При этом минимальный диаметр полностью поглощаемых наночастиц зависит лишь от величины угловой скорости вращения капли жидкости.

Построена математическая модель гидровихревой стратификации микро- и наночастиц TMO для определения оптимальных геометрических параметров и энергетических характеристик гидровихревого стратификатора Вентури, его аэратора, положения приемных бункеров. Получены уравнения движения капли жидкости в условиях неустановившегося гидродинамического инерционного надстоксовского движения в процессе стратификации в функции критерииев Эйлера и Рейнольдаса. Подтверждена зависимость диаметра полностью поглощаемых частиц компонентов сыпучих TMO от угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой классификации. Установлена зависимость времени релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в процессе гидровихревой классификации от их медианного размера. Получено уравнение для расчета геометрических параметров стратификатора Вентури от потребной производительности и энергетических характеристик гидровихревого аэратора. Проведены испытания опытно-промышленного образца гидровихревого стратификатора Вентури ГСВ-350

Ключевые слова: утилизация; стратификация; классификация; гидровихревая гетерокоагуляция; труба Вентури; критерии Рейнольда и Эйлера; мелкодисперсные техногенные отходы; горно-металлургическое производство; минеральные образования; мелкодисперсные ТМО

Numerous studies show that the efficiency of recycling of technogenic or man-made mineral formations (TMF) is limited by high requirements for fractional composition, median sizes and their particles dispersion. Crucial factor constraining the implementation of recycling efficiency of finely dispersed technogenic mineral formations (TMF) is a weak sufficiency of technique and technology and their classification. Strict stratification requirements for the median sizes dispersion of absorbed nanoparticles of a bulk TMF material specify the necessity of the search for the methods and technical means of their implementation, which, under the conditions of probability distribution of physical and mechanical, geometric, kinematic parameters of nanoparticles, can effectively implement them. To ensure high-quality raw materials in the production of materials with unique properties it is necessary to find the technology in which the controlling external influence on the classification process of median size dispersion will be self-similar, i.e. independent of probabilistic characteristics of TMF physical and mechanical properties.

The creation of the effective method and technology of hydrovortex classification in a TMF particles fluidized bed and the development of mathematical tools for calculating its geometric and energy characteristics are based on a hypothesis that: in the range of kinetic energy of the translational motion of a liquid droplet ensuring the complete absorption of nanoparticles with maximum diameter of their hydrophobic behavior the inertial forces of nanoparticles motion in the plane of a fluidized bed by an order of magnitude more than the inertial forces in the direction of its motion. Herewith the minimum diameter of totally absorbed nanoparticles depends only on the value of the angular velocity of liquid droplet rotation.

A mathematical model of hydrovortex stratification of TMF micro-and nanoparticles has been developed to determine the optimum geometrical parameters and energy characteristics of a hydrovortex Venturi stratifier, its aerator and the position of the receiving hoppers. Equations of the liquid droplet motion under the conditions of unsteady hydrodynamic inertial suprastock motion in the process of stratification in the function of Euler and Reynolds numbers have been obtained. The dependence of the diameter of totally absorbed particles of bulk TMF components on the angular velocity of liquid droplets rotation in the process of hydrovortex classification has been confirmed. The dependence of the relaxation time of liquid droplets with TMF micro- and nanoparticles integrated in them in the process of hydrovortex classification on their median size has been set up. An equation for calculating geometrical parameters of a Venturi stratifier on the required performance and energy characteristics of a hydrovortex Venturi classifier GKV-280 have been carried out

Key words: Recycling; stratification; classification; hydrovortex heterocoagulation; Venturi pipe; Reynolds and Euler numbers; fine technogenic waste; mining and metallurgical production; mineral formations; fine technogenic mineral formations

Ведение. Конкурентоспособность горнометаллургического комплекса (ГМК) РФ основана на внедрении современного высокотехнологичного 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 [10; 13].

Применение наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок, в качестве индивидуального материала открывает новые возможности применения известных веществ. Так, использование нанопорошков для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании тугоплавких дисперсно-упрочненных композиционных материалов [1]. Возвратная наносодержащая глиноземная пыль в подобном случае представляет собой оборотный балласт, массовая доля которого достигает 7...14 % от общего количества получаемого глинозема. Годовой объем производства глинозема в Российской Федерации оценивается в 11,5 млн т, т. е. масса оборотной глиноземной пыли составляет значимую величину [9; 12].

По прогнозам исследователей, ежегодный рост потребности композиционных материалов, широко применяемых в ГМК РФ, составит не менее 8 % к 2025 г. Однако их качество напрямую зависит от того, насколько качественны используемые компоненты, легирующие добавки и, в первую очередь, дисперсия их фракционного состава [7; 11]. Существенным недостатком используемых средств классификации является низкая эффективность формирования узкого диапазона улавливаемых фракций частиц микро- и наноразмера.

Объект и методы исследования. Предложенная в трудах ряда авторов [2; 3] графоаналитическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции, которая подтвердила существенное отличие механизма взаимодействия твердой частицы и капли жидкости в процессе столкновения, влияние угловой скорости вращения капли жидкости и на кинематические параметры взаимодействия, и на энергетические характеристики, в данной статье использована для создания математической модели гидровихревой классификации частиц компонентов ТМО (техногенных минеральных частиц) по фракциям с заданной дисперсией.

Для абсолютно гидрофобных частиц, каковыми являются наночастицы, в том числе ТМО с диаметром частиц 6·10⁻⁶ 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 [2].

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

Конструктивно гидровихревой стратификатор Вентури включает в себя пневмотранспортный трубопровод для вертикального перемещения частиц сыпучих материалов ТМО и устройство для гидровихревого разделения частиц по фракциям за счет их инерционной гетерокоагуляции вращающимися каплями жидкости, состоящее из трубы Вентури по оси которой в критическом сечении установлен аэратор с вихревыми форсунками, а по периметру – приемный кольцевой бункер. На рис. 1. приведена принципиальная схема гидровихревого стратификатора Вентури.



Рис. 1. Принципиальная схема гидровихревого стратификатора Вентури / Fig. 1. A schematic diagram of a hydrovortex Venturi stratifier

Стратификатор Вентури содержит загрузочный питатель 1, установленный над коллектором 5 стратификатора. В смесительной камере 3 установлены пористая газораспределительная перегородка 2 и патрубок 4 для подачи сжатого воздуха и формирования на входе в коллектор 5 кипящего слоя сыпучего материала ТМО. Непосредственно перед входом в трубу Вентури 10 установлен хонейкомб 6 для выравнивания скорости движения частиц сыпучего материала по всему сечению пневмотранспортного трубопровода. В критическом сечении у трубы Вентури по ее оси установлен гидровихревой аэратор с форсунками 8, а по его периметру расположен коллектор стратификации 9 с бункерами 7 сбора частиц компонентов ТМО по фракциям, на выходе из трубы Вентури установлен бункер 11 для отходов, не соответствующих размерам классификации.

Стратификатор Вентури работает следующим образом. Сыпучий материал частиц ТМО из загрузочного питателя 1 непрерывно направляют в смесительную камеру 3, в которую через патрубок 4 через пористую газораспределительную перегородку 2 под слой ТМО подают сжатый газ. Сжатым газом сыпучий материал аэрируют до псевдосжиженного состояния и подают через входной коллектор 5 пневмотранспортного трубопровода 3, выравнивающий хонейкомб 6 на вход в трубу Вентури 10. 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 заранее заданным минимальным диаметром.

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, что в процессе движения капля жидкости сохраняет сферическую форму d_{q} 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_{q} принятой сферической частицы будем считать аэродинамическим диаметром капли.

С учетом равномерности 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 $d = 0,8 d_{\rm B}$. Для построения системы уравнений движения наночастиц компонентов в свете предложенной гипотезы введем понятия аэродинамического диаметра и плотности наночастиц и представим их в виде

$$d_{\Sigma} = \frac{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \left(d_{\pi}^{3} + d_{q}^{3} \right)}}{\pi}; \ \rho_{\Sigma} = \frac{d_{\pi}^{3} \cdot \rho_{\pi} + d_{q}^{3} \cdot \rho_{q}}{d_{\pi}^{3} + d_{q}^{3}}.$$
(1)

Уравнение движения *i*-й частицы при ее полном поглощении каплей жидкости в проекции на ось 0*r* в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора в соответствии с классическим уравнением Ньютона запишем в виде

$$m_i \frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = F_{ri}, \qquad (2)$$

где $F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{\Gamma} \cdot V_{\Sigma i}^2$ – сила сопротивления движению частицы компоненты ТМО в стратификаторе Вентури;

*k*_i – коэффициент сопротивления *i*-й частицы;

 $d_{\Sigma i}$ – диаметр і-й частицы, м;

 ρ_{r} – плотность газа, кг/м³;

 $V_{\Sigma i}$ – скорость і-й частицы, м/с.



Рис. 2. Принципиальная схема движения капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО и действующие на нее силы в условиях гидровихревой классификации / Fig. 2. A schematic diagram of a liquid droplet motion with a TMF component particle integrated into it and the forces affecting it under the conditions of hydrovortex classification

Уравнение движения *i*-й частицы в проекции на ось 0*z* имеет вид

$$m_i \frac{\partial V_{zi}}{\partial t} = -F_{Ai} - F_{Ci} + F_{\mathcal{I}i}, \qquad (3)$$

где F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на *i*-ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)_{\mathcal{B}};$ F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обу-

 F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{Ci} = \frac{\varphi}{2} \mu_{\rm r} \pi d_{\Sigma i} V_{zi};$

*F*_{ді} – сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой, $F_{I\!I\!j} = C_c \rho_{\Gamma} V_{ri}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2;$

С. - коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой действующий на і-ю частицу;

 $V_{r_{i}}$, $V_{z_{i}}$ – скорость сжатого газа, создающего кипящий слой и вертикальная составляющая скорости і-ю частицы, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

φ_i – коэффициент формы частицы в законе Стокса;

 µ – коэффициент динамической вязкости воздуха, кг/мс.

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось 0z 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

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2}C_{c}\rho_{r}V_{ri}^{2}d_{\Sigma i} - \frac{1}{3}d_{\Sigma i}^{2}(\rho_{\Sigma i} - \rho_{r})g}{\phi \cdot \mu_{r}}.$$
 (4)

Выражение (4) представляет собой уравнение гидродинамически неустановившегося режима инерционного движения капли жидкости до и после коагуляции наночастицы компонента ТМО

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = \frac{V_{ri}}{\tau_{ui}}, \qquad (5)$$

$$\Gamma \text{ pe } \tau_{ui} = \tau_{\Sigma i} = k_i \frac{2 + 3\overline{\mu}}{3 + 3\overline{\mu}} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\Gamma})}{18\mu_{\Gamma}}; \ \overline{\mu} = \frac{\mu_{\pi}}{\mu_{\Gamma}}.$$

 μ_r

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 (2).

Экспериментальные исследования показали, что сила сопротивления возрастает существенно нелинейно с ростом числа Рейнольдса на участке надстоксовского движения в отличие от ее линейного роста при числах Re < 1 и при одновременном уменьшении времени релаксации (т), что существенно усложняет нахождение его фактической величины, препятствуя применению классических уравнений стоксовского движения при коагуляции [4; 5].

Поскольку в уравнении (2) аэрогидродинамики капли жидкости в горизонтальной

плоскости стратификатора Вентури существенно переменной величиной является коэффициент сопротивления газовой среды движению капли жидкости k, установим его зависимость от физических величин, характеризующих гидродинамический процесс инерционного движения капли жидкости под действием ускорения с начальной скоростью V_о в форме безразмерного симплекса в условиях установившегося движения.

Уравнение зависимости коэффициента k, от независимых переменных в виде безразмерной степенной зависимости представим в виде

$$k_{i} = C \cdot \mu_{\Gamma}^{\alpha} \cdot \rho_{\Gamma}^{\beta} \sqrt{V_{ri}^{2} + 0.25d_{\Sigma i}^{2} \sin \theta^{2} \cdot \omega_{\mathcal{K}}^{2^{-1}}} \cdot d_{\Sigma i}^{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{\mathcal{K}} - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}\right)^{\phi} \cdot V_{0}^{\Psi} .$$
(6)

С учетом уравнений (2) и (3) положения В. А. Веникова о подобии сложных систем получим индикаторы подобия π физического процесса установившегося аэрогидродинамического движения капли жидкости в газовой среде при больших числах Рейнольдса

$$\pi_{1} = \frac{\rho_{\Gamma}^{2} \left(V_{ri}^{2} + 0.25 \omega_{\pi}^{2} \cdot d_{\Sigma i}^{2} \cdot \sin \theta \omega \right) d_{\Sigma i}^{2}}{\mu_{\Gamma}^{2}} = \operatorname{Re}_{\Sigma \omega i}^{2};$$

$$\pi_{2} = \frac{P_{i}}{\rho_{\Gamma} \cdot V_{0}^{2}} = \frac{\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot d_{\Sigma i} \left(\rho_{\pi} - \rho_{\Gamma} \right)}{\rho_{\Gamma} \cdot V_{0}^{2}} = \operatorname{Eu}_{i};$$

$$\pi_{3} = \frac{\rho_{\Gamma}^{2} V_{0}^{2} d_{\Sigma i}^{2}}{\mu_{\Gamma}^{2}} = \operatorname{Re}_{\Sigma 0 i}^{2}.$$
(7)

Таким образом, уравнение (6) в критериальной форме примет вид

$$k_i = C \cdot \left(\operatorname{Re}_{\mathfrak{R} \otimes i}^2 \right)^a \cdot \operatorname{Eu}_i^b \cdot \left(\operatorname{Re}_{\mathfrak{R} \otimes 0i}^2 \right)^c.$$
(8)

Численные значения коэффициента пропорциональности С и показатели степени *a*, *b*, *c* в уравнении (8) определяем из уравнения установившегося движения капли жидкости в газовой среде

$$\frac{m_i \partial V_{ri}}{\partial t} = \mathrm{Eu}_i \cdot \rho_{\mathrm{r}} \cdot V_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}.$$
(9)

Уравнение, связывающее между собой критерии Эйлера, Рейнольдса и коэффициент аэродинамического сопротивления k, при движении капли жидкости в газовой среде получим в виде

$$k_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\operatorname{Eu}_i}{\operatorname{Re}_{\mathrm{woi}}^2 \cdot \operatorname{Re}_{\mathrm{w0i}}^2}.$$
 (10)

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

$$\tau_{\mathrm{v}i} = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\mathrm{r}}) \mathrm{Re}_{0i}^2}{\mathrm{Eu}_i \cdot \mu_{\mathrm{r}} \cdot \mathrm{Re}_{\pi i}^2} \,. \tag{11}$$

Учитывая, что критерии Рейнольдса и Эйлера функционально связаны между собой, а главное непрерывно и существенно изменяются по длине инерционного пробега капли жидкости в условиях надстоксовского 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 труде «Механика аэрозолей» [5] получено выражение для изменения времени релаксации при больших числах Рейнольдса путем осреднения их значений.

В этой связи получим выражение для среднего значения коэффициента сопротивления в уравнении (4)

$$k_{\rm cpi} = \frac{72}{{\rm Re}_{0i}} \left(1 + 0.07_{0i}^{0.687} \right).$$
(12)

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

$$\tau_{\Sigma cpi} = 4d_{\Sigma i}^2 \frac{\left(\rho_{\Sigma i} - \rho_{\Gamma}\right)\left(1 + 0.07_{0i}^{0.687}\right)\left(3 + 3\overline{\mu}\right)}{\text{Re}_{0i} \cdot (2 + 3\overline{\mu})\mu_{\Gamma}}.$$
 (13)

Из уравнения (13) 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 TMO.

Предложенный вариант поэтапного осреднения значений коэффициента сопротивления движения 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 10⁴ на длине свободного инерционного пробега капель жидкости в газовой среде.

Уравнение для расчета диаметра стратификатора Вентури в критическом сечении расположения входного коллектора стратификации и гидровихревых форсунок аэратора с учетом предложенной математической модели в статье «Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции» [2] получим в виде

$$d_{\rm B} = 2 \left(V_0 - 1.6 \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{\rm \#-r} \cos\theta}{\rho_{\rm \Sigma} d_{\rm \Sigma m}}} \right) \tau_{\rm \Sigma cp} + d_{\rm a} \,. \tag{14}$$

Координаты входного коллектора стратификации бункера сбора частиц компонентов ТМО с заданными параметрами медианного диаметра и его дисперсии d_m , σ_m соответственно для верхней и нижней его границ, определяем по формулам:

$$z_{2} = \frac{\frac{1}{2}C_{c}\rho_{r}V_{r}^{2}d_{\Sigma\min} - \frac{1}{3}(\rho_{\Sigma\min} - \rho_{r})g \cdot d_{\Sigma\min}^{2} - 5 \cdot 10^{-4}\omega_{0} \cdot \omega_{a} \cdot \rho_{\pi} \cdot \rho_{\Sigma\min}^{-1} \cdot d_{\Sigma\min}^{5} \cdot d_{\Sigma\min}^{-3}\left(1 + \frac{d_{\pi}}{d_{\kappa}}\right)}{\varphi\mu_{r}\ln\frac{V_{0}}{\sqrt{6 \cdot \delta_{\pi-r}\cos\theta\rho_{\Sigma\min}^{-1}d_{\Sigma\min}^{-1}}}}, \tau_{\Sigma cpmin};$$
(15)

$$z_{1} = \frac{C_{c}\rho_{r}V_{r}^{2}d_{\Sigma\max} - \frac{2}{3}(\rho_{\Sigma\max} - \rho_{r})g \cdot d_{\Sigma\max}^{2} - 5 \cdot 10^{-4}\omega_{0} \cdot \omega_{a} \cdot \rho_{\pi} \cdot \rho_{\Sigma\max}^{-1} \cdot d_{4\max}^{5} \cdot d_{\Sigma\max}^{-3}(1 + \frac{d_{s}}{d_{\kappa}})}{10\varphi\mu_{r}\ln\frac{V_{0}}{\sqrt{6 \cdot \delta_{\pi-r}\cos\varphi\rho_{\Sigma\max}^{-1}d_{\Sigma\max}^{-1}}}}.$$
(16)

На рис. 3...5 представлены результаты экспериментальных исследований и их срав-

нение с результатами расчетов по предложенной математической модели.



Рис. 3. Зависимость среднего времени релаксации капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента TMO от медианного диаметра: 1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия; Re₀=4·10⁻⁶, м / Fig. 3. The dependence of the mean relaxation time of a liquid droplet with a TMF component particle integrated into it on a median diameter: 1 – coal; 2 – silicon oxide; 3 – aluminum oxide; Re₀=4·10⁻⁶, m



Рис. 4. Зависимость координаты входного коллектора стратификации от медианного диаметра частиц классификации: 1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия / Fig. 4. The dependence of the coordinate of an input stratification collector on a median diameter of classification particles: 1 – coal; 2 – silicon oxide; 3 – aluminum oxide

Данные экспериментальных исследований в сравнении с расчетом по предложенной математической модели, приведенной на рис. 3, подтверждают увеличение времени релаксации в процессе гидровихревой стратификации 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, 5 результаты показывают зависимость положения входного коллектора стратификации и его размера от медианного диаметра классифицируемых микро- и наночастиц ТМО и его дисперсии. Увеличение медиального диаметра монотонно уменьшает высоту положения входного коллектора стратификации по плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора и его высоту. Таким образом, чем меньше медианный диаметр микро- и наночастиц подлежит классификации, тем ближе входной коллектор стратификации расположен в плоскости гидровихревых форсунок. Уменьшение дисперсии медианного размера потребной фракции микро- и наночастиц требует уменьшения высоты одного коллектора стратификации.



Рис. 5. Зависимость ширины входного коллектора стратификатора от дисперсии медианного размера частиц классификации: 1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия; d_m = 2·10⁻⁶ м / Fig. 5. The dependence of the width of an input stratifier collector on the dispersion of a median size of classified particles: 1 – coal; 2 – silicon oxide; 3 – aluminum oxide; d_r = 2·10⁻⁶ m

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

Заключение. 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)·10⁻⁶ м. 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».

Геометрические параметры стратификатора Вентури определяются потребной производительностью и энергетическими характеристиками гидровихревого аэратора.

Список литературы _

1. Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М., Лепешев А. А. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 3. С. 174–181.

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

3. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Потапов В. В., Горшкова Э. М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24, № 5. С. 13–20.

4. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкарев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1–24.

5. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 352 с.

6. Ханамирова А. А., Апресян Л. П., Адимосян А. Р. Получение малощелочного высокодисперсного корунда из глиноземной пыли. Ереван: Химический журнал Армении. 2008. Т. 61, № 1. С. 37–44.

7. 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 supply shaft in underground mine // Eurasian mining. 2016. No. 2. P. 45–47.

8. Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Korukov V. N. Capturing Nanoparticles in Alumina Production // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57, No. 1. P. 9–12.

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. P. 291–294.

10. 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, No. 2. P. 883–889.

11. Lyashenko V. I., Gurin A. a., Topolniy 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. P. 8–17.

12. 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, No. 1. P. 103–106.

13. Nikulin A., Kovshov S., Mrachkova E. Recycling of liquid and solid waste into fuel pellets and briquettes // Production Management and Engineering Sciences: collection of articles of the International conference ESPM 2015. 2016. P. 223–228.

14. 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. P. 5–20.

References

1. Gordeev Yu. I., Abkaryan A. K., Zeer G. M., Lepeshev A. A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva* (Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev), 2013, no. 3, pp. 174–181.

2. Kosarev N. P., Makarov V. N., Makarov N. V., Ugolnikov A.V., Lifanov A. V. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo (Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining), 2018, vol. 18, no. 2, pp.178–189.

3. Makarov V. N., Makarov N. V., Potapov V. V., Gorshkova E. M. Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta (Transbaikal State University Journal), 2018, vol. 24, no. 5, pp. 13–20.

4. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti* (Life safety), 2007, no. 10, pp. 1–24.

5. Fuchs N. A. *Mekhanika aerozoley* (Mechanics of aerosols). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. 352 p.

6. Khanamirova A. A., Apresyan L. P., Adimosyan A. R. *Erevan: Himicheskiy zhurnal Armenii* (Erevan: Chemical Journal of Armenia), 2008, vol. 61, no. 1, pp. 37–44.

7. Alymenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev A. V., Petrov A. I. *Eurasian mining* (Eurasian Mining), 2016, no. 2, pp. 45–47.

8. Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Korukov V. N. *Refractories and Industrial Ceramics* (Refractories and Industrial Ceramics), 2016, vol. 57, no. 1, pp. 9–12.

9. Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Korukov V. N. *Refractories and Industrial Ceramics* (Refractories and Industrial Ceramics), 2014, vol. 55, no. 4, pp. 291–294.

10. Korshunov G. I., Kovshov S. V., Safina A. M. *Ecology, Environment and Conservation* (Ecology, Environment and Conservation), 2017, vol. 23, no. 2, pp. 883–889.

11. Lyashenko V. I., Gurin A. A., Topolniy F. F., Taran N. A. *Metallurgical and mining industry* (Metallurgical and mining industry), 2017, no. 4, pp. 8–17.

12. Makarov V. N., Davydov S. Ya. *Refractories and Industrial Ceramics* (Refractories and Industrial Ceramics), 2015, vol. 56, no. 1, pp. 103–106.

13. Nikulin A., Kovshov S., Mrachkova E. *Production Management and Engineering Sciences: collection of articles of the International conference ESPM 2015* (Production Management and Engineering Sciences: collection of articles of the International conference ESPM 2015), 2016, pp. 223–228.

14. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. *Applied sciences (Switzerland)* (Applied sciences (Switzerland)), 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20.

Коротко об авторах _

Макаров Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование

uk.intelnedra@gmail.com

Угольников Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование ugolnikov@yandex.ru

Макаров Николай Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование mnikolay84@mail.ru

Лифанов Александр Викторович, генеральный директор, ООО Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш», г. Подольск, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование info@oilgazmash.ru

Briefly about the authors

Vladimir Makarov, doctor of technical sciences, professor, professor of Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Aleksander Ugolnikov, candidate of technical sciences, assistant professor, head of Electrical Engineering department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Nikolay Makarov, candidate of technical sciences, assistant professor, head of Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Aleksander Lifanov, general director, OilGasMash Research and Production Complex LLC, Podolsk, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Образец цитирования _

Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Лифанов А. В. Эффективный способ утилизации мелкодисперсных техногенных отходов горно-металлургического производства // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 2. С. 40–49. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-40-49.

Makarov V., Ugolnikov A., Makarov N., Lifanov A. Efficient method of recycling of finely dispersed man-made wastes of mining and metallurgical production // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 40–49. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-40-49.

Статья поступила в редакцию: 09.12.2019 г. Статья принята к публикации: 05.02.2020 г.