

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-5-74-83

УДК 622.23.05

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ – ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

DIMENSIONLESS EQUATIONS - FUNDAMENTALS OF HYDROVORTEX CLASSIFICATION TECHNOLOGY OF FINELY DISPERSED TECHNOGENIC WASTES

Угольников Александр Владимирович¹,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: ugnolnikov@yandex.ru

Alexander V. Ugnolnikov¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor,

Макаров Владимир Николаевич¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com

Vladimir N. Makarov¹, Dr. Sc. in Engineering, Professor

Макаров Николай Владимирович¹, канд. техн. наук, доцент, e-mail: mnikolay84@mail.ru

Nikolay V. Makarov¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor,

Лифанов Александр Викторович², генеральный директор

Alexander V. Lifanov², general director

¹Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

¹Ural state Mining University, 30 street Kuibyshev, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

²ООО Научно-Производственный Комплекс «ОйлГазМаш», 142103, Россия, г. Подольск, ул. Железнодорожная, дом 2 Д.

²OilGasMash Research and Production Complex LLC, 2d street Railway, Podolsk, 142103, Russian Federation

Аннотация:

Актуальность исследований. Использование техногенных минеральных образований (ТМО) в производстве высокотехнологичной продукции является актуальной, адекватной стратегией улучшения структуры ВВП России. В настоящее время активное внедрение утилизации ТМО ограничено высокими требованиями к фракционному составу, медианным размерам и дисперсности частиц ТМО. Одним из сдерживающих факторов повышения эффективности утилизации мелкодисперсных ТМО является недостаточное совершенство техники и технологии и их классификации. Жесткие требования классификации по дисперсии медианных размеров тонкодисперсных ТМО обуславливают необходимость поиска способов и технических средств их реализации, которые в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров наночастиц могут эффективно их реализовывать. Для обеспечения качественного сырья в производстве материалов с уникальными свойствами необходима технология, при которой классификация по дисперсии медианного размера частиц ТМО будет автономна, т. е. независима от их физико-механических характеристик.

Цель исследований. Графоаналитическое моделирование и построение критериальных уравнений инерционной гидровихревой кинематической классификации в кипящем слое частиц ТМО для создания устройства ее реализации в виде гидровихревого классификатора Вентури.

Методы исследований. Основаны на научно обоснованной и экспериментально подтвержденной гипотезе об определяющем влиянии на траекторию движения частиц ТМО сил инерционного неустановившегося гидровихревого процесса их взаимодействия с вращающимися каплями жидкости в плоскости кипящего слоя по отношению к силам, обеспечивающим движение кипящего слоя. При этом минимальный

диаметр поглощаемых гидрофобных частиц зависит от угловой скорости вращения капли жидкости.

Результаты исследований. Построены графоаналитическая модель и критерии подобия гидровихревой инерционной кинематической классификации микро- и наночастиц ТМО, позволяющие определять геометрические параметры и энергетические характеристики гидровихревого классификатора Вентури, его аэратора, положение приемных бункеров в зависимости от потребной производительности и энергетических характеристик гидровихревого аэратора. Получены уравнения движения и критериальные уравнения мелкодисперсной системы, содержащей капли жидкости с интегрированными в них частицами ТМО в условиях неустановившегося гидродинамического инерционного надстоксового движения в процессе классификации в функции критериев Эйлера и Рейнольдса. Подтверждена зависимость диаметра поглощаемых частиц компонентов сыпучих ТМО 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. Проведены испытания опытно-промышленного образца гидровихревого классификатора Вентури ГKB-280.

Ключевые слова: Утилизация, классификация, гидровихревая инерционная кинематическая коагуляция, труба Вентури, критерии Рейнольда и Эйлера.

Abstract:

Rationale. The usage of technogenic mineral formations (TMF) in manufacturing of high-tech products is a relevant, adequate strategy for improving the structure of Russia's GDP. Nowadays the active implementation of TMF recycling is limited by the high requirements for fractional composition, median sizes and TMF particles dispersion. One of the limiting factors for improving the efficiency of fine TMF recycling is a weak sufficiency of technique and technology and their classification. Strict classification requirements for the dispersion of median sizes of fine TMF 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 classification by the dispersion of the median size of TMF particles will be self-similar, i.e. independent of their physical and mechanical characteristics.

Research goal. Graphical analytic simulation and setting up criterion equations of the inertial hydrovortex kinematic classification in the fluidized bed of TMF particles to create the device for its implementation in the form of a Venturi hydrovortex classifier.

Research methods. The methods are based on a scientifically established and experimentally confirmed hypothesis for the decisive influence of forces of the inertial unsteady hydrovortex process on the motion trajectory of TMF particles, their interaction with the rotating liquid droplets in the plane of the boiling bed in relation to the forces driving the boiling bed. Whereby the minimum diameter of absorbed hydrophobic particles depends on the angular velocity of the liquid droplet rotation.

Research results. Graphical analytic model and similarity criteria of hydrovortex inertial kinematic classification of TMF micro- and nanoparticles have been set up making it possible to determine the geometrical parameters and energy characteristics of a hydrovortex Venturi classifier, its aerator, the position of the receiving hoppers depending on the required performance and the energy characteristics of the hydrovortex aerator. Equations of motion and criteria equations of a finely dispersed system containing liquid droplets with TMF particles integrated in them under the conditions of unsteady hydrodynamic inertial supastock motion in the classification process in terms of Euler and Reynolds numbers have been obtained. The dependence of the absorbed particles diameter of the 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. The tests of the commercial prototype of a hydrovortex Venturi classifier GKV-280 have been carried out.

Keywords: Recycling, classification, hydrovortex inertial kinematic coagulation, Venturi pipe, Reynolds and Euler numbers.

Введение. Внедрение технологии утилизации, т. е. использования техногенных минеральных образований (ТМО) в производстве высокотехнологичной продукции способствует повышению конкурентоспособности экономики России. Однако утилизация мелкодисперсных ТМО ограничена несовершенством техники и технологии и их

классификации, возможностью формирования узкого диапазона улавливаемых фракций микро- и наночастиц [1-3].

Применение наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок позволяет получать материалы с уникальными свойствами, создавать тугоплавкие дисперсноупрочненные

композиционные материалы [4].

Возвратная наносодержащая глиноземная пыль, будучи оборотным балластом, массовая доля которого достигает 8-15 млн т/год от получаемого глинозема, представляет собой высококачественный легирующий элемент в производстве материалов для электронной промышленности [5-9], поэтому разработка рациональных методов использования глиноземной пыли представляет практический интерес [8-10].

Не менее важным является рынок композитных материалов и сплавов, для производства которых требуются легирующие материалы, к которым также предъявляются жесткие требования по медианному размеру и дисперсии. Однако их качество напрямую зависит от совершенства технологических переделов подготовки, классификации исходного сырья [11, 12].

Жесткие требования классификации по дисперсии медианных размеров тонкодисперсных ТМО обуславливают необходимость поиска способов и технических средств, которые в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров наночастиц могут эффективно их достигать.

Постановка задачи. Статья посвящена разработке графоаналитической модели и критериальных уравнений гидровихревой инерционной классификации в кипящем слое микро- и наночастиц ТМО и устройства для ее реализации в виде гидровихревого классификатора Вентури.

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 автономно, т. е. независимо от вероятностных характеристик физико-механических свойств ТМО.

Задача заключается в разработке способа сепарации частиц ТМО размером $(0,5 - 6) \cdot 10^{-6}$ м с дисперсией медианных размеров ± 10 % и эффективностью содержания заданной фракции до 97 %, а также в создании устройств гидровихревой сепарации, при которой классификация частиц в заданном диапазоне размеров гарантирована их коагуляцией вращающимися каплями жидкости.

Селективность классификации должна обеспечиваться полученными с помощью предложенной математической модели параметрами классификатора Вентури, аэратора, гидровихревых форсунок, а также энергетическими характеристиками вращающихся капель жидкости и «кипящего слоя» мелкодисперсного ТМО.

Методология и объект исследования. Гидровихревая инерционная классификация – процесс выделения частиц заданного медианного размера и дисперсии из ТМО, находящегося в состоянии «кипящего слоя» путем формирования траекторий их движения к приемному бункеру под действием инерционных сил неустановившегося процесса

гидровихревого взаимодействия с вращающимися каплями жидкости за период короче, чем период времени релаксации.

Методически решение задачи разделено на два этапа. На первом этапе получены критерии подобия гидровихревой кинематической инерции и аэрационного витания, изучено гидродинамическое взаимодействие капель жидкости и частиц ТМО при больших числах Рейнольдса в режиме установившегося движения с использованием основных положений теорий подобия для получения зависимости коэффициента сопротивления k_i от критериев Рейнольдса и Эйлера [11-13].

На втором этапе установлены основные закономерности изменения полученных на первом этапе индикаторов подобия их корреляции со временем релаксации τ_i и коэффициентом сопротивления k_i в условиях неустановившегося движения [13, 14].

Таким образом, динамически активный участок гидровихревой коагуляции в классификаторе Вентури, характеризующийся неустановившимся надстоксовским режимом течения, в котором сила лобового сопротивления существенно зависит от критериев Рейнольдса и Эйлера, может быть представлен математической моделью и критериальными уравнениями с осредненными значениями параметров, описывающих данный процесс.

На базе известной модели кинетической гетерокоагуляции частицы пыли каплями жидкости при $\omega_{ж} = 0$ в статье [15] предложена графоаналитическая модель гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции, построена система уровней, описывающая физический процесс поглощения твердых частиц вращающимися каплями жидкости с участием дополнительной энергии присоединенного вихря.

С использованием предложенной графоаналитической модели гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции в статье [16] получено уравнение для минимального диаметра поглощаемой твердой компоненты в системе «жидкое-твердое» при вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{ж}$ и эффективного краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы с учетом дополнительной энергии, обусловленной вращением капли жидкости.

Полученные уравнения использованы в данной статье для создания графоаналитической модели и критериальных уравнений гидровихревой инерционной кинематической классификации частиц компонентов ТМО по фракциям с заданной дисперсией и выражения для коэффициента ее эффективности.

Уравнение для минимального диаметра поглощаемой гидрофобной частицы ТМО при гидровихревой инерционной коагуляции можно представить в виде:

$$d \frac{\delta_{ж-г}}{(\rho_{г}-\rho_{ж})V_{ж}^2} (\cos \theta \sqrt{1 - K_{\omega}^2 \cdot \omega_{ж}^4} - \sin \theta \cdot K_{\omega}^2 \cdot$$

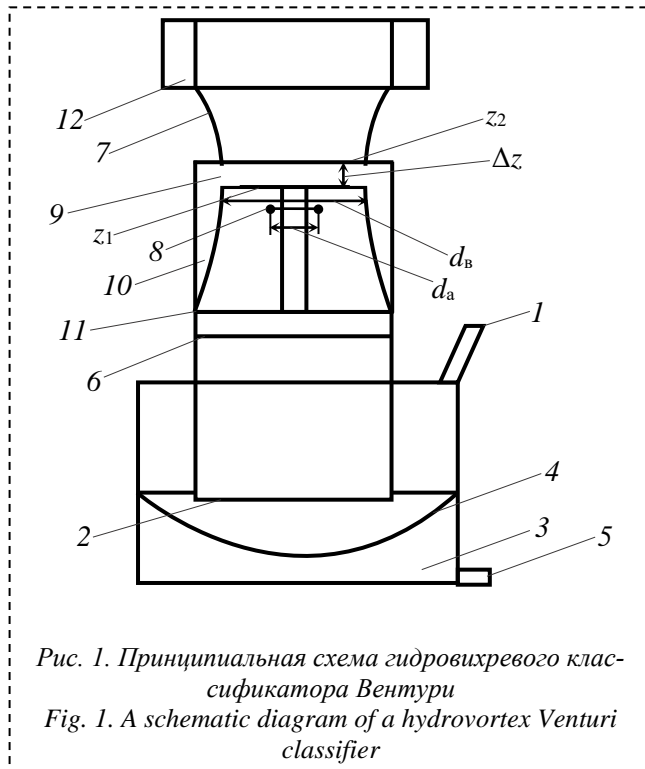


Рис. 1. Принципиальная схема гидровихревого классификатора Вентури

Fig. 1. A schematic diagram of a hydrovortex Venturi classifier

$$\omega_{\text{жс}}^2)_{\text{ч min}}, (1)$$

где $d_{\text{ч min}}$ – минимальный диаметр поглощаемой твердой частицы в условиях классической коагуляции при $\omega_{\text{ж}} = 0$, м; $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность частицы и газа соответственно, кг/м³; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{г}} = V_{\text{ч}}$ – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы, м/с; $\delta_{\text{ж-г}}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость-газ», Дж/м²; θ – краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость-газ», рад;
 $K_{\omega} = \frac{\pi \rho_{\text{жс}} d_{\text{ч min}}^3 \sin^4 \theta}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta}$; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность капли жидкости, кг/м³.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что эффективное влияние закрутки на коагуляцию наблюдается при относительной угловой скорости вращения капли жидкости $K_{\omega} \leq \omega^2 \leq 0,3$.

Коэффициент вариаций медианного диаметра поглощаемых наночастиц компонентов ТМО от угловой скорости вращения капель жидкости получим в виде:

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

Из уравнения (2) следует, что угловая скорость вращения капель жидкости может быть эффективным управляющим параметром в процессе гидровихревой классификации гидрофобных частиц ТМО. Отличительной особенностью гидровихревой классификации является ее высокая чувствительность к дисперсии медианного размера микрочастиц, т. к. разделение их основано на гидровихревой коагуляции, при том, что размер капель жидкости существенно больше поглощаемых

ими микрочастиц.

Для утилизации наночастиц ТМО предложен гидровихревой классификатор Вентури (см. рис. 1).

Гидровихревой классификатор Вентури содержит загрузочный питатель 1, установленный над коллектором 2 классификатора. В смесительной камере 3 установлены пористая газораспределительная перегородка 4 и патрубок 5 для подачи сжатого воздуха и формирования на входе в коллектор 2 кипящего слоя сыпучего материала ТМО. На входе в трубу Вентури 7 установлен хонейкомб 6 для выравнивания скорости движения частиц. По оси трубы Вентури установлен вращающийся аэратор с гидровихревыми форсунками 8, а по его периметру расположен коллектор классификации 9 с приемным бункером 10 сбора частиц компонентов ТМО по фракциям с дренажным клапаном 11, на выходе сепаратора установлен бункер 12 для отходов.

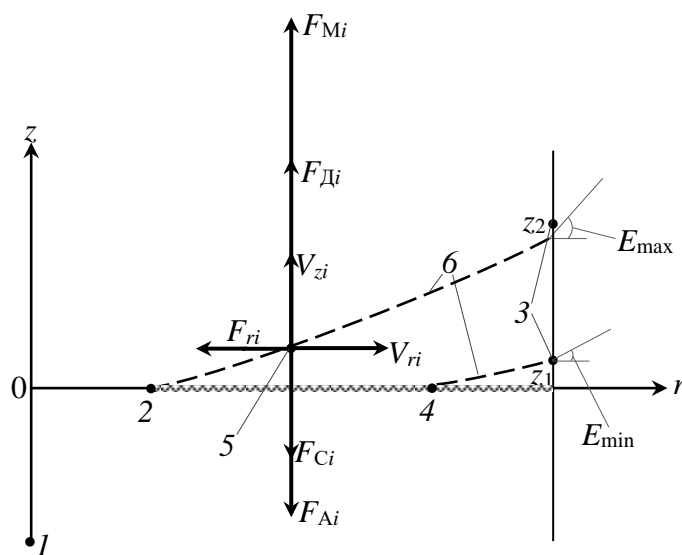
ТМО из загрузочного питателя 1 непрерывно направляют в смесительную камеру 3, ограниченную газораспределительной газовой перегородкой 4. По патрубку 5 под слой ТМО подают сжатый газ.

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 из трубы Вентури, по оси которой в критическом сечении установлен аэратор с вихревыми форсунками, а по периметру установлен приемный кольцевой бункер.

Энергией сжатого газа сыпучий материал аэрируют до псевдосжиженного состояния и подают через входной коллектор 2, выравнивающий хонейкомб 6, на вход в трубу Вентури 7. Закрученные капли жидкости из форсунок аэратора 8 смачивают частицы кипящего слоя. Кинетическая энергия и скорость вращения капель жидкости обеспечивают гарантированную коагуляцию частиц ТМО с заданным минимальным диаметром. В целях повышения эффективности классификации за счет управления влиянием силы Магнуса на скорость вертикального перемещения частиц ТМО, поглощаемых вращающимися каплями жидкости в классификаторе Вентури, использован вращающийся с угловой скоростью $\omega_{\text{а}}$ аэратор.

Результаты исследований. Для построения системы уравнений движения наночастиц компонентов введем понятия приведенных аэродинамического диаметра и плотности наночастиц и представим их в виде:

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

Рис. 2. Дебит метана ($\text{м}^3/\text{сутки}$) из пластов по скважинам А5-А10Fig. 2. Methane flow rate (m^3/day) from reservoirs in wells A5-A10

где $d_{\text{ж}}$ – диаметр капли жидкости, м; $d_{\text{ч}}$ – диаметр микрочастицы ТМО, м.

Для построения критериальных уравнений гидровихревой классификации приняты индикаторы гидровихревой инерции и аэрационного витания частиц компонентов ТМО в виде:

$$k_{ri} = \frac{F_{ri}}{F_{Ai}} = \frac{3}{2} k_i \frac{\rho_c}{d_{\Sigma i}(\rho_{\Sigma i} - \rho_c) \cdot g} \cdot V_{\Sigma i}^2, \quad (4)$$

$$k_{zi} = \frac{F_{Di} - F_{Ci} - F_{Mi}}{F_{Ai}} = \frac{3}{4d_{\Sigma i}^2(\rho_{\Sigma i} - \rho_c) \cdot g} \cdot (C_c^2 \cdot \rho_c \cdot V_{\Sigma i}^2 \cdot d_{\Sigma i} - 4\phi \cdot \mu_c \cdot V_{\Sigma i} - \rho_c \cdot \omega_{\Sigma i} \cdot V_{\phi i}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2), \quad (5)$$

где $F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_c \cdot V_{\Sigma i}^2$ – сила сопротивления движению частицы компоненты ТМО в гидровихревом классификаторе; k_i – коэффициент сопротивления i -й частицы; $d_{\Sigma i}$ – приведенный аэродинамический диаметр i -й частицы, м; ρ_r – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; $V_{\Sigma i}$ – скорость i -й частицы, $\text{м}/\text{с}$; F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c) g$; F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{Ci} = \frac{\phi}{2} \mu_c \pi d_{\Sigma i} V_{\Sigma i}$; F_{Di} – сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой, $F_{Di} = C_c \rho_c V_{\Sigma i}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2$; F_{Mi} – сила Магнуса, направление которой определяется угловой скоростью вращения аэратора, $F_{Mi} = \frac{\pi}{8} \rho_c d_{\Sigma i}^3 \omega_{\Sigma i} V_{\phi i}$; C_c – коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой действующих на i -ю частицу; V_r , V_{zi} – скорость сжатого газа, создающего кипящий слой, и вертикальная составляющая скорости i -ю частицы $\text{м}/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ϕ – коэффициент формы частицы в законе Стокса; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, $\text{кг}/\text{мс}$; $V_{\phi i}$ – окружная скорость движения капли жидкости с

интегрированной в нее i -частицы в плоскости кипящего слоя.

Вышеуказанные индикаторы удовлетворяют требованиям критериев подобия и определяют инерционные перегрузки частиц компонентов ТМО в плоскости кипящего слоя и в направлении его перемещения под действием гидродинамических инерционных сил в долях силы тяжести [12].

Учитывая, что гидровихревые силы инерции неустановившегося движения в плоскости кипящего слоя существенно больше инерционных сил поступательного вертикального движения кипящего слоя, уравнение для критерия инерционной аэрации получим в виде:

$$k_{zi} = \frac{3}{4d_{\Sigma i}^2(\rho_{\Sigma i} - \rho_c) \cdot g} \cdot (2C_c \cdot \rho_c \cdot V_{\Sigma i}^2 \cdot d_{\Sigma i} - 4\phi \cdot \mu_c \cdot V_{\Sigma i} - 1,6 \cdot 10^3 \cdot \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_c \cdot d_{\Sigma i}^3 (1 + \bar{d}_a)). \quad (6)$$

Уравнение движения i -частицы при ее поглощении каплей жидкости в проекции на ось $0r$ в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора в соответствии с классическим уравнением Ньютона и с учетом рис. 2 запишем в виде [17]:

$$m_i \frac{\partial v_{ri}}{\partial t} = F_{ri}, \quad (7)$$

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

$$m_i \frac{\partial v_{zi}}{\partial t} = -F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Di} - F_{Mi}. \quad (8)$$

Уравнение (7) идентично уравнению Буссинеска, описывающему гидродинамически неустановившийся режим инерционного движения капли жидкости [13]:

$$\frac{\partial v_{ri}}{\partial t} = \frac{v_{ri}}{\tau_{ci}}, \quad (9)$$

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

Уравнение Буссинеска позволяет определить

время релаксации мелкодисперсной системы, содержащей каплю жидкости и интегрированную в нее частицу ТМО, и связывает его с коэффициентом сопротивления k_i .

С учетом уравнений (4-8) и положения Веникова В.А. о подобии сложных систем [12] получим критериальные уравнения гидровихревой инерционной кинематической классификации частиц ТМО в виде:

$$k_{ri} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_c) d_{\Sigma i}}{\rho_c \cdot V_{0i}^2} \cdot \frac{\partial V_{ri}}{\partial t}, \quad (10)$$

$$k_{zi} = \frac{2 d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c)}{3 (C_c \cdot \rho_c \cdot V_{0i}^2 \cdot d_{\Sigma i} - 2 \Phi \cdot \mu_c \cdot V_{0i} - 8 \cdot 10^2 \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_c \cdot d_{\Sigma i}^3 (1 + \bar{d}_a))}, \quad (11)$$

$$\text{где } \bar{d}_a = \frac{d_a}{d_c}.$$

Экспериментально установлено, что сила сопротивления возрастает существенно нелинейно с ростом числа Рейнольдса на участке надстоксового 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 [13].

Поскольку в уравнении (7) 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:

$$k_i = C \cdot \mu_c^\alpha \cdot \rho_c^\beta \sqrt{V_{ri}^2 + 0,25 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta \cdot \omega_{\Sigma c}^2} \cdot d_{\Sigma i}^\epsilon \cdot \left(\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{\Sigma c} - \rho_c}{\rho_c} \right)^\phi \cdot V_0^\psi. \quad (12)$$

Для определения индикаторов подобия воспользуемся матрицей независимых размерностей, ранг которой равен трем [12].

С учетом однородной системы линейных уравнений, составленной из показателей степеней уравнения (12), матрица индикаторов подобия примет вид:

	μ_c	ρ_c	$\sqrt{V_{\Sigma c}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma c}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2 \cdot \sin^2 \theta}$	$d_{\Sigma c}$	$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{\Sigma c} - \rho_c}{\rho_c}$	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

(13)

Раскрывая определители матрицы (13), получим три индикатора подобия с физического процесса установившегося аэрогидродинамического движения капли жидкости в газовой среде при больших числах Рейнольдса:

$$\pi_1 = \frac{\rho_c^2 (V_{ri}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma c}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2 \cdot \sin^2 \theta) d_{\Sigma i}^2}{\mu_c^2} = Re_{\Sigma \omega i}^2;$$

$$\pi_2 = \frac{P_i}{\rho_c \cdot V_0^2} = \frac{\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot d_{\Sigma i} (\rho_{\Sigma c} - \rho_c)}{\rho_c \cdot V_0^2} = Eu_i; \pi_3 = \frac{\rho_c^2 V_0^2 d_{\Sigma i}^2}{\mu_c^2} = Re_{\Sigma 0 i}^2. \quad (14)$$

Таким образом, уравнение (12) в критериальной форме примет вид:

$$k_i = C \cdot (Re_{\Sigma \omega i}^2)^a \cdot Eu_i^b \cdot (Re_{\Sigma 0 i}^2)^c. \quad (15)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности C и показатели степени a, b, c в уравнении (15) определяем из уравнения установившегося движения капли жидкости в газовой среде:

$$\frac{m_i \partial V_{ri}}{\partial t} = Eu_i \cdot \rho_c \cdot V_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}. \quad (16)$$

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

$$k_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{Eu_i}{Re_{\Sigma \omega i}^2 \cdot Re_{\Sigma 0 i}^2}. \quad (17)$$

После соответствующих преобразований уравнений (15–17) относительно числа Рейнольдса получим уравнение для определения времени релаксации дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» в виде:

$$\tau_{qi} = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c) Re_{0i}^2}{Eu_i \cdot \mu_c \cdot Re_{\Sigma i}^2}. \quad (18)$$

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 каплей жидкости и частиц компонентов в зависимости от кинематических параметров течения. В статье [14] получено выражение для изменения времени релаксации при больших числах Рейнольдса путем осреднения их значений. С учетом вышеуказанных данных выражение для критерия Эйлера в условиях неустановившегося гидродинамического движения на этапе релаксации дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» можно представить в виде:

$$Eu_i = \frac{18 Re_{\Sigma i}}{Re_{0i}^2} (1 + 0,15 Re_{0i}^{0,687}). \quad (19)$$

Таким образом, с учетом данных, приведенных в статьях [13, 14], среднее значение критерия Эйлера на участке релаксации дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» жидкости представим в виде:

$$Eu_{cpi} = \frac{6}{Re_{0i}} (1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687}). \quad (20)$$

Учитывая соотношение между критерием Рейнольдса и коэффициентом сопротивления движению дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» в газовой среде выражение

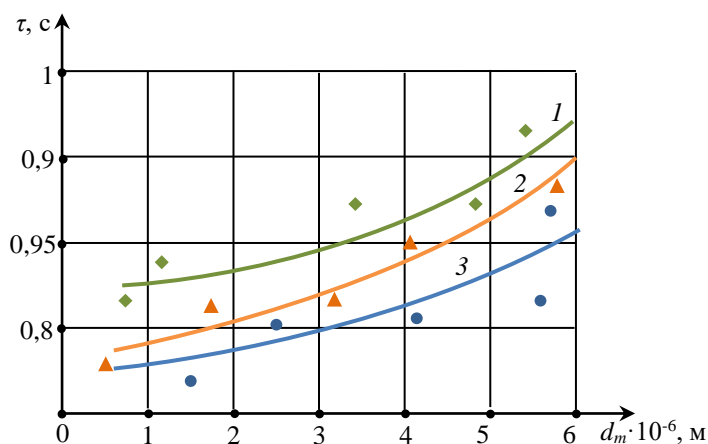


Рис. 3. Зависимость среднего времени релаксации капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО от медианного диаметра: 1 – уголь, 2 – окись кремния, 3 – окись алюминия; $Re_0 = 45$

Fig. 3. The dependence of the mean relaxation time of a liquid droplet with a TMO component particle integrated into it on a median diameter: 1 – coal, 2 – silicon oxide, 3 – aluminum oxide; $Re_0 = 45$

для среднего значения коэффициента сопротивления в уравнении (12) запишем в виде:

$$k_{cpi} = \frac{72}{Re_{0i}} (1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687}) \quad (21)$$

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

$$\tau_{cpi} = K_\tau \cdot d_{\Sigma i}^2, \quad (22)$$

$$\text{где } K_\tau = 4 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_c)(1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687})(3 + 3\mu)}{Re_{0i}(2 + 3\mu)\mu_c} - \text{коэф-}$$

фициент влияния приведенного аэродинамического диаметра микрочастиц на среднее время релаксации.

Из уравнения (22) видно, что среднее время релаксации каплей жидкости с интегрированными в них компонентами ТМО является функцией квадрата диаметра дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО», что позволяет использовать данный факт для разработки технологии эффективной классификации мелкодисперсных сыпучих ТМО.

Коэффициент эффективности гидровихревой инерционной классификации, представляющий собой тангенс угла наклона траектории движения частицы ТМО по отношению к плоскости кипящего слоя, т. е. эффективность управления траекторией движения частиц заданного диаметра получим в виде:

$$k_{\Phi} = \frac{\int_{d_a}^{\frac{d_a}{2}} dr \int \frac{k_{zi}}{k_{ri}} dr = \int_0^t \int \frac{k_{zi}}{k_{ri}} dt = \arctg E;$$

$$k_{\Phi} = \frac{\phi \cdot \mu_c \cdot V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{cpi}}}\right)}{\frac{1}{2} C_c \rho_c V_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c) g - 4 \cdot 10^4 \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_c \cdot \rho_{\Sigma i} \cdot d_{\Sigma i}^5 \cdot d_{\Sigma i}^2 \left(1 + \frac{d_a}{d_g}\right)} \quad (23)$$

С учетом уравнения (23) максимальное и минимальное значение коэффициента эффективности гидровихревой классификации определяется

тангенсом угла наклона траектории движения частиц ТМО при коагуляции их соответственно в начальной точке траектории при $r = 0,5d_a$ и крайней точке коагуляции при $r = 0,4d_g$ с условием, что время движения микрочастиц от форсунки аэратора до входа в бункер классификатора соответствуют времени релаксации:

$$k_{\Phi \max} = \arctg_{\max} = 6 \cdot \frac{\phi \cdot \mu_c \cdot V_0 \left(1 - 0,37 \sqrt{\frac{\rho_a d_a^3}{\rho_{\Sigma i} d_{\Sigma i}^3}}\right)}{3 C_c \rho_c V_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i} - 2 d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c) g - 2,4 \cdot 10^3 \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_c \cdot \rho_{\Sigma i} \cdot d_{\Sigma i}^5 \cdot d_{\Sigma i}^2 \left(1 + \frac{d_a}{d_g}\right)};$$

$$k_{\Phi \min} = \arctg_{\min} = 6 \cdot \frac{\phi \cdot \mu_c \cdot V_0 \left(0,55 + 0,18 \sqrt{\frac{\rho_a d_a^3}{\rho_{\Sigma i} d_{\Sigma i}^3}}\right)}{3 C_c \rho_c V_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i} - 2 d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_c) g - 2,4 \cdot 10^3 \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_c \cdot \rho_{\Sigma i} \cdot d_{\Sigma i}^5 \cdot d_{\Sigma i}^2 \left(1 + \frac{d_a}{d_g}\right)} \quad (24)$$

Из анализа уравнения (23, 24) видно, что при целенаправленном выборе скорости и направления вращения аэратора можно добиться существенного увеличения значения коэффициентов эффективности классификации, т. е. при заданной высоте коллектора классификатора Δz обеспечить минимальную дисперсию улавливаемой фракции микрочастиц ТМО.

Таким образом, предложенный вариант поэтапного осреднения значений коэффициента сопротивления движению дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО» в газовой среде и времени ее релаксации позволяет с достаточной степенью точности использовать уравнения классической аэрогидродинамики установившегося движения капли жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса до 10^4 на длине их свободного инерционного пробега для построения графоаналитической модели и критериальных уравнений инерционной гидровихревой классификации.

В техническом задании на проектирование гидровихревого классификатора Вентури, как правило, указана производительность утилизации по массе сыпучих материалов ТМО Q , т/ч.

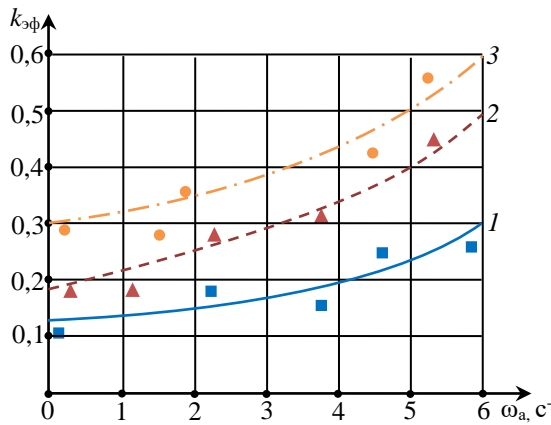


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности гидровихревой классификации от угловой скорости вращения аэратора при $d_m \cdot 10^{-6}$, м: 1 – $\omega_{ж} = 10^5$; 2 – $\omega_{ж} = 10^6$; 3 – $\omega_{ж} = 10^7$

Fig. 4. The dependence of the efficiency coefficient of hydrovortex classification on the angular velocity of an aerator rotation by $d_l \cdot 10^{-6}$, m: 1 – $\omega_l = 10^5$; 2 – $\omega_l = 10^6$; 3 – $\omega_l = 10^7$

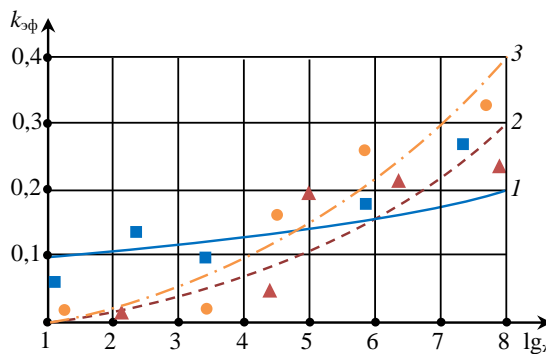


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности гидровихревой классификации от угловой скорости вращения капель жидкости 1 – $d_m = 10^{-5}$ м; 2 – $d_m = 5 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $d_m = 10^{-6}$ м

Fig. 5. The dependence of the efficiency coefficient of hydrovortex classification on the angular velocity of liquid droplets rotation 1 – $d_l = 10^{-5}$ m; 2 – $d_l = 5 \cdot 10^{-6}$ m; 3 – $d_l = 10^{-6}$ m

Диаметр классификатора Вентури d_v при заданной его производительности определяем по формуле:

$$d_v = 2 \sqrt{\frac{K_p Q}{\pi \rho_q V_z}}, \quad (25)$$

где K_p – коэффициент плотности кипящего слоя частиц ТМО, $K_p = \frac{\rho_q}{\rho_{кс}}$; $\rho_{кс}$ – плотность частиц ТМО в состоянии кипящего слоя.

Скорость капель жидкости в процессе классификации на выходе из гидровихревых форсунок аэратора, характеризующего энергетические параметры, определяем по формуле:

$$V_0 = 3,2 \frac{d_g - d_a}{\tau_{ср}} \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{\rho \Sigma d_{\Sigma min}}}. \quad (26)$$

Угловая скорость вращения капель жидкости и коэффициент вариации медианного диаметра поглощаемых микрочастиц ТМО, определяющие требуемую фракцию в процессе классификации, находим по формулам (1, 2).

На рис. 3-5 представлены результаты экспериментальных исследований и их сравнения с расчетами по предложенной математической модели.

Существенное изменение времени релаксации как по результатам эксперимента, так и по расчетным данным, приведенным на рис. 3, позволяет добиваться высокой эффективности классификации при заданной дисперсии медианных размеров микрочастиц ТМО вследствие существенного влияния изменения номинального диаметра их на инерционные силы, определяющие траекторию движения дисперсной системы «капля жидкости – микрочастица ТМО».

Из анализов рис. 4, 5 видно существенное влияние угловой скорости капли жидкости и аэратора на коэффициент эффективности коагуляции, т. е. форму траектории движения микрочастиц заданного диаметра по отношению к плоскости кипящего слоя и, соответственно, к положению коллектора классификации.

Результаты испытаний опытного образца гидровихревого классификатора Вентури ГKB-280, проведенного в аттестованной лаборатории Сухоложской машиностроительной компании «СМК-ТЕСТ», подтвердили достаточную для инженерных расчетов сходимость с предложенной математической моделью.

Заключение. Результаты выполненной работы позволяют сделать научные и практические выводы:

1. Время релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в процессе гидровихревой классификации, а следовательно, и инерционные силы неустановившегося взаимодействия с вращающимися каплями жидкости зависят от медианного диаметра, что является основным определяющим фактором достижения высокой эффективности классификации.

2. Угловая скорость вращения аэратора гидровихревого классификатора оказывает существенное влияние на траекторию движения микрочастиц по отношению к коллектору, способствуя повышению эффективности классификации.

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

5. Гидровихревая классификация позволяет сепарировать микрочастицы ТМО в диапазоне от $0,5 - 5 \cdot 10^{-6}$ м с дисперсией медианных размеров не более 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davydov S.Ya. Utilization of Alumina Calcining Furnace Dust Containing Nanoparticles / S.Ya. Davydov R.A. Apakashev V.N. Korukov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 291-294.
2. Макаров В.Н. Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в технологических процессах на промышленных предприятиях / В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов // *Новые огнеупоры*. – 2015. – № 2. – С. 59-63.
3. 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. – Т. 7, № 1. – P. 5-20. DOI: 10.3390/APP7010005/.
4. Гордеев Ю.И. Влияние добавок, легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю.И. Гордеев, А.К. Абкьян, Г.М. Зеер [и др.] // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2013. – № 3. – С. 174-181.
5. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydro-metallurgical production and concentrating plants / V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolnii, N.A. Taran // *metallurgical and mining industry*. – 2017 – № 4 – P. 8-17.
6. 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.
7. S.Ya. Davydov R.A. Apakashev V.N. Korukov/ Capturing Nanoparticles in Alumina Production. *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2016. – Vol. 57, № 1. – P. 9-12.
8. Давыдов С.Я., Апакашев Р.А., Корюков В.Н. улавливание наноразмерной фракции частиц глиноземного производства. *новые огнеупоры*. 2016. №2. С. 12-15.
9. 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.
10. N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.I. Petrov. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supplyshaft in underground mine // *Eurasian mining*. 2016. № 2. P. 45-47.
11. Evaluation of gravitational force effect on balancing processes in liquid-type autobalancing devices. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Masson I.A. *Advanced Materials Research*. 2014. Т. 1040. С. 642-645.
12. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. Учебник для вузов. 4-е изд. – М.: Либроком, – 2014. – 439 с.
13. Фролов А.В., Телегин В.А., Сечкерев Ю.А. Основы гидрообеспыливания. Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 10. – С. 1-24.
14. Фукс Н.А. *Механика аэрозолей*. -М.: Изд-во АН СССР, 1955. -352 с.
15. Макаров В.Н., Макаров Н.В., Потапов В.В., Горшкова Э.М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания. *Вестник ЗабГУ*. 2018. Т. 24 № 5. С. 13-20.
16. Макаров В.Н., Косарев Н.П., 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* № 2, Т. 18, 2018. С. 178-189.
17. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

REFERENCES

1. Davydov S.Ya. Utilization of Alumina Calcining Furnace Dust Containing Nanoparticles / S.Ya. Davydov R.A. Apakashev V.N. Korukov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 291-294.
2. Makarov V.N., Davydov S.Y. Theoretical basis for the in-process ventilation systems efficiency increasing at industrial enterprises. *Novye огнеупоры (new refractories)*. – 2015. – № 2. – P. 59-63.
3. 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. – Т. 7, № 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/APP7010005/.
4. Gordeev Yu.I., Effect of alloying additives of the ceramic nanoparticles on the structural parameters and properties of hard alloys / Yu. I. Gordeev, A. K. Abkaryan, G. M. Zeer, A. A. Lepeshev // *Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev*. – 2013. – № 3. – С. 174-181.
5. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydro-metallurgical production and concentrating plants / V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolnii, N.A. Taran // *metallurgical and mining industry*. – 2017 – № 4 – P. 8-17.

6. 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.
7. S.Ya. Davydov R.A. Apakashev V.N. Korukov/ Capturing Nanoparticles in Alumina Production. *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2016. – Vol. 57, № 1. – P. 9-12.
8. Davydov S.Y., Apakashev R.A., Koryukov V.N. The collection of nanoscale particles in alumina production. *Novye ognepory (new refractories)*. – 2016. – №2. – P. 12-15.
9. 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.
10. N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.I. Petrov. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supplyshaft in underground mine // *Eurasian mining*. 2016. № 2. P. 45-47.
11. Evaluation of gravitational force effect on balancing processes in liquid-type autobalancing devices. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Masson I.A. *Advanced Materials Research*. 2014. T. 1040. C. 642-645.
12. Venikov V.A. The theory of similarity and modeling as applied to the problems of electric power. Textbook for high schools. 4th ed. – M.: Librocom, – 2014. – 439 p.
13. Frolov A.V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. Basics of dedusting. Life safety. – 2007. – № 10. – P. 1-24.
14. Fuchs N.A. The mechanics of aerosols. – M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, – 1955. – 352 p.
15. Makarov V.N., Makarov N.V., Potapov V.V., Gorshkova E.M. A promising method of high-pressure hydro-dedusting efficiency increasing // *Transbaikal State University Journal*, 2018, vol. 24 № 5. P. 13-20.
16. Makarov V.N., Kosarev N.P., 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, № 2, P.178-189.
17. Loytsyanskiy L G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Textbook for high schools. - 7th ed., Rev. – M.: Bustard, 2003. – 840 p.

Поступило в редакцию 08.08.2019

Received 08 August 2019