УДК622.794.7

Оптимизация геометрических параметров гидровихревого инерционного стратификатора Вентури

В.Н.МАКАРОВ, А.В.УГОЛЬНИКОВ[✉], Н.В.МАКАРОВ

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Применение наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок открывает новые возможности в создании материалов с уникальными свойствами. В основе эффективного механизма качественного совершенствования структуры ВВП России лежит утилизация техногенных минеральных образований (ТМО) и производство высокотехнологичной продукции. Исследования показывают, что эффективность утилизации ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианным размерам и дисперсности частиц ТМО, несовершенством техники и технологии и их классификации. При разработке способов классификации по дисперсии медианных размеров микрочастиц ТМО в условиях вероятностного распределения физико-механических параметров исходного сырья необходимо учитывать жесткие требования к классификации. Приведенные в статье исследования основаны на положении о существенно большем влиянии инерционных сил на траекторию гидродинамически не установившегося движения дисперсной системы микрочастица – капля жидкости в процессе гидровихровой стратификации по отношению к аэродинамическим силам их перемещения в кипящем слое. Показано, что в диапазоне кинетической энергии поступательного движения капля жидкости, обеспечивающем преодоление аэродинамического барьера коагуляции гидрофобных частиц ТМО, минимальный диаметр поглощаемых микрочастиц в процессе гидровихровой коагуляции зависит только от величины угловой скорости вращения капель жидкости.

Получены уравнения для критериев Эйлера и Рейнольдса, их средних значений, времени релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в зависимости от их медианного размера в процессе гидровихровой стратификации. Разработанная математическая модель гидровихровой инерционной стратификации в кипящем слое тонкодисперсных ТМО позволяет определять оптимальные геометрические параметры и энергетические характеристики стратификатора Вентури, его аэратора, положения приемных бункеров.

Проведенные испытания подтвердили возможность классификации тонкодисперсных отходов горно-металлургического производства в диапазоне медианных размеров $(0,5-5) \cdot 10^{-6}$ м по фракциям с дисперсией не более 20 %.

Ключевые слова: утилизация; стратификация; циркуляционная гетерокоагуляция; критерии Рейнольдса и Эйлера; гидрофобность; медианный размер; дисперсия; труба Вентури; силы инерции

Благодарность. Авторы признательны А.Е.Пелевину, доктору технических наук, профессору кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета за содействие в проведении аналитических исследований, С.Г.Хронусову, директору ООО «ЭМПИКО», за практические исследования и внедрение материалов статьи.

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

Введение. Обеспечение конкурентоспособности горно-металлургического комплекса (ГМК) РФ в глобальном экономическом пространстве невозможно без ускорения темпов реконструкции действующих и создания новых производств с учетом передовых достижений науки, внедрения 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.

Наиболее эффективной стратегией улучшения структуры ВВП России является внедрение технологии утилизации, т.е. использования техногенных минеральных образований (ТМО) в производстве высокотехнологичной продукции.

Применение наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок, а также 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 [2].

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 РФ оценивается в 11,5 млн т, масса оборотной глиноземной пыли составляет значимую величину. Глиноземная пыль может быть использована в качестве легирующих элементов при производстве тугоплавких материалов и в электронной промышленности [3, 11, 16].

Многочисленные исследования показывают, что эффективность утилизации ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианным размерам и дисперсности частиц ТМО. В большинстве случаев требуемый размер микро- и наночастиц и их дисперсия находятся в диапазонах: $d_n = (0,1-6) \cdot 10^{-6}$ м; $3\sigma = 0,2d_m$. Одним из сдерживающих факторов повышения эффективности утилизации мелкодисперсных ТМО является высокая энергоемкость и недостаточное совершенство техники и технологии их классификации [5, 10, 12].

Существенным недостатком используемых средств классификации, является недостаточная эффективность формирования узкого диапазона улавливаемых фракций частиц микро- и наноразмера [13-15].

Жесткие требования классификации по дисперсии медианных размеров тонкодисперсных ТМО приводят к необходимости поиска способов и технических средств, которые в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических, кинематических параметров наночастиц могут их удовлетворять.

Постановка задачи. Для обеспечения качественным сырьем производства 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.

Статья посвящена разработке математической модели гидровихревой стратификации в кипящем слое микро- и наночастиц ТМО и устройства для ее реализации в виде гидровихревого стратификатора Вентури.

Задача заключается в разработке способа сепарации частиц ТМО размером $(0,5-6) \cdot 10^{-6}$ м с дисперсией медианных размеров ± 5 % и эффективностью содержания заданной фракции в общей массе отбора по кривой Тромпа 95-97 %, а также создании устройств гидровихревой сепарации, при которой стратификация частиц в заданном диапазоне размеров гарантирована их коагуляцией вращающимися каплями жидкости. Селективность стратификации должна обеспечиваться полученными с помощью предложенной математической модели параметрами стратификатора Вентури, аэратора, гидровихревых форсунок, а также энергетическими характеристиками вращающихся капель жидкости и кипящего слоя мелкодисперсного ТМО.

Методология и объект исследования. Гидровихревая инерционная стратификация – 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 не более времени релаксации.

Для установления зависимости между энергией дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО и потоком энергии вертикального ее движения в кипящем слое и геометрическими параметрами стратификатора Вентури в процессе инерционной гидровихревой стратификации в фазе релаксации необходимо получить уравнения движения частиц в зависимости от действующих на них сил.

Используемый метод аддитивного аэрогидродинамического расчета гидровихревой стратификации отличается отдельным учетом влияния скорости движения частиц в кипящем слое и скорости инерционного неустановившегося гидровихревого движения дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО. Такой подход позволяет исследовать влияние кинематических и энергетических параметров вращающихся капель жидкости на траекторию движения частиц, определить зависимость эффективности сепарации по фракциям от геометрических и энергетических параметров стратификатора.

Методически решение задачи разделено на два этапа. На первом этапе 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. Для построения адекватной математической модели процесса гидровихревой стратификации использованы уравнения установившегося стоковского движения в процессе классической коагуляции в форме уравнения Буссинеска [1, 7].

На втором этапе установлены основные закономерности изменения полученных на первом этапе индикаторов подобия их корреляции с временем релаксации τ_i и коэффициентом сопротивления k_i в условиях неустановившегося движения. Рассмотрение неустановившегося движения капли жидкости с последующим осреднением аэрогидродинамических параметров ее движения по времени релаксации с учетом закономерности неустановившегося надстоксового движения позволяет решить задачу с высокой точностью осреднения значений коэффициента сопротивления k_i [7, 8]. Таким образом, динамически активный участок гидровихревой коагуляции в стратификаторе Вентури, характеризующийся неустановившимся надстоксовым режимом течения, в котором сила лобового сопротивления существенно зависит от критериев Рейнольдса и Эйлера, может быть представлен математической моделью с осредненными значениями критериев, описывающих данный процесс.

На базе известной модели кинетической гетерокоагуляции частицы пыли каплей жидкости при угловой скорости жидкости $\omega_{\text{ж}} = 0$ в статье [6] 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 [9] получено уравнение для минимального диаметра поглощаемой твердой компоненты в системе жидкое – твердое при вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$ и эффективного краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы с учетом дополнительной энергии обусловленной вращением капли жидкости.

Для абсолютно гидрофобных частиц, каковыми являются микрочастицы ТМО с диаметром менее $6 \cdot 10^{-6}$ м, математически и экспериментально подтверждена гипотеза о прямой корреляции минимального диаметра полностью поглощаемых частиц с угловой скоростью вращения капель жидкости при гидровихревой инерционной кинематической гетерокоагуляции. При этом за порогом аэродинамического барьера физико-механические и химические свойства частиц не влияют на процесс смачивания в диапазоне диаметров поглощаемых частиц, соответствующих вихревой и классической коагуляции: $d_{\text{ч} \omega \min} \leq d_{\text{ч}} \leq d_{\text{ч} \min}$ [9].

Полученные уравнения использованы в данной статье для создания математической модели гидровихревой стратификации частиц компонентов ТМО по фракциям с заданной дисперсией. Уравнение для минимального диаметра полностью поглощаемой гидрофобной наночастицы при гидровихревой коагуляции (при $\omega_{\text{ж}} = 0$ м) можно представить в виде

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

где $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{г}}$ – плотность частицы и газа соответственно, кг/м³; $V_{\text{ж}}$ – скорость капли жидкости, 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_{ω} – коэффициент влияния угловой скорости вращения капли жидкости на минимальный диаметр поглощаемых частиц; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность капли жидкости, кг/м³,

$$K_{\omega} = \frac{\pi \rho_{\text{ж}} d_{\text{ч} \min}^3 \sin^4 \theta}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta}.$$

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 можно представить в следующем виде

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

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

Для практического решения задачи утилизации наночастиц ТМО в статье предложен гидровихревой стратификатор Вентури, обеспечивающий их разделение по фракциям с заданным медианным размером и дисперсией (рис.1).

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 инерционной гетерокоагуляции их вращающимися каплями жидкости, состоящее из трубы Вентури, по оси которой в критическом сечении установлен азратор с вихревыми форсунками, а по периметру – приемный кольцевой бункер.

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

ТМО из загрузочного питателя 9 непрерывно направляют в смесительную камеру 11, ограниченную газораспределительной перегородкой 10. По патрубку 12 под слой ТМО подают сжатый газ. Энергией сжатого газа аэрируют сыпучий материал до псевдосжиженного состояния и подают через коллектор 1, выравнивающий хонейкомб 2 на вход в трубу Вентури 7. Закрученные капли жидкости из форсунок азратора 5 смачивают частицы кипящего слоя. Кинетическая энергия и скорость вращения капель жидкости обеспечивают гарантированную коагуляцию частиц ТМО с заданным минимальным диаметром.

Диаметр d_a азратора и диаметр трубы Вентури d_B в критическом сечении, а также энергия 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. Это необходимо для обеспечения гарантированной эффективности стратификации частиц по фракциям с заданной дисперсией за счет исключения из процесса стратификации зоны неустойчивой коагуляции вблизи входа в бункер стратификации. Положение коллектора стратификации 6 и бункера стратификации 4 по отношению к плоскости расположения форсунок гидровихревого азратора 5 определяется в соответствии с траекториями движения капель жидкости с интегрированными в них частицами сыпучего материала ТМО

Рис.1. Схема гидровихревого стратификатора Вентури

Рис.2. Схема движения капли жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО и действующих на нее сил в условиях гидровихревой стратификации: Oz – ось стратификатора Вентури; z_1, z_2 – координаты нижней и верхней границ коллектора стратификации

- 1 – капля жидкости с интегрированной в нее частицей компонента ТМО;
- 2 – координата расположения гидровихревой форсунки аэратора;
- 3 – траектория движения капли жидкости с частицей компонента ТМО;
- 4 – плоскость кипящего слоя

в процессе инерционной гидровихревой гетерокоагуляции, рассчитанными по предложенной математической модели. Через бункер с дренажным клапаном 8 происходит удаление влаги и последующий сбор готового продукта.

В целях повышения эффективности стратификации за счет управления влиянием силы Магнуса на скорость вертикального перемещения частиц ТМО, поглощаемых вращающимися каплями жидкости в стратификаторе Вентури, использован вращающийся с угловой скоростью ω_a аэратор.

Траектория движения наночастиц ТМО определяется инерционным взаимодействием наночастиц, вращающихся каплей жидкости и потока 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 капли жидкости она 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 $d_{ж}$ будем считать аэродинамическим диаметром капли [7].

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 в области кипящего слоя не более 80 % от диаметра трубы Вентури, т.е. диаметра расположения входа в приемный бункер.

Для построения системы уравнений движения капли жидкости с интегрированной в нее наночастицей компонента ТМО (рис.2) введем понятия приведенных аэродинамического диаметра и плотности наночастиц и представим их в виде

$$d_{\Sigma} = \frac{6\sqrt{\frac{\pi}{6}}(d_{ж}^3 + d_{ч}^3)}{\pi}; \quad \rho_{\Sigma} = \frac{d_{ж}^3 \rho_{ж} + d_{ч}^3 \rho_{ч}}{d_{ж}^3 + d_{ч}^3}, \quad (3)$$

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

Уравнение движения i -частицы при ее поглощении каплей жидкости в проекции на ось Or в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора (в соответствии с классическим уравнением Ньютона), учитывая рис.2, запишем в виде [4]:

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

где F_{ri} – сила сопротивления движению частицы компоненты ТМО в гидровихревом стратификаторе,

$$F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{\Gamma} V_{\Sigma i}^2;$$

k_i – коэффициент сопротивления i -й частицы; $d_{\Sigma i}$ – диаметр i -й частицы, м; $V_{\Sigma i}$ – скорость i -й частицы, м/с.

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

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

где F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз и действующая на i -ю частицу, являющуюся аналогом силы тяжести,

$$F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g;$$

F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья,

$$F_{Ci} = \frac{\Phi}{2} \mu_r \pi d_{\Sigma i} V_{zi};$$

F_{Di} – сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой,

$$F_{Di} = C_c \rho_r V_{ri}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2;$$

F_{Mi} – сила Магнуса, направление которой определяется угловой скоростью вращения аэратора,

$$F_{Mi} = \frac{\pi}{8} \rho_r d_{\Sigma i}^3 \omega_{\Sigma i} V_{\phi i};$$

C_c – коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой, действующий на i -ю частицу; V_r , 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; $V_{\phi i}$ – окружная скорость движения капли жидкости с интегрированной в нее i -частицей в плоскости кипящего слоя.

Уравнение (4) идентично уравнению Буссинеска, описывающему гидродинамически неустановившийся режим инерционного движения капли жидкости до и после коагуляции наночастицы компонента ТМО [7]

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = \frac{V_{ri}}{\tau_{\phi i}}, \quad (6)$$

где $\tau_{\phi i}$ – время релаксации i -й частицы,

$$\tau_{\phi i} = \tau_{\Sigma i} = k_i \frac{2 + 3\bar{\mu}}{3 + 3\bar{\mu}} \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{18\mu_r};$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{ж}}{\mu_r}.$$

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 (4).

Экспериментально установлено, 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 [8].

Поскольку в уравнении аэрогидродинамики капли жидкости в горизонтальной плоскости стратификатора Вентури (4) существенной переменной величиной является коэффициент сопротивления газовой среды движению капли жидкости k_i , установим его зависимость от физических величин, характеризующих гидродинамический процесс инерционного движения капли жидко-

сти 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

$$k_i = C \mu_r^\alpha \rho_r^\beta \sqrt{V_{ri}^2 + 0,25 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta \omega_{\Sigma i}^2}^\gamma d_{\Sigma i}^\varepsilon \left(\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \frac{\rho_{\Sigma i} - \rho_r}{\rho_r} \right)^\varphi V_0^\psi. \quad (7)$$

Для определения индикаторов подобия воспользуемся матрицей независимых размерностей, ранг которой равен трем [1]. С учетом однородной системы линейных уравнений, составленной из показателей степеней уравнения (7), матрица индикаторов подобия примет вид

	μ_r	ρ_r	$\sqrt{V_{ri}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta}$	$d_{\Sigma i}$	$\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \frac{\rho_{\Sigma i} - \rho_r}{\rho_r}$	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

Раскрывая определители матрицы (8), получим три индикатора подобия физического процесса установившегося аэрогидродинамического движения капли жидкости в газовой среде при больших числах Рейнольдса

$$\pi_1 = \frac{\rho_r^2 (V_{ri}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta) d_{\Sigma i}^2}{\mu_r^2} = \text{Re}_{\Sigma 0i}^2; \quad (9)$$

$$\pi_2 = \frac{P_i}{\rho_r V_0^2} = \frac{\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} d_{\Sigma i} (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r V_0^2} = \text{Eu}_i; \quad (10)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_r^2 V_0^2 d_{\Sigma i}^2}{\mu_r^2} = \text{Re}_{\Sigma 0i}^2. \quad (11)$$

Таким образом, уравнение (7) в критериальной форме примет вид

$$k_i = C (\text{Re}_{\Sigma 0i}^2)^a \text{Eu}_i^b (\text{Re}_{\Sigma 0i}^2)^c. \quad (12)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности C и показатели степени a, b, c в уравнении (12) определяем из уравнения установившегося движения капли жидкости в газовой среде

$$\frac{m_i \partial V_{ri}}{\partial t} = \text{Eu}_i \rho_r V_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}. \quad (13)$$

С учетом уравнений (4, 13) выражение для коэффициента аэродинамического сопротивления получим в виде

$$k_i = \frac{2}{3} \frac{\text{Eu}_i}{\text{Re}_{\Sigma 0i}^2 \text{Re}_{\Sigma 0i}^2}. \quad (14)$$

После соответствующих преобразований уравнений (12-14) относительно числа Рейнольдса получим уравнение для определения времени релаксации дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО в виде

$$\tau_{\text{чи}} = \frac{2 d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) \text{Re}_{0i}^2}{9 \text{Eu}_i \mu_r \text{Re}_{\Sigma i}^2}. \quad (15)$$

Учитывая, что критерии Рейнольдса и Эйлера функционально связаны между собой и 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 работе [8] получено выражение для изменения времени релаксации при больших числах Рейнольдса путем осреднения их значений. С учетом указанных данных выражение для критерия Эйлера в условиях неустановившегося гидродинамического движения на этапе релаксации дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО можно представить в виде

$$Eu_i = \frac{18 Re_{\Sigma i}}{Re_{0i}^2} (1 + 0,15 Re_{0i}^{0,687}). \quad (16)$$

Таким образом, с учетом данных, приведенных в работах [7, 8], среднее значение критерия Эйлера на участке релаксации дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО жидкости представим в виде

$$Eu_{cpi} = \frac{6}{Re_{0i}} (1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687}). \quad (17)$$

Учитывая соотношение между критерием Рейнольдса и коэффициентом сопротивления движению дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО в газовой среде, выражение для среднего значения коэффициента сопротивления в уравнении (7) запишем в виде

$$k_{cpi} = \frac{72}{Re_{0i}} (1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687}). \quad (18)$$

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

$$\tau_{\Sigma cpi} = 4d_{\Sigma i}^2 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)(1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687})(3 + 3\bar{\mu})}{Re_{0i}(2 + 3\bar{\mu})\mu_r} = K_\tau d_{\Sigma i}^2. \quad (19)$$

Из уравнения видно, что среднее время релаксации капель 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.

Учитывая однородность уравнений поступательного и вращательного движения тел в широком диапазоне чисел Рейнольдса, полученное соотношение для средних значений коэффициента сопротивления и времени релаксации может быть применено к угловой скорости вращения капля жидкости с интегрированными в них частицами ТМО, обусловленными вращением аэратора. При этом скорость вертикального перемещения дисперсной системы капля жидкости – микрочастица ТМО в кипящем слое может быть представлено в виде

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2} C_{\Sigma} \rho_r V_{\Gamma i}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g - 4 \cdot 10^{-4} \omega_0 \omega_a \rho_r \rho_{\Sigma i} d_{\Sigma i}^5 d_{\Sigma i}^{-2} \left(1 + \frac{d_a}{d_B}\right)}{\varphi \mu_r}, \quad (20)$$

где $\rho_{\Sigma i} = \frac{\rho_{\Sigma i}}{\rho_{ж}}$.

Из анализа уравнения (20) видно, что при выборе направления вращения аэратора можно добиться существенного замедления скорости вертикального перемещения частиц ТМО, изменяющейся пропорционально квадрату их диаметра, что повышает эффективность стратификации.

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 математической модели инерционной гидровихревой стратификации.

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

Диаметр стратификатора Вентури d_B при заданной его производительности определяем по формуле

$$d_B = 2\sqrt{\frac{K_p Q}{\pi \rho_q V_z}}, \quad (21)$$

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

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

$$V_0 = 3,2\sqrt{\frac{3}{2} \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{\rho_{\Sigma} d_{\Sigma \min}}} + \frac{d_B - d_a}{\tau_{\Sigma \text{cp}}}. \quad (22)$$

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

Координаты входного коллектора стратификатора z_1 , z_2 приемного бункера при заданном медианном диаметре d_m и его дисперсии σ_m определяем по формулам:

$$z_1 = \frac{C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 d_{\Sigma \max} - \frac{2}{3} (\rho_{\Sigma \max} - \rho_{\Gamma}) g d_{\Sigma \max}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \omega_a \rho_{\text{ж}} \rho_{\Sigma \max}^{-1} d_{4 \max}^5 d_{\Sigma \max}^{-3} \left(1 + \frac{d_a}{d_k}\right)}{10 \phi_{\Gamma} \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \delta_{ж-г} \cos \theta \rho_{\Sigma \max}^{-1} d_{\Sigma \max}^{-1}}}} \tau_{\Sigma \text{cp max}}; \quad (23)$$

$$z_2 = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 d_{\Sigma \min} - \frac{1}{3} (\rho_{\Sigma \min} - \rho_{\Gamma}) g d_{\Sigma \min}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \omega_a \rho_{\text{ж}} \rho_{\Sigma \min}^{-1} d_{4 \min}^5 d_{\Sigma \min}^{-3} \left(1 + \frac{d_a}{d_k}\right)}{\phi_{\Gamma} \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \delta_{ж-г} \cos \theta \rho_{\Sigma \min}^{-1} d_{\Sigma \min}^{-1}}}} \tau_{\Sigma \text{cp min}}, \quad (24)$$

где $d_{\Sigma \min} = d_{\Sigma m} - 3\sigma_m$; $d_{\Sigma \max} = d_{\Sigma m} + 3\sigma_m$.

На рис.3-6 представлены результаты экспериментальных исследований и их сравнения с расчетами по предложенной математической модели.

Данные экспериментальных исследований (рис.3) в сравнении с расчетом по предложенной математической модели подтверждают эффективность управления минимальным диаметром поглощаемых гидрофобных частиц ТМО с помощью угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой стратификации.

Результаты экспериментов и расчетов (рис.4, 5) показывают широкие возможности управления геометрическими параметрами и расположением входного коллектора приемного бункера с помощью угловой скорости вращения капель жидкости для обеспечения требуемой эффективности стратификации микрочастиц ТМО по фракциям.

Существенное изменение времени релаксации как по результатам эксперимента, так и по расчетным данным, приведенным на рис.6, 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.

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

Рис.3. Зависимость медианного диаметра смачивания частиц компонента ТМО от угловой скорости вращения капель жидкости при гидровихревой стратификации
1 – уголь; 2 – оксид кремния; 3 – оксид алюминия

Рис.4. Зависимость координаты входного коллектора стратификации от медианного диаметра частиц стратификации
1 – $\omega_a = 50 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\omega_a = 100 \text{ c}^{-1}$; 3 – $\omega_a = 150 \text{ c}^{-1}$

Рис.5. Зависимость ширины входного коллектора стратификатора от дисперсии медианного размера частиц стратификации
1 – $\omega_a = 50 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\omega_a = 100 \text{ c}^{-1}$; 3 – $\omega_a = 150 \text{ c}^{-1}$

Рис.6. Зависимость среднего времени релаксации капли жидкости с интегрированной в нее: а – частицей оксида алюминия от критерия Рейнольдса и б – частицей компонента ТМО от медианного диаметра
1 – $d_{\Sigma 3,5} \cdot 10^{-4}$, м; 2 – $d_{\Sigma 2,5} \cdot 10^{-4}$, м; 3 – $d_{\Sigma} \cdot 10^{-4}$, м; 4 – уголь; 5 – оксид кремния; 6 – оксид алюминия; $Re_0 = 40$

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

1. Диаметр полностью поглощаемых твердых частиц зависит от угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, что позволяет использовать данный физический процесс для классификации микро- и наночастиц ТМО.
2. Время релаксации капель жидкости с интегрированными в них микро- и наночастицами ТМО в процессе гидровихревой стратификации, а следовательно, и инерционные силы неустановившегося взаимодействия с вращающимися каплями жидкости зависят от медианного диаметра, что является основным определяющим фактором достижения высокой эффективности классификации.
3. Геометрические параметры гидровихревого стратификатора Вентури определяются потребной производительностью и энергетическими характеристиками его аэратора.
4. Гидровихревая стратификация позволяет сепарировать микрочастицы ТМО в диапазоне $0,5\text{--}5\cdot 10^{-6}$ м с дисперсией медианных размеров не более 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. Применительно к задачам электроэнергетики. М.: Либроком, 2014. 439 с.
2. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю.И.Гордеев, А.К.Абкарян, Г.М.Зеер, А.А.Лепешев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 3. С. 174-181.
3. Давыдов С.Я. Улавливание наноразмерной фракции частиц глиноземного производства / С.Я.Давыдов, Р.А.Апакашев, В.Н.Корюков // Новые огнеупоры. 2016. № 2. С. 12-15. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-2-12-15
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
5. 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. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-2-59-63
6. 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
7. Фролов А.В. Основы гидрообеспыливания / А.В.Фролов, В.А.Телегин, Ю.А.Сечкерев // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1-24.
8. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
9. 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
10. Davydov S.Ya. Capturing Nanoparticles in Alumina Production / S.Ya.Davydov, R.A.Apakashev, V.N.Korukov // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. Iss. 1. P.9-12. DOI: 10.1007/S11148-016-99-17-6
11. 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. Iss. 4. P. 291-294. DOI: 10.1007/S11148-014-97-11-2
12. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants / V.I.Lyashenko, A.A.Gurin, F.F.Topolnii, N.A.Taran // Metallurgical and mining industry. 2017. Iss. 4. P. 8-17.
13. Makarov V.N. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises / V.N.Makarov, S.Ya.Davydov // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. Iss. 1. P. 103-106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7
14. Novakovskiy N.S. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1D gas layer's problem subject to conditions on characteristic / N.S.Novakovskiy, S.P.Bautin // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894. № 1. P. 1-8. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067
15. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supply shaft 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
16. 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. 2017. Vol. 7. Iss. 1. P. 5-20. DOI: 10.3390/APP7010005

Авторы: В.Н.Макаров, д-р техн. наук, профессор, uk.intelnedra@gmail.com (Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия), А.В.Угольников, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, ugolnikov@yandex.ru (Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия), Н.В.Макаров, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, gmf.gm@urstm.ru (Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия).

Статья поступила в редакцию 03.06.2019.

Статья принята к публикации 26.07.2019.