

Д. т. н. **В. Н. Макаров**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉), к. т. н. **А. В. Угольников**,  
к. т. н. **Н. В. Макаров**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

УДК 622.7

## ГИДРОВИХРЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МИКРОЧАСТИЦ

Использование наноматериалов для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании тугоплавких композиционных материалов. Мелкодисперсный  $Al_2O_3$  является необходимым компонентом специальных высококачественных цементов, термостойких инертных огнеупоров и абразивных материалов. Получены уравнения средних значений критериев Эйлера и Рейнольдса, времени релаксации каплей жидкости с интегрированными в них наночастицами в зависимости от их медианного размера в процессе гидровихревой классификации. Проведенные испытания подтвердили, что в условиях автомоделной гидровихревой коагуляции в процессе гидровихревой классификации инерционные силы, действующие на неустановившееся гидровихревое движение дисперсной системы капля жидкости – микрочастица материала, существенно влияют на траекторию ее движения по сравнению с силами, действующими в направлении движения кипящего слоя дисперсного материала. При этом управляющее воздействие обеспечивает постоянное время релаксации, что существенно повышает эффективность влияния угловой скорости вращения капель на процесс классификации. Таким образом, инерционная гидровихревая классификация в режиме автомоделности позволяет управлять траекториями движения микрочастиц. При этом энергия поступательного движения капель жидкости, определяемая характеристиками гидровихревых форсунок азуратора, обеспечивает постоянство времени релаксации, обеспечивая диапазон медианного диаметра  $0,5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$  м с дисперсией не более 20 % от их медианного диаметра при большей ширине входного коллектора приемного бункера.

**Ключевые слова:** утилизация, классификация, критерий Рейнольдса, критерий Эйлера, гидрофобность, медианный размер наночастиц, дисперсия, классификатор Вентури, силы инерции.

Рассмотрено [1] влияние добавок легирующих керамических наноматериалов на структурные параметры и свойства твердых сплавов. В настоящее время в промышленных масштабах производят наноструктурные материалы всех типов: керамику, металлы, полупроводники и сверхтвердые материалы. При этом 98 % изделий, выходящих на рынок, составляют сухие порошки и жидкие дисперсные системы, которые используются для производства нанокристаллов и преимущественно оксидной керамики [2].

Известно, что мелкодисперсный  $Al_2O_3$  является необходимым компонентом специальных высококачественных цементов, термостойких инертных огнеупоров и абразивных материалов. Мелкодисперсную пыль можно использовать при производстве специальных видов спеченной керамики и электрокорунда. Возвратная наносодержащая глиноземная пыль представ-

ляет собой оборотный балласт, массовая доля которого составляет 7–14 % общего количества получаемого глинозема. Поскольку годовой объем производства глинозема в Российской Федерации оценивается 11,5 млн т, масса оборотной глиноземной пыли может быть использована в качестве легирующих элементов при производстве тугоплавких материалов и в электронной промышленности [3–6].

Исследования показывают, что эффективность утилизации ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианному размеру и дисперсности частиц наноматериалов. В большинстве случаев требуемый размер наночастиц находится в диапазоне  $d_c = 0,1 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}$  м, а их дисперсия не должна превышать  $3\sigma = 0,2d_m$ . Одним из сдерживающих факторов повышения эффективности утилизации является высокая энергоемкость и недостаточное совершенство техники и технологии классификации мелкодисперсных отходов металлургического производства [7, 8].

Настоящая статья посвящена разработке математической модели гидровихревой классификации в кипящем слое наночастиц и устройства для ее реализации в виде гидровихревого классификатора Вентури и выполнена в развитие идей, изложенных в статье [9]. Задача заключа-



С. Я. Давыдов  
E-mail: davidovtrans@mail.ru

ется в разработке способа классификации частиц размерами  $0,5 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}$  м с дисперсией медианных размеров  $\pm 5\%$  и эффективностью содержания заданной фракции не менее  $97\%$  и в создании устройства, обеспечивающего классификацию частиц в заданном диапазоне размеров путем их коагуляции за счет инерционных сил вращающихся капель жидкости.

Для установления зависимости между энергией дисперсной системы капли жидкости – микрочастица, потоком энергии вертикального ее движения в кипящем слое и геометрическими параметрами классификатора Вентури в процессе инерционной гидровихревой классификации необходимо получить уравнения движения частиц в зависимости от действующих на них сил.

Динамически активный участок гидровихревой коагуляции в классификаторе Вентури, характеризующийся неустановившимся надстоксовским режимом течения, в котором сила лобового сопротивления существенно зависит от критериев Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu), может быть представлен математической моделью с осредненными значениями критериев, описывающих данный процесс.

С учетом [1, 9–12] коэффициент вариаций медианного диаметра  $d_m$  поглощаемых наночастиц  $K_\omega^d$  в зависимости от угловой скорости вращения капель жидкости получим в виде

$$K_\omega^d = 48 \frac{\delta_{ж-г}}{(\rho_{ж-г} - \rho_{г}) V_{ж}^2} \cdot K_\omega^2 \cdot \cos \theta (\omega_{ж}^3 - K_\omega^2 \cdot \omega_{ж}^7) - K_\omega \cdot \sin \theta \cdot \omega_{ж}, \quad (1)$$

где  $\delta_{ж-г}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела жидкость – газ, Дж/м<sup>2</sup>;  $\rho_{ж}$  и  $\rho_{г}$  — плотность частицы и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{ж}$  — скорость капли жидкости, м/с;  $K_\omega$  — коэффициент влияния угловой скорости вращения капли жидкости на минимальный диаметр поглощаемых частиц,  $K_\omega = \frac{\pi \rho_{ж} d_{мин}^3 \cdot \sin^4 \theta}{8 \delta_{ж-г} \cdot \cos \theta}$ ;  $\theta$  — краевой угол смачивания на границе раздела жидкость – газ, рад;  $\omega_{ж}$  — угловая скорость вращения капли жидкости, с<sup>-1</sup>;  $\rho_{ж}$  — плотность капли жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{мин}$  — минимальный диаметр поглощаемой твердой частицы в условиях классической коагуляции при  $\omega_{ж} = 0$ , м.

Предложенная гидровихревая классификация характеризуется высокой чувствительностью к угловой скорости вращения капель жидкости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для построения математической модели неустановившегося гидродинамического взаимодействия капли жидкости с твердыми частицами в условиях надстоксового движения при  $Re > 1$  примем допущение о том, что в процес-

се движения капли жидкости сохраняет сферическую форму  $d_{ж}$  той же плотности, что и жидкость капли, у которой аэродинамические характеристики движения в газовой среде соответствуют фактическим характеристикам движения капель при тех же числах Рейнольдса. Диаметр  $d_{ж}$  принятой сферической частицы будем считать аэродинамическим диаметром капли [13].

Уравнение движения  $i$ -й частицы, поглощенной каплей жидкости в проекции на ось  $Ox$ , в плоскости расположения гидровихревых форсунок аэратора с учетом рис. 1 запишем в виде [14]:

$$m_i \frac{\partial V_{xi}}{\partial t} = F_{xi}, \quad (2)$$

где  $m_i$  — масса капли жидкости с интегрированной в нее  $i$ -й частицей, кг,  $m_i = \frac{\pi}{6} d_{\Sigma i}^3 \rho_{\Sigma i}$ ;  $V_{xi}$  — скорость сжатого воздуха, создающего кипящий слой, м/с;  $F_{xi}$  — сила сопротивления движению капли жидкости с интегрированной в нее микрочастицы в гидровихревом классификаторе,  $F_{xi} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{г} \cdot V_{\Sigma i}^2$ ;  $k_i$  — коэффициент сопротивления движению капли жидкости с интегрированной в нее  $i$ -й частицей;  $V_{\Sigma i}$  — скорость  $i$ -й частицы, м/с.

Уравнение движения  $i$ -й частицы, поглощенной каплей жидкости, в проекции на ось  $Oz$  имеет вид

$$m_i \frac{\partial V_{zi}}{\partial t} = -F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Di}, \quad (3)$$

где  $V_{zi}$  — вертикальная составляющая скорости  $i$ -й частицы, м/с;  $F_{Ai}$  — сила Архимеда, направленная вниз, действующая на  $i$ -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести,  $F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{г}) g$ ;  $F_{Ci}$  — сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья,  $F_{Ci} = \frac{\phi}{2} \mu_{г} \pi d_{\Sigma i} V_{zi}$ ;  $F_{Di}$  — сила давления сжатого газа, создающего кипящий слой,  $F_{Di} = C_c \rho_{г} V_{г}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2$ ;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\phi$  — коэффициент формы частицы в законе Стокса;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха, кг/(м·с);  $C_c$  — коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой действующий на  $i$ -ю частицу.

В отличие от статьи [15] в данном случае рассматривается автомодельное течение с неподвижным аэратором.

Коэффициент  $k_i$  в уравнении (2) с использованием теории подобия [16] запишем в виде:

$$k_i = C \cdot \mu_{г}^{\alpha} \cdot \rho_{г}^{\beta} \sqrt{V_{г}^2 + 0,25 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta \cdot \omega_{ж}^2} \cdot d_{\Sigma i}^{\epsilon} \cdot \left( \frac{\partial V_{xi}}{\partial t} \cdot \frac{\rho_{ж} - \rho_{г}}{\rho_{г}} \right)^{\phi} \cdot V_{г}^{\psi}. \quad (4)$$

С учетом автомодельности течения от  $V_0$  получим критерии подобия в виде:

$$\pi_1 = \frac{\rho_r^2 (V_{ri}^2 + 0,25\omega_{ж}^2 \cdot d_{\Sigma i}^2 \cdot \sin^2 \theta) d_{\Sigma i}^2}{\mu_r^2} = \text{Re}_{\Sigma i}^2, \quad (5)$$

$$\pi_2 = \frac{P_i}{\rho_r \cdot V_0^2} = \frac{\frac{\partial V_{ri}}{\partial t} \cdot d_{\Sigma i} (\rho_{ж} - \rho_r)}{\rho_r \cdot V_0^2} = \text{Eu}_i. \quad (6)$$

Таким образом, уравнение (4) в критериальной форме примет вид

$$k_i = C \cdot (\text{Re}_{\Sigma i}^2)^a \cdot \text{Eu}_i^b. \quad (7)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности  $C$  и показатели степени  $a$  и  $b$  в уравнении (7) определяем из уравнения автомодельного движения капли жидкости с интегрированной в нее микрочастицей в газовой среде:

$$\frac{m_i \partial V_{ri}}{\partial t} = \text{Eu}_i \cdot \rho_r \cdot V_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}. \quad (8)$$

Таким образом, при больших скоростях  $V_0$  можно подобрать медианный диаметр классифицируемых частиц, при котором процесс классификации будет протекать в автомодельном режиме, т. е. независимо от критерия  $\text{Re}$  на выходе из аэратора.

Уравнение, связывающее между собой коэффициент аэродинамического сопротивления  $k_i$ , критерии  $\text{Re}$  и  $\text{Eu}$ , в условиях автомодельного течения, получим в виде

$$k_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\text{Eu}_i}{\text{Re}_{\Sigma i}^2}. \quad (9)$$

Уравнение для определения времени релаксации  $\tau_{\Sigma i}$  дисперсной системы капля жидкости – микрочастица, соответствующего режимам автомодельного течения, получим в виде

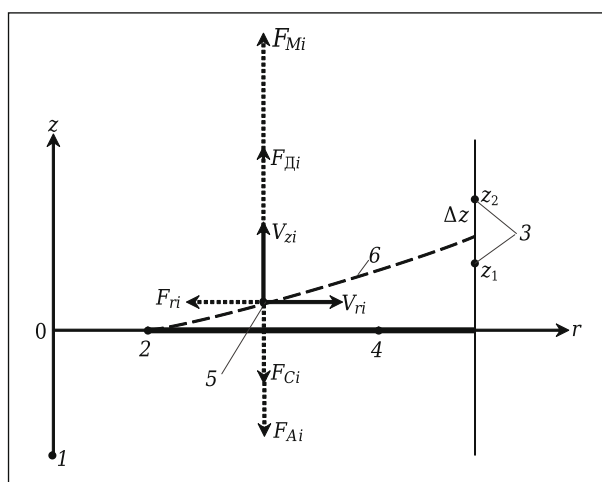
$$\tau_{\Sigma i} = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\text{Eu}_i \cdot \mu_r \cdot \text{Re}_{\Sigma i}^2}. \quad (10)$$

Учитывая автомодельность течения для заданного медианного диаметра, время релаксации и коэффициент сопротивления будут постоянными величинами, определяемыми вязкостью и плотностью микрочастиц и капель жидкости:

$$\tau_{\Sigma i} = K_{\tau} \cdot d_{\Sigma i}^2, \quad (11)$$

где  $K_{\tau}$  — коэффициент, определяющий соотношения времени релаксации и диаметра микрочастиц в условиях автомодельного течения,  $K_{\tau} = 4 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)(3 + 3\bar{\mu})}{(2 + 3\bar{\mu})\mu_r}$ .

Из уравнения (11) видно, что для каждого значения времени релаксации существует ме-



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

дианный диаметр, для которого достигается режим автомодельности и обеспечивается соответствующая классификация микрочастиц.

Учитывая однородность уравнений поступательного и вращательного движения тел в широком диапазоне чисел Рейнольдса, скорость вертикального перемещения дисперсной системы капля жидкости – микрочастица в кипящем слое может быть представлена в виде

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_r V_{ri}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g}{\Phi \cdot \mu_r}. \quad (12)$$

Таким образом, предложенный вариант автомодельности течения с неподвижным аэратором позволяет подбирать заданную скорость  $V_0$ , при которой обеспечивается классификация микрочастиц с заданным медианным диаметром  $d_m = d_{\Sigma i} \pm 3\sigma_m$ .

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

Диаметр трубы Вентури  $d_B$  классификатора при заданной его производительности определяем по формуле

$$d_B = 2 \sqrt{\frac{K_p Q}{\pi \rho_{ж} V_z}}, \quad (13)$$

где  $K_p$  — коэффициент плотности кипящего слоя частиц,  $K_p = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{к.с}}$ ;  $\rho_{к.с}$  — плотность частиц материала в состоянии кипящего слоя.

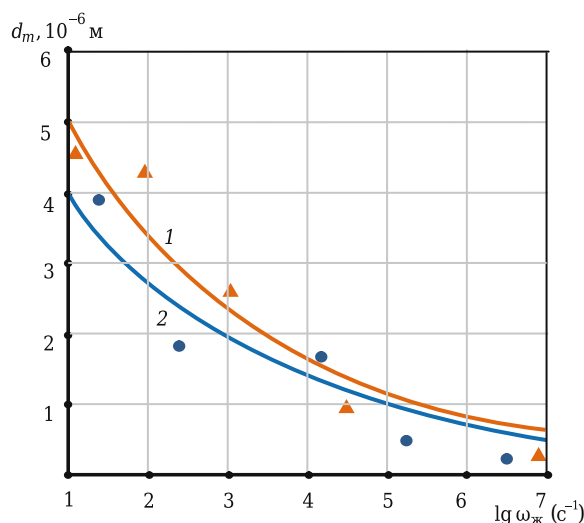
Ширину входного коллектора приемного бункера  $\Delta z$  в зависимости от медианного диаметра  $d_m$  и его дисперсии  $\sigma_m$  определяем по формуле

$$\Delta z = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_r V_r^2 d_{\Sigma \min} - \frac{1}{3} (\rho_{\Sigma \min} - \rho_r) g \cdot d_{\Sigma \min}^2 - C_c \rho_r V_r^2 d_{\Sigma \max} + \frac{2}{3} (\rho_{\Sigma \max} - \rho_r) g \cdot d_{\Sigma \max}^2}{\varphi \mu_r \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \cdot \delta_{ж-г} \cos \theta \rho_{\Sigma \min}^{-1} d_{\Sigma \min}^{-1}}}}, \quad (14)$$

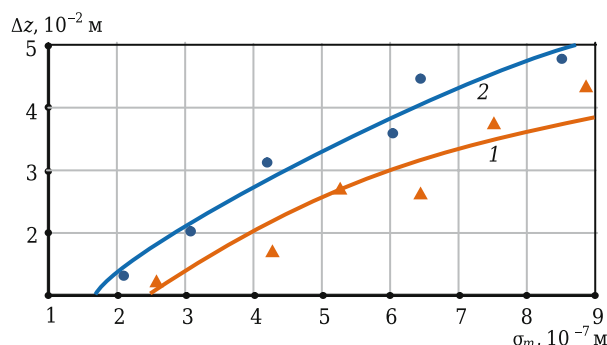
где  $d_{\Sigma \min} = d_m - 3\sigma_m$ ;  $d_{\Sigma \max} = d_m + 3\sigma_m$ .

На рис. 2, 3 показаны результаты экспериментальных исследований и их сравнения с расчетами по предложенной математической модели.

Данные экспериментальных исследований в сравнении с расчетными по предложенной математической модели, показанные на рис. 2, доказывают возможность управления минимальным диаметром поглощаемых гидрофобных частиц материала с помощью угловой скорости вращения капель жидкости в процессе гидровихревой классификации.



**Рис. 2.** Зависимость медианного диаметра  $d_m$  поглощения частицы материала от угловой скорости вращения  $\omega_{ж}$  капель жидкости при гидровихревой классификации: 1 — оксид кремния; 2 — оксид алюминия



**Рис. 3.** Зависимость ширины  $\Delta z$  входного коллектора приемного бункера от дисперсии  $\sigma_m$  частиц медианного размера: 1 — оксид кремния; 2 — оксид алюминия;  $d_m = 2 \cdot 10^{-6}$  м

Показанные на рис. 3 результаты экспериментов и расчетов показывают, что при высоких скоростях  $V_0$ , обеспечивающих автомоделный

режим по времени релаксации, достигается требуемая дисперсия медианного размера частиц при большей ширине входного коллектора приемного бункера.

Результаты испытаний опытного образца гидровихревого классификатора Вентури ГKB-55, проведенных в аттестованной лаборатории Сухоходской машиностроительной компании «СМК-ТЕСТ», подтвердили достаточную для инженерных расчетов сходимость с предложенной математической моделью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях автомоделной гидровихревой коагуляции в процессе гидровихревой классификации инерционные силы, действующие на неустановившееся гидровихревое движение дисперсной системы капля жидкости – микрочастица материала, существенно влияют на траекторию ее движения по сравнению с силами, действующими в направлении движения кипящего слоя дисперсного материала. При этом управляющее воздействие обеспечивает постоянное время релаксации, что существенно повышает эффективность влияния угловой скорости вращения капель жидкости на процесс классификации. Таким образом, инерционная гидровихревая классификация в режиме автомоделности позволяет управлять траекториями движения микрочастиц. При этом энергия поступательного движения капель жидкости, определяемая характеристиками гидровихревых форсунок аэратора, обеспечивает постоянство времени релаксации, достигая диапазона медианных диаметров  $0,5 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$  м с дисперсией не более 20 % от их медианного диаметра при большей ширине входного коллектора приемного бункера.

## Библиографический список

1. Гордеев, Ю. И. Влияние добавок, легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю. И. Гордеев, А. К. Абкарян, Г. М. Зеер [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 3. — С. 174–181.
2. Kovshov, S. V. Chemical technology of dust suppression on open-pit mines / S. V. Kovshov, V. P. Kovshov // International Journal of Ecology and Development. — 2015. — Vol. 30, № 3. — P. 55–67.



3. **Davydov, S. Ya.** Utilization of alumina calcining furnace dust containing nanoparticles / S. Ya. Davydov, R. A. Apakashev, V. N. Korukov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 291–294.

**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.

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

5. **Davydov, S. Ya.** Capturing nanoparticles in alumina production / S. Ya. Davydov, R. A. Apakashev, V. N. Korukov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 9–12.

**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.

6. **Wu, D.** Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control / D. Wu, K. Yin, Q. Yin [et al.] // *Applied sciences (Switzerland).* — 2017. — Vol. 7, № 1. — P. 5–20. DOI: 10.3390/AP7010005/.

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

8. **Makarov, V. N.** Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises / V. N. Makarov, S. Ya. Davydov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 103–106.

**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.

9. **Makarov, V. N.** Genesis of ecotechnology efficiency in the production of dust-forming materials / V. N. Makarov, S. Ya. Davydov, N. V. Makarov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2019. — Vol. 60, № 1. — P. 115–119.

**Макаров, В. Н.** Генезис эффективности экотехнологии в производстве пылеобразующих материалов / В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов, Н. В. Макаров // *Новые огнеупоры.* — 2019. — № 2. — С. 55–59.

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

11. **Макаров, В. Н.** Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания / В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, В. В. Потапов, Э. М. Горшкова // *Вестник ЗабГУ.* — 2018. — Т. 24, № 5. — С. 13–20.

12. **Макаров, В. Н.** 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.

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

14. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа : уч. для вузов. — 7-е изд., испр. / Л. Г. Лойцянский. — М. : Дрофа, 2003. — 840 с.

15. **Макаров, В. Н.** Оптимизация геометрических параметров гидровихревого стратификатора Вентури / В. Н. Макаров, А. В. Угольников, Н. В. Макаров // *Записки Горного института.* — 2019. — Т. 240. — С. 638–648.

16. **Веников, В. А.** Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики : уч. для вузов. — 4-е изд. / В. А. Веников. — М. : Либроком, 2014. — 439 с.

17. **Фукс, Н. А.** Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. — М. : Изд-во АН СССР, 1955. — 352 с. ■

Получено 24.09.19

© В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов,  
А. В. Угольников, Н. В. Макаров, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

