

УДК 678.01:004.94

Арсланов Азамат Альфизович

студент,
Уральский государственный горный
университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30
e-mail: arslanov.azamat.2000@mail.ru

Бельских Анна Михайловна

студент,
Уральский государственный горный
университет

Макаров Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
Уральский государственный горный
университет

Макаров Владимир Николаевич

доктор технических наук, доцент,
Уральский государственный горный
университет

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОГО КЛАССИФИКАТОРА ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация:

В России ежегодно образуется 3,5 млрд т техногенных минеральных отходов (ТМО), и на сегодняшний день накоплено более 80 млрд т. На долю ТМО металлургических компаний приходится от 1 до 2 млрд т. К примеру, только в Уральском регионе более 9 млрд т ТМО, а доля утилизации составляет всего лишь 30 %. В современном мире микро- и наночастицы активно используются в разных областях, начиная от медицины и заканчивая ракетостроением. Результативность переработки ТМО определяется жесткими параметрами гранулометрических характеристик получаемого продукта. Выпускаемые в настоящее время классификаторы тонкодисперсных ТМО отличаются сложностью изготовления, калибровки и обеспечения стабильности технологического процесса. В данной статье предложена конструкция и методология расчета эффективного классификатора ТМО с использованием принципа гидровихревого разделения частиц с разными диаметрами. Конструкция предлагаемого классификатора и принцип его действия основаны на природоподобном явлении формирования вихревого жгута в процессе закрутки влажного воздуха и природной пыли в смерч, то есть на принципе «Торнадо». На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что диапазон наименьших диаметров поглощаемых микрочастиц в случае их вращения вокруг собственной оси зависит исключительно от угловой скорости вращения капель жидкости, с которыми они сталкиваются. С использованием уравнения Эйлера и модели вихревого вращательного движения капель жидкости получены уравнения для расчета геометрических параметров классификатора, обеспечивающего эффективное разделение микрочастиц тонкодисперсных ТМО по фракциям с заданной дисперсией. По результатам проведенного математического моделирования и экспериментальных исследований изготовлен и испытан опытно-промышленный образец эффективного гидровихревого классификатора ГКВ-400.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.007

Arslanov Azamat A.

student,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg,
30 Kuibysheva Str.
e-mail: arslanov.azamat.2000@mail.ru

Belskikh Anna M.

student,
Ural State Mining University,
e-mail: belskikh-2015@mail.ru

Makarov Nikolay V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Ural State Mining University

Makarov Vladimir N.

Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Ural State Mining University

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF AN EFFECTIVE CLASSIFIER OF FINE-DISPERSED TECHNOGENIC MINERAL WASTE

Abstract:

3.5 billion tons of technogenic mineral waste (TMW) are generated annually in Russia, and more than 80 billion tons of waste have been accumulated to date. The share of TMW of metallurgical companies accounts for from 1 to 2 billion tons. In addition, rare earth and non-ferrous metals, alumina and iron oxides are among the TMW. For example, there are more than 9 billion tons of TMW in the Ural region alone, and the share of recycling is only 30 percent. In the modern world, micro- and nanoparticles are actively used in various fields: from medicine to rocket science. The effectiveness of the processing of TMW is determined by the rigid parameters of the granulometric characteristics of the resulting product. Currently produced classifiers of fine-dispersed TMW are characterized by the complexity of manufacturing, calibration and ensuring the stability of the technological process. This article proposes a design and methodology for calculating an effective TMW classifier using the principle of hydrovortex separation of particles with different diameters. The design of the proposed classifier and the principle of its operation are based on the nature-like phenomenon of the formation of a vortex bundle in the process of swirling moist air and natural dust into a tornado, that is, on the principle of "Tornado". Based on the conducted experimental studies, it was found that the range of the smallest diameters of the absorbed microparticles in cases of their rotation around their own axis depends solely on the angular velocity of rotation of the liquid droplets with which they collide. Using the Euler equation and the model of vortex rotational motion of liquid droplets, equations were obtained for calculating the geometric parameters of the classifier, which provides effective separation of microparticles of fine-dispersed TMW by fractions with a given dispersion. Based on the results of the conducted mathematical modeling and experimental studies, a pilot industrial sample of an effective hydro-vortex classifier GKV-400 was manufactured and tested.

Ключевые слова: классификация, утилизация, гетерокоагуляция, гидровихревые критерии Рейнольда и Эйлера, мелкодисперсные техногенные отходы, минеральные образования.

Key words: classification, utilization, heterocoagulation, Reynold and Euler hydro-vortex criteria, fine-dispersed TMW, fine-dispersed technogenic waste, mineral formations.

Введение

Современное машиностроительное производство требует создания материалов с заданными, определяемыми технологией свойствами. Существенную роль в этом играет качество исходных материалов, их гранулометрический состав, наличие специальных легирующих добавок [1].

Легирующие исходных материалов специальными микрочастицами, выделяемыми из ТМО, позволяет существенно расширить возможности создания материалов с уникальными физико-механическими и технологическими свойствами. В соответствии со стратегией развития машиностроения на период до 2030 г. прирост использования специальных композитных материалов заложен не менее 8 %. Однако существенным ограничителем производства специальных легирующих добавок является низкая эффективность выпускаемых в настоящее время классификаторов мелкодисперсных ТМО, не позволяющих получать микрочастицы заданного фракционного состава и дисперсности [2].

Предмет и методология исследований

Произведены разработка конструкции и построение математической модели эффективного классификатора тонкодисперсных ТМО на базе критериальных уравнений гидровихревой классификации ТМО [3]. Физический принцип классификации ТМО в предлагаемом устройстве основан на проверенной экспериментально гипотезе зависимости минимального диаметра улавливаемой каплей жидкости микрочастицы от угловой скорости ее вращения при условии превышения значения числа Рейнольдса, определяемого постуральной скоростью движения капли жидкости, ее энергетического барьера.

Принципиально предлагаемое устройство эффективного классификатора ТМО состоит из камеры для вертикального перемещения тонкодисперсных ТМО и гидровихревых форсунок, обеспечивающих коагуляцию микрочастиц.

Принципиальная схема гидровихревого классификатора приведена на рис. 1.

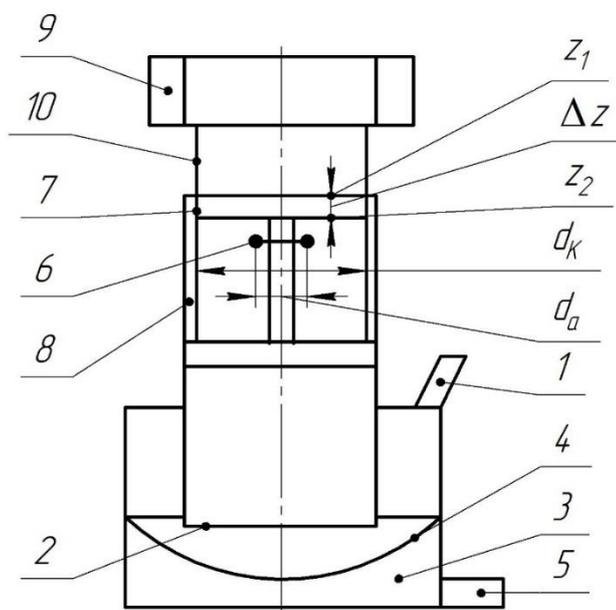


Рис. 1. Принципиальная схема гидровихревого классификатора

Гидровихревой классификатор состоит из питателя 1 для загрузки ТМО, установленного 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. В критическом сечении у трубы по ее оси установлен гидровихревой аэратор с форсунками 6, а по его периметру расположен коллектор классификации 7 с бункерами 8 сбора частиц компонентов ТМО по фракциям, на выходе из трубы установлен приемный бункер 9 для отходов, не соответствующих размерам классификации.

Классификатор работает следующим образом. Сыпучий материал частиц ТМО из питателя 1 непрерывно направляют в смесительную камеру 3, в которую через патрубок 4, через пористую газораспределительную перегородку 2 под слой ТМО подают сжатый газ. Сжатым газом сыпучий материал аэрируют до псевдосжиженного состояния и подают через коллектор 2 пневмотранспортного трубопровода, на вход в трубу 10. Капли жидкости, закрученные вокруг собственной оси в гидровихревых форсунках аэратора 6, смачивают частицы сыпучего материала, находящегося в состоянии кипящего слоя. Кинетическая энергия и скорость вращения капель жидкости обеспечивают гарантированную коагуляцию частиц сыпучего материала ТМО с заранее заданным минимальным диаметром.

Инерционные взаимодействия микрочастиц, вращающихся капель жидкости и поток энергии кипящего слоя определяют траекторию движения микрочастиц ТМО.

Математическое моделирование

Целью моделирования является определение геометрических параметров эффективного классификатора тонкодисперсных ТМО, построение уравнений движения микрочастиц ТМО в условиях их полного поглощения каплями жидкости. На рис. 2 приведены силы, действующие на микрочастицу ТМО, полностью поглощенную каплей жидкости при ее движении в классификаторе.

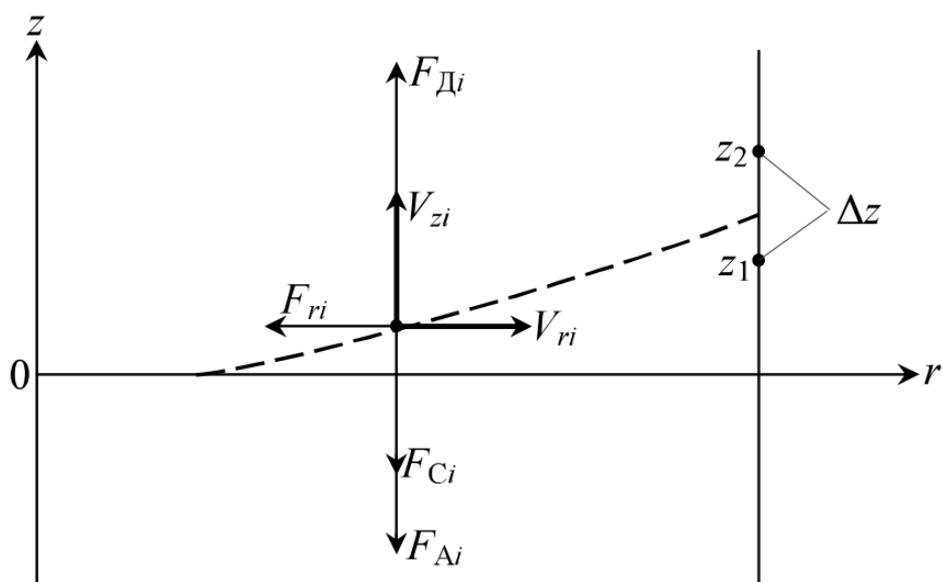


Рис. 2. Силы, действующие на микрочастицу ТМО, полностью поглощенную каплей жидкости при ее движении в классификаторе

Уравнения Ньютона, соответствующие движению поглощенной каплей жидкости i -й частицы в проекциях на ось $0r$ и $0z$, в соответствии с рис. 2 получены в следующем виде [4 – 5]:

$$m_i \frac{\partial V_{ri}}{\partial t} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{\Gamma} \cdot V_{\Sigma i}^2; \quad (1)$$

$$m_i \frac{\partial V_{zi}}{\partial t} = -\frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\Gamma}) g - \frac{\phi}{2} \mu_{\Gamma} \pi d_{\Sigma i} V_{zi} + C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma i}^2 \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2, \quad (2)$$

где k_i – коэффициент сопротивления i -й частицы; $d_{\Sigma i}$ – диаметр i -й частицы, м; ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; $V_{\Sigma i}$ – скорость i -й частицы, м/с; C_c – коэффициент силы давления сжатого газа, создающего кипящий слой, действующей на i -ю частицу; V_{Γ} , V_{zi} – скорость сжатого газа, создающего кипящий слой, и вертикальная составляющая скорости i -й частицы, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ϕ – коэффициент формы частицы в законе Стокса; μ – коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

Уравнение гидродинамического неустановившегося режима инерционного движения микрочастицы ТМО, поглощенной вращающейся каплей жидкости с учетом (1), (2) (уравнение Буссинеска), получим в виде [6 – 7]:

$$V_{zi} = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma i}^2 d_{\Sigma i} - \frac{1}{3} d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_{\Gamma}) g}{\phi \cdot \mu_{\Gamma}}. \quad (3)$$

С учетом [7] усредненного значения коэффициента аэродинамического сопротивления получим уравнение в виде:

$$k_{cpi} = \frac{72}{Re_{0i}} (1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687}). \quad (4)$$

В соответствии с уравнением Буссинеска, с учетом (4), результатов, приведенных в [8, 9], получим формулу для расчета усредненного времени релаксации микрочастицы и капли жидкости:

$$\tau_{\chi i} = 4 d_{\Sigma i}^2 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_{\Gamma})(1 + 0,07 Re_{0i}^{0,687})(3 + 3\mu)}{Re_{0i} \cdot (2 + 3\mu) \mu_{\Gamma}}. \quad (5)$$

Функциональная зависимость между диаметром i -й частицы ТМО и временем релаксации дисперсной системы лежит в основе принципа действия предложенного гидровихревого классификатора тонкодисперсных ТМО.

Геометрические параметры гидровихревого классификатора тонкодисперсных ТМО с учетом вышеуказанных результатов и анализа литературных источников [10, 11] получим в следующем виде:

$$d_{\kappa} = 2 \left(V_0 - 1,6 \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\delta_{\text{ж-г}} \cos \theta}{\rho_{\Sigma} d_{\Sigma m}}} \right) \tau_{\Sigma \text{ср}} + d_a; \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{\frac{1}{2} C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 d_{\Sigma \text{min}} - \frac{1}{3} (\rho_{\Sigma \text{min}} - \rho_{\Gamma}) g \cdot d_{\Sigma \text{min}}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \rho_{\Sigma \text{min}}^{-1} \cdot d_{4 \text{min}}^5 \cdot d_{\Sigma \text{min}}^{-3} (1 + \frac{d_a}{d_{\kappa}})}{\phi \mu_{\Gamma} \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \cdot \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta \rho_{\Sigma \text{min}}^{-1} d_{\Sigma \text{min}}^{-1}}}} \cdot \tau_{\Sigma \text{срmin}}; \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{C_c \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 d_{\Sigma \text{max}} - \frac{2}{3} (\rho_{\Sigma \text{max}} - \rho_{\Gamma}) g \cdot d_{\Sigma \text{max}}^2 - 5 \cdot 10^{-4} \omega_0 \cdot \omega_a \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \rho_{\Sigma \text{max}}^{-1} \cdot d_{4 \text{max}}^5 \cdot d_{\Sigma \text{max}}^{-3} (1 + \frac{d_a}{d_{\kappa}})}{10 \phi \mu_{\Gamma} \ln \frac{V_0}{\sqrt{6 \cdot \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta \rho_{\Sigma \text{max}}^{-1} d_{\Sigma \text{max}}^{-1}}}} \cdot \tau_{\Sigma \text{срmax}}. \quad (8)$$

Экспериментальные исследования гидровихревого классификатора осуществлялись в лаборатории «Цифровизация и сервис вентиляторных установок горного, металлургического и нефтегазового комплексов» на базе Уральского государственного горного университета.

Приведенные на рис. 3, 4 результаты показывают зависимость положения входного коллектора классификатора и его размера от медианного диаметра классифицируемых микрочастиц ТМО и его дисперсии. Увеличение медианного диаметра монотонно уменьшает высоту положения входного коллектора классификации по плоскости расположения гидровихревых форсунок азратора и его высоту. Таким образом, чем меньше

медианный диаметр микрочастиц подлежит классификации, тем ближе входной коллектор классификации расположен в плоскости гидровихревых форсунок. Уменьшение дисперсии медианного размера потребной фракции микрочастиц требует уменьшения высоты одного коллектора классификатора. С доверительной вероятностью 0,95 отклонения экспериментальных и теоретических результатов не превышают 9 %, что достаточно для инженерных расчетов параметров классификаторов.

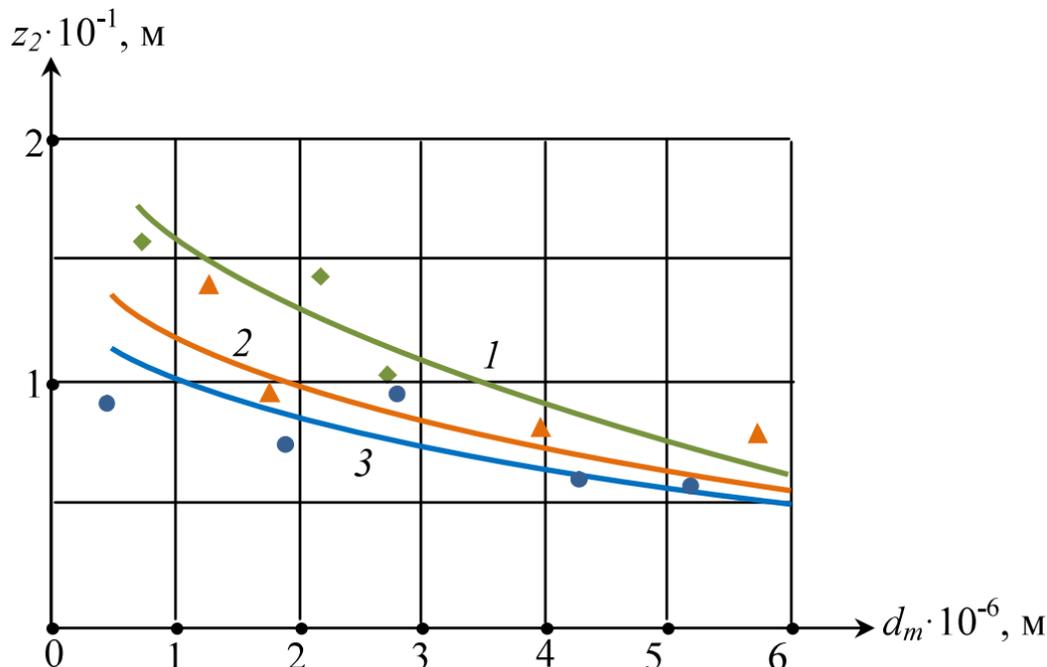


Рис. 3. Зависимость координаты входного коллектора классификатора от медианного диаметра частиц классификации:
1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия

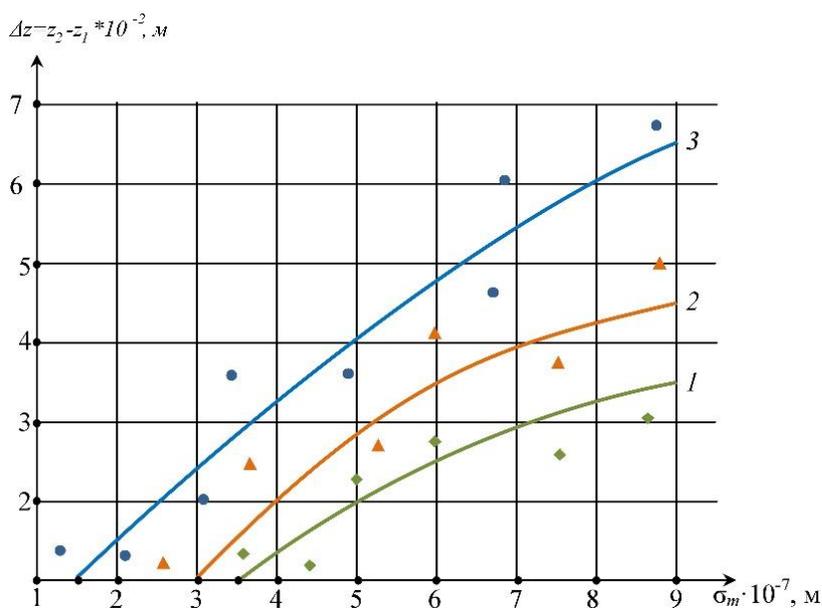


Рис. 4. Зависимость ширины входного коллектора стратификатора от дисперсии медианного размера частиц классификации:
1 – уголь; 2 – окись кремния; 3 – окись алюминия; $d_m = 2 \cdot 10^{-6}$, м

Выводы

С использованием экспериментально подтвержденной гипотезы зависимости минимального диаметра коагулируемых вращающихся капель жидкости микрочастиц ТМО установлена квадратичная функциональная зависимость диаметра микрочастицы с усредненным временем ее релаксации.

На базе полученной функциональной зависимости минимального диаметра коагуляции и времени релаксации предложен эффективный классификатор тонкодисперсных ТМО с использованием принципа гидровихревой инерционной коагуляции.

На базе уравнений гидровихревой классификации получены формулы расчета диаметра камеры классификатора и координат местоположения классификационного приемного бункера в зависимости от требуемого фракционного состава и дисперсии классифицируемых микрочастиц.

Экспериментально проведена верификация результатов теоретических исследований, подтверждена достаточная для инженерных расчетов достоверность.

Список литературы

1. Гордеев Ю.И., Абкарян А.К., Зеер Г.М. и др., 2013. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*, № 3, С. 174 – 181.
2. Davydov S.Ya., Apakashev R.A., Korukov V.N., 2016. Capturing Nanoparticles in Alumina Production. *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 57, No. 1, P. 9 – 12.
3. Косарев Н.П., Макаров В.Н., Макаров Н.В., Угольников А.В., Лифанов А.В., 2018. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, Т. 18, № 2, С. 178 – 189.
4. Угольников А.В., Макаров В.Н., Макаров Н.В., Лифанов А.В., 2019. Критериальные уравнения – теоретические основы технологии гидровихревой классификации мелкодисперсных техногенных отходов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 5 (135), С. 74 – 83.
5. Арсланов А.А., Бельских А.М., Пешкова И.Д., 2019. Математическая модель гидровихревой классификации техногенных отходов. *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции*: в 2 ч. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», С. 186 – 188.
6. Макаров Н.В., Лифанов А.В., Макаров В.Н., Арсланов А.А., Бельских А.М., 2019. Математическая модель влияния инерционных сил на процесс гидровихревой коагуляции. *Математическое моделирование механических явлений. Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Екатеринбург: Изд. УГГУ, С. 45 – 49.
7. Фролов А.В., Телегин В.А., Сечкерев Ю.А., 2007. Основы гидрообеспыливания. *Безопасность жизнедеятельности*, № 10, С. 1 – 24.
8. Арсланов А.А., Пешкова И.Д., Бельских А.М., Макаров В.Н., 2019. Гидровихревой стратификатор Вентури. *Международная научно-практическая конференция "Уральская горная школа - регионам". Уральская горнопромышленная декада: материалы конференции*. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, С. 141 – 142.
9. Веников В.А., 2014. *Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики*: учебник, 4-е изд. Москва: Либроком, 439 с.
10. Косарев Н.П., Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Дылдин Г.П., 2020. Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 4(60), С. 155 – 165. DOI 10.21440/2307-2091-2020-4-155-165.

11. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P., 2017. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences (Switzerland)*, T. 7, № 1, P. 5 – 20. DOI: 10.3390/app7010005.

References

1. Gordeev Yu.I., Abkaryan A.K., Zeer G.M. i dr., 2013. Vliyanie dobavok legiruyushchikh keramicheskikh nanochastits na strukturnye parametry i svoystva tverdykh splavov [Influence of addition of alloying ceramic nanoparticles on the structural parameters and properties of hard alloys]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, № 3, P. 174 – 181.

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

3. Kosarev N.P., Makarov V.N., Makarov N.V., Ugol'nikov A.V., Lifanov A.V., 2018. Effektivnaya lokalizatsiya vzryvov ugol'noi pyli s ispol'zovaniem gidrovikhrevoi koagulyatsii [Efficient localization of coal dust explosions using hydrovortex coagulation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, Vol. 18, № 2, P. 178 – 189.

4. Ugol'nikov A.V., Makarov V.N., Makarov N.V., Lifanov A.V., 2019. Kriterial'nye uravneniya – teoreticheskie osnovy tekhnologii gidrovikhrevoi klassifikatsii melkodispersnykh tekhnogennykh otkhodov [Criteria equations as the theoretical foundations of the technology of hydrovortex classification of fine-dispersed technogenic waste]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 5 (135), P. 74 – 83.

5. Arslanov A.A., Bel'skikh A.M., Peshkova I.D., 2019. Matematicheskaya model' gidrovikhrevoi klassifikatsii tekhnogennykh otkhodov [Mathematical model of hydrovortex classification of industrial wastes]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei XXIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 ch.* Penza: MTsNS "Nauka i Prosveshchenie", P. 186 – 188.

6. Makarov N.V., Lifanov A.V., Makarov V.N., Arslanov A.A., Bel'skikh A.M., 2019. Matematicheskaya model' vliyaniya inertsionnykh sil na protsess gidrovikhrevoi koagulyatsii [Mathematical model of the influence of inertial forces on the process of hydro-vortex coagulation]. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh yavlenii. Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii.* Ekaterinburg: Izd. UGGU, P. 45 – 49.

7. Frolov A.V., Telegin V.A., Sechkerev Yu.A., 2007. Osnovy gidroobespylivaniya [Fundamentals of hydrodedusting]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, № 10, P. 1 – 24.

8. Arslanov A.A., Peshkova I.D., Bel'skikh A.M., Makarov V.N., 2019. Gidro-vikhrevoi stratifikator Venturi [Hydro-vortex Venturi stratifier]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ural'skaya gornaya shkola - regionam". Ural'skaya gornopromyshlennaya dekada: materialy konferentsii.* Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet, P. 141 – 142.

9. Venikov V.A., 2014. Teoriya podobiya i modelirovaniya primenitel'no k zadacham elektroenergetiki [Theory of similarity and modeling in relation to the tasks of the electric power industry]: uchebnik, 4-e izd. Moscow: Librokom, 439 p.

10. Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Makarov N.V., Dyldin G.P., 2020. Shakhtnaya aerologiya pylevykh aerozolei v usloviyakh gidrovikhrevoi koagulyatsii [Mining aerology of dust aerosols under conditions of hydrovortex coagulation]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 4(60), P. 155 – 165. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4-155-165.

11. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P., 2017. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 7, № 1, P. 5 – 20. DOI: 10.3390/app7010005.