

КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

В.Н. Макаров¹, А.В. Угольников¹, Н.В. Макаров¹, Е.О. Чураков¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Аннотация: Актуальность повышения эффективности улавливания угольной пыли обусловлена ростом интенсификации производственных процессов. Для повышения эффективности высоконапорного пылеподавления предложена технология и критериальное уравнение для расчета энергоэффективности улавливания пыли на базе математической модели процесса. Показано, что эффективность улавливания угольной пыли зависит от качества диспергирования капель жидкости, т. е. степени их дробления. Построено критериальное уравнение эффективности пылеулавливания, связывающие критерии Вебера и Рейнольдса, рассчитанные с учетом кинематики вращательного движения капель жидкости. Доказано снижение расходной скорости с ростом угловой скорости вращения капель жидкости при заданных величинах чисел Вебера и Рейнольдса, что позволяет снизить расход воды при гидровихревом пылеулавливании. Показано повышение эффективности дробления капель жидкости, т. е. уменьшение их медианного диаметра с расчетом угловой скорости вращения. С учетом кинематики гидровихревого обеспыливания получен патент на форсунку с двойной циркуляцией потока диспергируемой жидкости с вращением капель по пространственной спирали и одновременно вокруг скорости поступательного движения. Экспериментальная отработка предложенной конструкции форсунки подтвердила рост эффективности пылеулавливания с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости, т.е. относительной скорости капель тангенциальных встречных потоков на поверхности разрыва. Интегральная эффективность во всем диапазоне диаметров частиц пыли составила не менее 99% при дроблении капель жидкости до диаметра $2 \cdot 10^{-5}$ м, при снижении общего расхода воды на 10%.

Ключевые слова: высоконапорное гидровихревое пылеулавливание, гидровихревая форсунка, циркуляционное движение, критерий Вебера, критерий Лапласа, присоединенный вихрь, диффузия, энергоэффективность.

Для цитирования: Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Чураков Е. О. Критериальное уравнение энергоэффективности улавливания угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. – С. 126–136. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_126.

Criterion equation for the energy efficiency of coal dust precipitation

V.N. Makarov¹, A.V. Ugolnikov¹, N.V. Makarov¹, E.O. Churakov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Abstract: The urgency of the efficiency improvement in coal dust precipitation is determined by the development of industrial processes. To increase the efficiency of high-pressure dust precipitation the authors suggested a method and a criterion equation for the calculation of the energy efficiency of dust precipitation. The patented design of a hydrovortex nozzle, which enables the significant increase in the effectiveness of the liquid drops dispersion was suggested. The design was based on a mathematical model of interaction between a liquid droplet and a dust particle under the action of the attached vortex induced by rotating liquid droplets. Similarity criteria of dispersion in the spinning motion of liquid droplets were obtained using the theory of similarity and the dimensional analysis. The study shows that the principal criterion characterizing the quality index of a liquid droplet split performed by a hydrovortex nozzle is the Weber number. Furthermore, it specifies the cost efficiency in water and energy for hydrovortex dust suppression. Simulation data test proved the sufficient convergence of the dependence of efficiency enhancement to hydrovortex dust suppression on the angular velocity of drops rotation. It is shown that hydrovortex dust suppression allows to increase the efficiency of dedusting up to 99% by means of the quality of splitting and the increase in the dispersion of liquid droplets. The calculations and experimental studies enabled to increase the efficiency of dispersion by 15%, reducing the average diameter of liquid droplets 2.5 times, thus, abating its consumption by 10%.

Key words: high-pressure hydrovortex dust suppression, hydrovortex nozzle, circular motion, Weber numbers, Laplas numbers, attached vortex, diffusion, energy efficiency.

For citation: Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Makarov N. V., Churakov E. O. Criterion equation for the energy efficiency of coal dust precipitation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-2):126-136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_126.

Введение

Структура себестоимости продукции горных предприятий в значительной степени обременена затратами на создание нормативных условий труда в технологическом пространстве. Параметры рудных материалов и в первую очередь угля характеризуются высокой степенью пылеобразования, отличаются взрывоопасностью, в силу витаемости [1, 2]. Рост производительности труда в шахтах актуализирует проблему повышения эффективности снижения затрат на обеспечение санитарных требований, снижения опасности возгорания и взрыва угольной пыли [3, 4]. Поглощение или подавление пыли, находящейся во взвешенном состоянии, каплей жидкости — часто используемый вариант борьбы с

повышенной запыленностью. Даже средства изоляции и средств снижения ветровой нагрузки на открытые угольные склады и другие насыпные техногенные массивы применяются в комбинации с устройствами водоаэрозольного пылеподавления [5]. Используемое в настоящее время оборудование для высоконапорного пылеулавливания обладает большой энергоемкостью и крайне низкой парциальной эффективностью, особенно в части частиц пыли с медианным диаметром менее $5 \cdot 10^{-5}$ м, отличающихся высокой пожароопасностью [6–8].

В связи с вышеуказанным, создание пылеулавливающего оборудования обеспечивает эффективность диспергирования капель жидкости для повышения парциальной эффективности улавлива-

ния пыли, снижения расхода жидкости, приобретает важное для экономики горной промышленности комплексное значение [9–11].

В статьях [12, 13] исследована кинематика гидровихревого пылеулавливания за счет создания депрессии в зоне контакта частиц пыли и капель жидкости, обусловленной вращением последних. Полученные кинематическая и динамическая модели взаимодействия капель жидкости и частицы пыли, используются в данной статье для расчета критериального уравнения энергоэффективности улавливания угольной пыли [14–16].

Эффективность улавливания частиц пыли определяется главным образом двумя факторами: количеством капель жидкости, диспергируемых в данном ее объеме, и энергией, необходимой для поглощения капель жидкости частицы пыли [17, 18]. Таким образом, необходимо построить математическую модель, связывающую кинематические параметры процесса взаимодействия частиц пыли и капель жидкости с критериями Вебера и Рейнольдса, характеризующими способность капель жидкости к диспергированию и соотношение сил вязкости и инерции.

Постановка задачи

Поскольку критериальное уравнение энергоэффективности пылеулавливания должно функционально устанавливать зависимость между критерием Вебера, определяющим скорость капель жидкости к дроблению, и критерием Рейнольдса, характеризующим отношение сил вязкости и инерции, т.е. кинематические параметры жидкости, необходимо установить связь между указанными критериями и кинематикой в условиях вращения капель жидкости вокруг вектора расходной скорости при выходе из форсунки и функциональную зависимость расходной скорости движения капли

жидкости от ее удельной потенциальной энергии. При этом энергоэффективность пылеулавливания функционально определяет степень диспергирования капель жидкости, т.е. фактически количество капель жидкости диспергирования в единице объема жидкости.

Уравнение связи расходной скорости капли жидкости из сопла форсунки с удельной потенциальной энергией жидкости представим в форме:

$$V_{0\text{ж}} = \sqrt{(V_{0\text{г}} - V_{\text{г}})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{\text{ж}}^2} = k_D \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{ж}}}} \quad (1)$$

где $V_{0\text{ж}}$ — начальная расходная скорость движения капли жидкости, м/с; $V_{\text{г}}$ — скорость газа, м/с; d_c — диаметр канала гидровихревой форсунки, м; $\omega_{\text{ж}}$ — угловая скорость вращения капли жидкости, с⁻¹; $k_{\text{ф}} = (0,73 \div 0,97)$ — коэффициент формы канала гидровихревой форсунки; P — удельная потенциальная энергия жидкости, Па; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, кг/м³.

Таким образом фактически энергоэффективность улавливания пыли зависит от отношения диаметра потока форсунки, медианного диаметра капель жидкости, выходящих из форсунки $k_3 = d_c / d_3$ [19, 20].

Методология исследования

На базе второй теоремы Веникова о подобии сложных систем получим критериальное уравнение энергоэффективности пылеулавливания с учетом установленной ее связи со степенью диспергирования жидкости в гидровихревой форсунке [21–23]. Представим, как степенную зависимость параметров, определяющих процесс дробления в форсунке в виде:

$$\bar{d}_{\text{жс}} = k \sqrt{\left(V_{\text{жс}} - V_{\text{г}} \right)^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{\text{жс}}^2}^a \cdot \rho_{\text{г}}^b \cdot d_c^g \cdot \Delta_{\text{жс}}^2 \cdot \mu_{\text{жс}}^e \cdot \mu_{\text{г}}^{\text{жс}} \cdot \omega_{\text{жс}}^3 \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности в критериальном уравнении; $V_{ж}$ – поступательная скорость движения капель жидкости, м/с; $V_{г}$ – скорость газа, м/с; d_c – диаметр канала гидровихревой форсунки, м; $a, б, в, г, д, е, ж, з$ – показатели степени вышеуказанной функции; $\omega_{ж}$ – угловая скорость вращения капель жидкости c^{-1} ; ρ_r – плотность жидкости и газа, $кг/м^3$; $\Delta_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения капель жидкости $Дж/м^2$; $\mu_{ж}, \mu_r$ – коэффициент динамической вязкости капель жидкости и газа соответственно, $кг/мс$.

Критерии подобия найдем из:

$$\|M\| = \begin{array}{c|cccccccc} & \sqrt{(V_{ж} - V_{г})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{ж}^2} & \rho_r & d_c & \Delta_{ж} & \rho_{жс} & \mu_{жс} & \mu_r & \omega_{жс} \\ \hline M & 1 & -3 & 1 & 0 & -3 & -1 & -1 & 0 \\ \hline L & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline T & -1 & 0 & 0 & -2 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{array} \quad (3)$$

Соответственно из системы уравнений получим неизвестные в уравнении (2):

$$\begin{cases} a - 3б + в - 3д - е - жс = 0 \\ б + 2 + д + е + жс = 0 \\ -a - 2г - е - жс - 3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Матрицу критериев и индикаторов подобия получим в виде:

$$\|M_{\pi}\| = \begin{array}{c|cccccc|cc} & d_c & \Delta_{жс} & \mu_r & \rho_r & \rho_{жс} & \sqrt{(V_{ж} - V_{г})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{жс}^2} & \omega_{жс} & \mu_{жс} \\ \hline \pi_1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ \hline \pi_2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ \hline \pi_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \pi_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline \pi_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ \hline & в & г & жс & б & д & а & з & е \end{array} \quad (5)$$

Из (5) получим

$$\pi_1 = We_{сэф} = \frac{[(V_{ж} - V_{г})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{жс}^2] \cdot \rho_r \cdot d_c}{\Delta_{жс}} \quad \text{— критерий Вебера, определяющий способность капель жидкости к диспергированию};$$

$$\pi_2 = Lp = \frac{d_c \rho_{жс} \Delta_{жс}}{\mu_{жс}^2} \quad \text{— критерий Лапласа, характеризующий отношение сил вязкости и поверхностного натяжения}; \quad (6)$$

$\pi_3 = \rho_r / \rho_{жс}$ – индикатор инерционной характеристики жидкости и газа;

$\pi_4 = \mu_r / \mu_{жс}$ – индикатор, определяющий соотношение сил вязкости жидкости и газа;

$$\frac{\pi_5}{2} = \pi_k \frac{d_c \omega_{жс}}{\sqrt{(V_{ж} - V_{г})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{жс}^2}} = \cos \varphi \quad \text{— индикатор кинематического подобия}$$

процесса гидровихревого диспергирования и коагуляции, где φ – угол спирали, вращающейся капли жидкости.

Диспергируемость капель жидкости зависит от соотношения сил вязкости и инерции и определяется критерием π_1 , из которого видно, что с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости в канале форсунки растет эффективное значение критерия Вебера, что улучшает диспергируемость жидкости при заданном диаметре канала форсунки.

В надстоксовом режиме высоконапорного гидровихревого пылеулавливания определяющую диспергируемую роль играет эффективность Вебера. При этом уравнение (1) показывает эффективность вращения капель жидкости для увеличения критерия Вебера, т.е. диспергируемости при фиксированной потенциальной энергии жидкости. Таким образом при постоянных энергозатратах растет диспергируемость и как результат эффективность пылеулавливания.

Кроме того, это связано с изменением критерия Рейнольдса:

$$Re_{эф} = \frac{\sqrt{(V_{жс} - V_z)^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{жс}^2} \cdot d_c \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс}} \quad (7)$$

Регулируя вращение капель жидкости можно управлять эффективным значением вышеуказанных критериев.

С учетом уравнения Лапласа функциональная связь диаметра сопла форсунки и диспергируемой жидкости при ее вращении получим в виде:

$$(V_{жс} - V_z)^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{жс}^2 = 8 \frac{\sigma_{жс}}{d_{жс}^k} \gamma \rho_z \quad (8)$$

где $\sigma_{жс}$ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Дж/м²; $d_{жс}^k$ — критический диаметр устойчивости к диспергированию вращающейся капли жидкости, м; γ — коэффициент аэродинамического сопротивления газа; ρ_z — плотность газа, кг/м³.

С учетом (8) уравнение (6) имеет вид:

$$We_{эф кр} = 8/\gamma. \quad (9)$$

Учитывая, что в надстоксовом движении коэффициент аэродинамического

сопротивления газа существенно изменяется, при движении капель жидкости с достаточной для расчетов точностью он может быть осреднен, поскольку в активной зоне факела расходуется не менее 99,8% их кинетической энергии.

Таким образом, в надстоксовом режиме не соответствующим высоконапорному гидровихревому диспергированию, критерий Вебера, с учетом выше сказанного, определяется по формуле

$$We_{эф кр} = f(Re_{эф}) = \frac{Re_{0эф}}{1 + 0,07Re_{0эф}^{0,687}} \quad (10)$$

Для аналитического выражения критериального уравнения энергоэффективности пылеулавливания выразим средний диаметр диспергируемой капли жидкости, как показатель эффективности через критическое значение критерия Вебера для нее и сопла форсунки

$$d_{ж} / d_c = We_{эф кр} / We_{с эф кр} \quad (11)$$

где $We_{с эф кр}$ — критическое значение критерия Вебера для диаметра канала гидровихревой форсунки.

После преобразований, получим

$$k_3 = 0,156 We_{с эф кр} \quad (12)$$

что подтверждает расход энергоэффективности гидровихревого пылеулавливания ростом критерия Вебера, рассчитанного с учетом угловой скорости вращения капель жидкости.

Обсуждение

На рис. 1 приведен график, подтверждающий возрастание критерия Вебера с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости, что подтверждает полученные аналитические выражения этого критерия (6) при вращении капель жидкости. Рост эффективного значения Вебера, при угловой скорости вращения капель жидкости 10⁵ с⁻¹ достигает 20%, что дает возможность при фиксированной расходной скорости $V_{ож}$ увеличивать

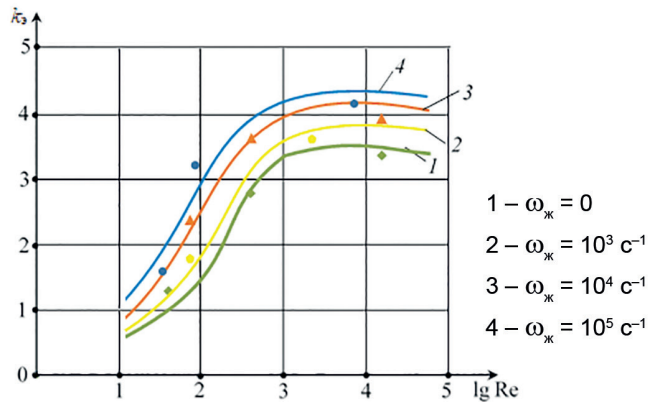


Рис. 1. График приведенной энергоэффективности пылеулавливания от критерия Re при значении угловой скорости вращения диспергируемой жидкости

Fig. 1. The graph of the reduced energy efficiency of dust collection from the criterion Re at the value of the angular velocity of rotation of the dispersed liquid

степень диспергирования, т.е. дробления капель жидкости.

Из анализа уравнений (5, 14, 17) видно, что гидровихревые форсунки, обеспечивающие вращение диспергируемых капель жидкости вокруг поступательной скорости, существенно повышают энергоэффективность пылеподавления. При фиксированной расходной скорости капель жидкости $V_{\text{ж}}$ с увеличением угловой

скорости их вращения $\omega_{\text{ж}}$ энергоэффективность пылеулавливания существенно возрастает за счет вращающихся капель жидкости. Установлено, что эффективное значение критерия Вебера фактически является приведенной энергоэффективностью пылеулавливания.

Для установления зависимости эффективности гидровихревого пылеподавления и степени диспергируемой жидко-

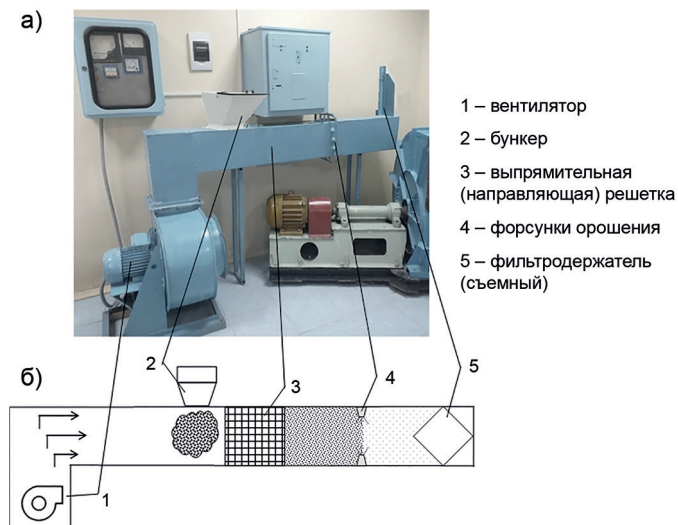


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментальной установки гидровихревого пылеулавливания УГВП-1

Fig. 2. The external view scheme (a) and the scheme (b) of experimental hydrovortex dust precipitator UGVP-1

сти проводились экспериментальные исследования на установке гидровихревого пылеподавления УГВП-1 (рис. 2, а).

Лабораторная установка гидровихревого пылеподавления УГВП-1 разработана авторами для создания запыленности воздуха и определения концентрации пыли до и после использования гидровихревых форсунок запатентованной конструкции [24]. Изображение данной установки, является фотографией в масштабе 1:100, площадь поперечного сечения трубы 0,25 м².

Установка (рис. 2, б) состоит из пылевой камеры, которая представляет собой емкость, имитирующую производственное помещение с запыленным воздухом. В передней стенке камеры находится бункер-дозатор 2 с пылью. При повороте ручки дозатора в камеру вводится порция пыли. Общая масса навески пылевого материала составляет 50 мг, проходя через выпрямительную решетку 3 пыль, развевается в камере с помощью вентилятора 1, примыкающего к пылевой камере, в зависимости от очередности опыта включаются форсунки орошения 4, исходя из угла распыла в 30° в установке их 18 шт. Угловая скорость вращения и диаметр капли жидкости на выходе из гидровихревой форсунки

рассчитывается косвенно, исходя из геометрии форсунок. На боковой стенке камеры имеется фильтродержатель 5 с электроаспиратором для взятия проб концентрации пыли.

В связи с особенностью конструкции пылемер в составе установки не использовался, эффективность пылеподавления определяется путем взвешивания на аналитических весах с точностью до 0,1 мг и определения массы навески осевшей пыли на фильтре по разности масс «чистого» и «грязного» фильтров.

В ходе испытаний авторами было обнаружено, что на участке трубы между форсунками 4 и фильтродержателем 5 возможна адгезия некоторой части смоченных частиц пыли, данное явление также учитывалось при определении значения эффективности пылеподавления. Эффективность гидровихревых форсунок определяется с учетом параметров капель жидкости на выходе из сопла форсунки. Данный метод позволяет определять эффективность гидровихревых форсунок в зоне факела распыления.

На рис. 3 приведены графики зависимости диаметра капель диспергированной жидкости от критического значения критерия Рейнольдса при различных значениях угловой скорости капли,

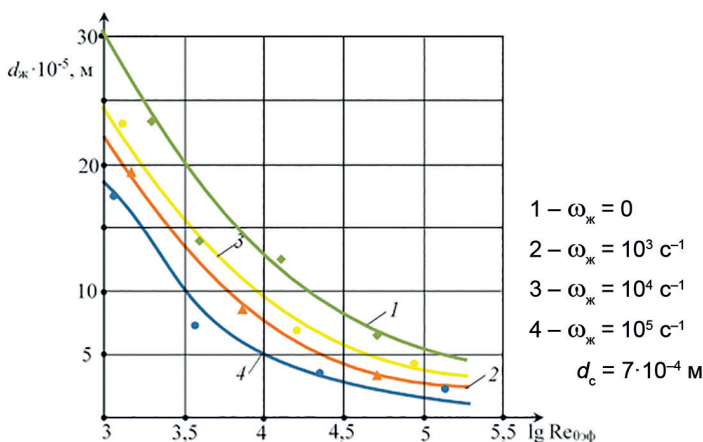


Рис. 3. Зависимость диспергируемости медианного диаметра капель жидкости от критерия Re
 Fig. 3. The graph of the dependency of dispersed liquid drops diameter on Reynolds number Re

т.е. различных значениях эффективного критерия Рейнольдса при заданных расходной скорости движения жидкости на выходе из гидровихревой форсунки.

Анализ графиков показывает высокую эффективность диспергирования капель жидкости в гидровихревых форсунках за счет роста угловой скорости их вращения. В частности, угловая скорость вращения 10^5 с^{-1} позволяет в 2,5 раза увеличить эффективность диспергирования капель жидкости снижая тем самым на 10% расход воды и энергозатраты на коагуляцию.

Выводы

1. Построено критериальное уравнение эффективности пылеулавливания, связывающее критерии Вебера и Рейнольдса, рассчитанное с учетом кинема-

тики вращательного движения капель жидкости.

2. Доказано снижение расходной скорости с ростом угловой скорости вращения капель жидкости при заданных величинах чисел Вебера и Рейнольдса, что позволяет снизить расход воды при гидровихревом пылеулавливании.

3. С учетом кинематики гидровихревого обеспыливания получен патент на форсунку с двойной циркуляцией потока диспергируемой жидкости с вращением капель по пространственной спирали и одновременно вокруг скорости поступательного движения.

4. Интегральная эффективность во всем диапазоне диаметров частиц пыли составила не менее 99% при дроблении капель жидкости до диаметра $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, при снижении общего расхода воды на 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко А. И., Евтушенко И. И., Нор-Аревян С. Л., Бельская Я. В. К вопросу исследования путей повышения эффективности пылеподавления орошением // Инженерный вестник Дона. — 2016. — Т. 42. — № 3(42). — С. 46 — 55.

2. Валиев Н. Г., Страданченко С. Г., Голодов М. А., Армейсков В. Н., Масленников С. А. К концепции охраны окружающей среды угледобывающего региона // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 7. — С. 80 — 91.

3. Alimenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev A. V., Petrov A. I. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot end cool air mixing in a supplyshaft in underground mine // Eurasian Mining. 2016, no. 2, pp. 45 — 47.

4. Ivanov A. V., Strizhenok A. V. Evaluation of the effectiveness of dust screens and the possibilities of taking into account their influence in software models // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012008.

5. Nikolaev A. V., Lyalkina G. B., Kychkin A. V., Vöth S. Season-oriented mine ventilation modes analysis // Eurasian Mining. 2021, no. 2, pp. 81 — 85.

6. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block // Refractive and Industrial Ceramics. 2017, vol. 38, no. 3, pp. 288 — 292. DOI: 10.1007/s11148-017-0098-8.

7. Borowski G., Smirnov Yu., Ivanov A., Danilov A. E. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2020, no. 1, pp 1 — 13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

8. Макаров В. Н., Угольников А. В., Матеров А. Ю., Макаров Н. В., Таугер В. М. Модификация критериального уравнения гидровихревого пылеподавления на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 53 — 61. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-53-61.

9. Валиев Н. Г., Симисинов Д. И., Кошкарров В. Е., Ахметов А. Ф. Эмульсионные профилактические средства из тяжелых нефтяных остатков для обеспыливания карьерных автодорог и отвалов техногенных отходов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2015. — № 8. — С. 13 — 21.

10. *Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M.* Multilevel optimization of the splitter blade profile in the impeller of a centrifugal compressor // *Scientia Iranica*. 2017, no. 24, pp. 707 – 714. DOI: 10.24200/sci.2017.4055.

11. *Пелевин А. Е., Сытых Н. А.* Особенности процесса классификации в гидро-циклонах при измельчении титаномагнетитовой руды // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2021. – № 1. – С. 74–84. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84.

12. *Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Свердлов И. В.* Энергоэффективная технология локализации техногенных аварий в шахтах на базе математической модели гидровихревой коагуляции // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2019. – № 2. – С. 118–127. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-118-127.

13. *Косарев Н. П., Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Лифанов А. В.* Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 78–189. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7.

14. *Николаев А. В.* Энергоэффективное кондиционирование шахтного воздуха в неглубоких рудниках // *Горный журнал*. – 2017. – № 3. – С. 71–74. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.13.

15. *Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C.* Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face // *Powder Technology*. 2019, vol. 343, pp. 754–764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042.

16. *Han H., Wang P., Liu R.* Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2020, vol. 7, no. 3, pp. 581 – 596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

17. *Wang P.* Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency. Ph. D. Thesis. UCL University. London, 2017. 213 p.

18. *Mao Y. F.* Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system. Ph. D. Thesis. Xian Jiaotong University, Xian. 2016, 174 p.

19. *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*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.

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

21. *Bautin S. P.* Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // *High Temperature*. 2014, vol. 52, no. 2, pp. 259–263. DOI: 10.7868/S0040364414020033.

22. *Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M.* Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades // *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, 2016*, pp. 1 – 7.

23. *Davydov S. Y., Valiev N. G., Tauger V. M.* Effect of the flow of transported bulk material on design features of a belt conveyor // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019, vol. 60, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.1007/s11148-019-00301-5.

24. *Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Дылдин Г. П., Чураков Е. О.* Патент № 2737161 С1, 25.11.2020. Способ гидровихревого кинематического пылеподавления и устройство для его реализации. 2020. Бюл. 33. **ПАБ**

REFERENCES

1. Evtushenko A. I., Evtushenko I. I., Nor-Arevyan S. L., Bel'skaya Ya. B. On the question of research ways to improve the effectiveness of dust control irrigation. *Engineering journal of Don*. 2016, vol. 42, no. 3(42), pp. 46 – 55. [In Russ].

2. Valiev N. G., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A., Golodov M. A., Armeiskov V. N. Environmental protection of a coal-mining region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 7, pp. 80–91. [In Russ].

3. Alimenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev A. V., Petrov A. I. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot end cool air mixing in a supplyshaft in underground mine. *Eurasian Mining*. 2016, no. 2, pp. 45–47.

4. Ivanov A. V., Strizhenok A. V. Evaluation of the effectiveness of dust screens and the possibilities of taking into account their influence in software models. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012008.

5. Nikolaev A. V., Lyalkina G. B., Kychkin A. V., Vöth S. Season-oriented mine ventilation modes analysis. *Eurasian Mining*. 2021, no. 2, pp. 81–85.

6. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block. *Refractions and Industrial Ceramics*. 2017, vol. 38, no. 3, pp. 288–292. DOI: 10.1007/s11148-017-0098-8.

7. Borowski G., Smirnov Yu., Ivanov A., Danilov A. E. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020, no. 1, pp 1–13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

8. Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Materov A. Yu., Makarov N. V., Tauger V. M. Modified criterion equation of hydro vortex dust suppression in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 7, pp. 53–61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-53-61.

9. Valiev N. G., Simisinov D. I., Koshkarov V. E., Akhmetov A. F. Emulsive preventives from black oil for dust removal at opencast automobile roads and technogenic wastes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 13–21. [In Russ].

10. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Multilevel optimization of the splitter blade profile in the impeller of a centrifugal compressor. *Scientia Iranica*. 2017, no. 24, pp. 707–714. DOI: 10.24200/sci.2017.4055.

11. Pelevin A. E., Sytykh N. A. The features of classification in hydrocyclones in the course of titanium magnetite ore grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 74–84. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84.

12. Makarov V. N., Makarov N. V., Ugol'nikov A.V., Sverdlov I. V. Energy-efficient technology of technogenic accidents containment in mines based on a numerically simulated model of hydro vortex coagulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 2, pp. 118–127. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-118-127.

13. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugol'nikov A.V., Lifanov A. V. Effective localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2018, vol. 18, no. 2, pp. 78–189. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7.

14. Nikolaev A. V. Energy efficient mine air conditioning in shallow mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 3, pp. 71–74. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.13.

15. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face. *Powder Technology*. 2019, vol. 343, pp. 754–764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042.

16. Han H., Wang P., Liu R. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2020, vol. 7, no. 3, pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

17. Wang P. *Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency*. Ph. D. Thesis. UCL University. London, 2017. 213 p.

18. Mao Y. F. *Numerical study of correlation between the surge of centrifugal compressor and the piping system*. Ph. D. Thesis. Xian Jiaotong University, Xian. 2016, 174 p.

19. 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*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.

20. Lyashenko V. I., Gurin A., Topolnyy F. F., Taran N. A. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017, no. 4, pp 8–17.

21. Bautin S. P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. *High Temperature*. 2014, vol. 52, no. 2, pp. 259–263. DOI: 10.7868/S0040364414020033.

22. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Seoul, 2016, pp. 1–7.

23. Davydov S. Y., Valiev N. G., Tauger V. M. Effect of the flow of transported bulk material on design features of a belt conveyor. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019, vol. 60, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.1007/s11148-019-00301-5.

24. Makarov V. N., Makarov N. V., Ugolnikov A. V., Dyldin G. P., Churakov E. O. *Patent RU 2737161 S1*, 25.11.2020. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Владимир Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

Угольников Александр Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: ugolnikov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8442-4841,

Макаров Николай Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,

Чураков Евгений Олегович¹ — аспирант, e-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Угольников А.В., e-mail: ugolnikov@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Makarov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

A.V. Ugolnikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: ugolnikov@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8442-4841, N.V. Makarov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,

e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272, E.O. Churakov¹, Graduate Student,

e-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru.

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A.V. Ugolnikov, e-mail: ugolnikov@yandex.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 01.10.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 01.10.2022; accepted for printing 10.10.2022.