

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОВИХРЕВОГО ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ

А. В. Угольников¹, В. Н. Макаров¹, Н. В. Макаров¹, Г. П. Дылдин¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Ведение горных работ открытым и подземным способом с использованием современного высокопроизводительного добычного технологического оборудования не только увеличивает выработку, но и приводит к резкому повышению концентрации угольной пыли в забоях. При этом существенно возрастает доля наиболее опасной с точки зрения санитарно-гигиенических требований и взрывобезопасности мелкодисперсной угольной пыли. Проведённые исследования показали, что с ростом нагрузки на очистной забой возрастает степень слоистости пылегазовой смеси, что опасно с позиции возникновения больших локальных концентраций угольной пыли. Основным способом для снижения пылеобразования в подземных выработках и на карьерах является водоаэрозольное пылеподавление. Данная система пылеулавливания в условиях локальной концентрации угольной пыли не в состоянии оперативно снижать уровень запыленности до разрешенных значений. Результаты экспериментальных исследований на предложенной установке выполнены с учетом критериев гидродинамического подобия и использования актуализированных методов оценки их достоверности, научно-обоснованной возможности их масштабирования на горных предприятиях. Полученные результаты многократно сравнивались с расчетами по разработанной математической модели, подтвердив тем самым высокую эффективность гидровихревого пылеподавления частиц пыли с медианным диаметром менее 2·10⁻⁶ м, обеспечивая улавливание не менее 75% при равном давлении жидкости и уменьшенном на 10% ее расходе. При этом, с надежностью 0,95, погрешность математической модели не превышала 8%.

Ключевые слова: Гидровихревое пылеподавление, гидровихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция, критерий Стокса, гидрофобность, медианный диаметр.

Для цитирования: Угольников А. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В., Дылдин Г. П. Экспериментальные исследования эффективности гидровихревого пылеподавления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–1. – С. 134–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_134.

Experimental studies on the efficiency of hydrovortex dust suppression

A. V. Ugolnikov¹, V. N. Makarov¹, N. V. Makarov¹, D. P. Dyldin¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Open-pit and underground mining performed using modern high-capacity technological equipment not only enhances the workings, but also induces the sudden increase in coal dust concentration in faces. At the same time, the proportion of fine coal dust, which

is the most dangerous in terms of sanitary-hygienic requirements and explosion safety, significantly increases. Studies have shown that the degree of cleavage of the dust and gas mixture increases with the growth of the load in the working face, which is dangerous in terms of the emergence of large local concentrations of coal dust. The primary way to reduce dust formation in underground mines and quarries is water aerosol dust suppression. This dust collection system is not able to quickly reduce the level of dustiness to the permitted values in conditions of local concentration of coal dust. Theoretical and experimental studies of methods and means of increasing the effectiveness of hydrovortex dust suppression are relevant. They require the development of new approaches, the implementation of assessment methods for accuracy, the ability to generalize the results of studies at certain mining enterprises in industry as a whole. For this purpose, an assembly with a patented hydrovortex nozzle design was created and used. The results of experimental studies conducted on the proposed assembly were repeatedly compared with the calculations based on the developed mathematical model, thus proving the high efficiency of hydrovortex dust suppression for particles with a median diameter of less than 2·10⁻⁶ m, providing capture efficiency of not less than 75 per cent at the same liquid pressure and flow rate reduced by 10 per cent. The mathematical model error did not exceed 8 per cent with a reliability of 0.95.

Key words: Hydrovortex dust suppression, hydrovortex inertial orthokinetic heterocoagulation, Stokes number, hydrophobic behavior, median diameter.

For citation: Ugolnikov A. V., Makarov V. N., Makarov N. V., Dyldin D. P. Experimental studies on the efficiency of hydrovortex dust suppression. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):134–148. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_134.

Введение

Интенсификация горных работ открытым и подземным способом с использованием современного добычного оборудования приводит к резкому росту концентрации угольной пыли в забоях [1–3]. Это способствует существенному возрастанию доли наиболее опасной угольной пыли, являющейся причиной многочисленных профессиональных заболеваний и аварий на горных предприятиях. Проведённые исследования показали, что с ростом нагрузки на очистной забой возрастает степень слоистости пылегазовой смеси, что опасно с позиции возникновения больших локальных концентраций угольной пыли [4–6]. Основным способом снижения пылеобразования в подземных выработках и на карьерах является водоаэрозольное пылеподавление. Данная система пылеулавливания в условиях локальной концентрации угольной пыли не в состоянии оперативно снижать уровень запы-

ленности до разрешенных значений. Теоретические и экспериментальные исследования способов и средств повышения эффективности пылеподавления с помощью гидровихревой коагуляции актуальны, требуют разработки новых подходов, создания методов оценки достоверности, возможности масштабирования на отраслевой уровень [7].

Наиболее распространенное высоконапорное гидрообеспыливание, достигшее практически своего технического предела по эффективности энергозатрат на снижение концентрации угольной пыли, в настоящее время заменяется гидровихревым пылеулавливанием [8–10]. Гидровихревой способ пылеулавливания отличается более высокой эффективностью поглощения мелкодисперсной угольной пыли, способствуя достижению санитарных условий и снижению вероятности образования взрывоопасных аэрозолей.

Для подтверждения проведенных научных исследований эффективно-

сти гидровихревого пылеподавления большое значение приобретают экспериментальные исследования. С этой целью была создана установка с запатентованной конструкцией гидровихревой форсунки [11].

Целью данной статьи является определение параметров экспериментальной установки, обеспечивающих требуемую достоверность результатов построения методики, проведения экспериментальных исследований, и сравнение их с расчетами по предложенной математической модели.

Постановка задачи. Для оценки достоверности математической модели эффективности пылеулавливания в условиях гидровихревой коагуляции, предложенной в статье [12], необходимо проведение экспериментальных исследований ее фракционной эффективности, для чего требуется создание специальной экспериментальной установки, разработки методики проведения испытаний, оценки достоверности результатов, погрешности измерений, порога чувствительности установки.

Расчеты по вышеуказанной математической модели показали, что эффективность гидровихревого пылеподавления достигается в диапазоне параметра давления воды $10 \leq P_{\text{ж}} \leq 15$ МПа, скорости потока капель жидкости $25 \leq V_{\text{ж}} \leq 50$ м/с и их дисперсности $(8 \div 30) \cdot 10^{-6}$ м [12].

Таким образом, по итогам экспериментальных исследований в статье принята фракционная эффективность ed_m . Кинематические и динамические параметры аэрозоля приняты в соответствии со статьями [13, 14].

Согласно [14–16], медианный диаметр d_m полидисперсной угольной пыли, подчиняющийся нормальному логарифмическому закону распределения, коррелирует с суммарной эффективностью пылеулавливания. Таким

образом, уменьшение медианного диаметра уловленной пыли соответствует росту эффективности снижения концентрации угольной пыли, и по совокупности фракционных эффективностей можно с достаточной достоверностью оценивать интегральную эффективность конкретного способа пылеулавливания.

В процессе гидровихревого инерционного пылеподавления влияние гравитационных электростатических и диффузионных сил не превышает 3% в силу значительной величины сил инерции [14, 17]. Таким образом, аэродинамические инерционные силы при гидровихревом пылеулавливании, фактически определяющие кинематические параметры процесса коагуляции и время релаксации, позволяют существенно упростить математическую модель, сохранив при этом достаточную достоверность соответствия физическому процессу взаимодействия частиц пыли и капель жидкости.

С учетом [12, 18], критерии Стокса Stk_n , Рейнольдса Re_n , Струхалея Str , индикаторы объемной концентрации можно рассматривать как основные определяющие критерии подобия натурального эксперимента, исследующего частный случай процесса гидрообеспыливания, с достаточной достоверностью подтверждающие соответствие математической модели гидровихревой коагуляции процессам, происходящим в специальной экспериментальной установке.

Из сказанного выше и статей [8, 19] можно сделать вывод о существовании корреляционной связи физических параметров аэрозолей, кинематических и динамических характеристик процесса коагуляции при гидровихревом пылеподавлении. Указанное позволяет с достаточной достоверностью упростить математическое модели-

рование коагуляции при гидровихревом пылеподавлении и при проведении экспериментальных исследований руководствоваться кинематическими, геометрическими и динамическими параметрами, абстрагируясь от химических процессов, происходящих при взаимодействии угольной пыли и жидкости.

Таким образом, с учетом [12] можно утверждать, что при всей сложности процессов, происходящих при гидровихревой коагуляции угольной пыли и жидкости, для обеспечения адекватности экспериментальных исследований реальным процессам достаточно обеспечить соответствие критериям подобия Stk_n , Рейнольдса Re_n .

Согласно [8, 20], первая теорема подобия определяет инвариантность динамических, кинематических и геометрических параметров исследуемого явления и эксперимента. Критериальное уравнение, связывающее критерии Стокса и Рейнольдса, капли жидкости и частицы пыли, согласно [12, 21], обеспечивает динамическое подобие процессов гидровихревой коагуляции, протекающих в предлагаемой экспериментальной установке, реальным процессам гидровихревого пылеулавливания. При этом необходимо обеспечивать инвариантность критерия Стокса для исключения влияния формы линий тока, жидкости и частиц угольной пыли. Учитывая, что инвариантность критерия Стокса достигается исключительно по оси контакта частицы пыли и капли жидкости, в силу существенной разности их диаметров, погрешность при несоблюдении данного условия не превышает 7%.

Эффективное значение критерия Стокса за полное время инерционного пробега капли жидкости в надстоксовской области неустановившегося

режима ее движения в соответствии с [12] определяется по формуле

$$Stk_{кр\omega\text{эф}} = \frac{Re_n^2 (\rho_n - \rho_r)}{18 Re_{ж\omega} \rho_r (1 + 0,07 Re_{ж}^{0,687})}, \quad (1)$$

где Re_n — критерий Рейнольдса для частицы пыли; ρ_n, ρ_r — плотность пыли, воздуха соответственно; $Re_{ж\omega}$ — эффективное значение критерия Рейнольдса для капли жидкости; $Re_{ж}$ — критерий Рейнольдса для капли жидкости.

Геометрические параметры установки, кинематические, динамические характеристики движения аэрозоля и жидкости, дисперсный и вещественный состав пыли определялись из диапазона фактически реализуемых на установках пылеподавления. Исследования проводились в диапазонах значения критерия Стокса $0,005 \leq Stk_{п\omega} \leq 0,1$.

Экспериментальные исследования. В целях определения достоверности результатов расчетов, согласно предложенной [12] математической модели коагуляции в процессе гидровихревого пылеподавления, спроектирована специальная экспериментальная установка моделирования гидровихревого инерционного пылеулавливания с возможностью определения количества и, как результат, оценки концентрации улавливаемой пыли в заданных фракционных диапазонах (рис. 1).

С учетом [14, 22] было установлено, что оседавшая на контрольных фильтрах экспериментальной установки угольная пыль отдельных фракций подчиняется логарифмически нормальному распределению.

Для достижения чистоты эксперимента и сравнимости результатов в процессе экспериментальных исследований была использована нормализованная пыль известного дисперсного и вещественного состава, что позво-

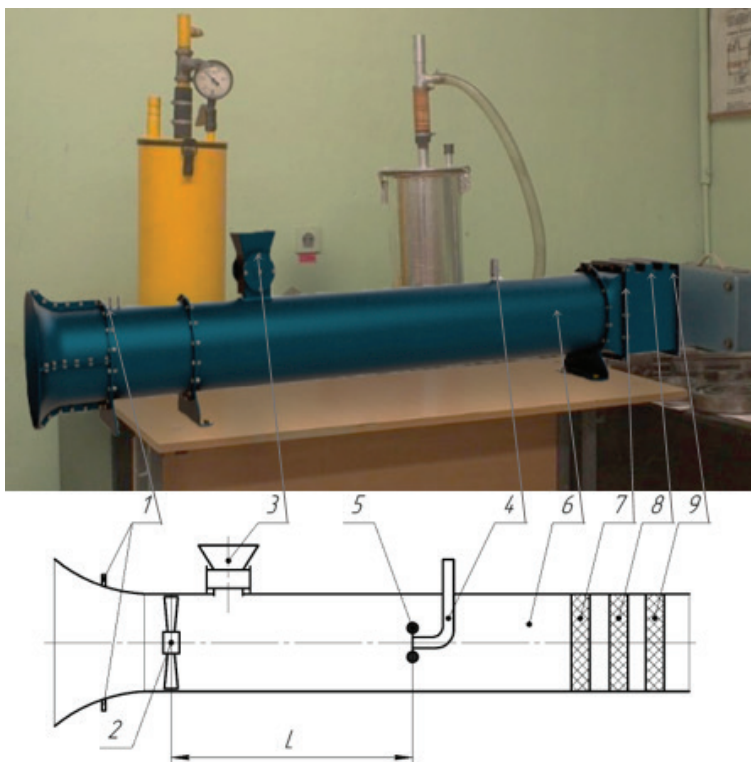


Рис. 1. Установка определения фракционной эффективности гидровихревого пылеулавливания: 1 – расходомер; 2 – вентилятор; 3 – дозатор нормированной пыли заданного дисперсного состава; 4 – аэратор; 5 – гидровихревые форсунки со сменными соплами; 6 – бункер; 7–9 – картриджи с фильтрами заданных минимальных диаметров улавливаемых частиц пыли и коэффициентов проскока

Fig. 1. The assembly for determining the effectiveness of hydrovortex heterocoagulation by the median diameter of dust particles: 1 – Flow rate meter; 2 – Fan; 3 – Dispenser of specified dust with a given dispersal composition; 4 – Aerator; 5 – Hydrovortex nozzles with replaceable tips; 6 – Bin; 7–9. Cartridges with filters of specified minimum diameters of dust particles captured and bypass coefficients

ляет существенно упростить обработку результатов и определение фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления в зависимости от геометрических и кинематических параметров.

Предлагаемая установка смешивает подаваемый воздух при работе вентилятора 2 и пыль конкретного дисперсного состава в дозаторе 3. Затем полученная аэрозольная смесь направляется в область гидровихревых форсунок, которые обеспечивают смачи-

вание пылевых частиц жидкостью, подаваемой через аэратор 4. После этого очищенный гидровихревыми форсунками 5 воздух направляется в бункер 6 на фильтры 7–9, которые задерживают пылевые частицы определенного размера и дисперсности. Здесь важно отметить, что скорость и расход воздуха в установке определяются при помощи расходомера 1, что гарантирует точность и эффективность процесса очистки. Коэффициент проскока также учитывается при выборе

фильтров, чтобы обеспечить максимальную эффективность и длительность их использования. Таким образом, процесс очистки воздуха является сложным и технически продуманным и позволяет обеспечить максимально возможный уровень чистоты в помещении или на производстве. По результатам проведенных испытаний были использованы фильтры, которые позволили осаждать частицы пыли диаметром $5 \cdot 10^{-6}$ м, $2,5 \cdot 10^{-6}$ м и $5 \cdot 10^{-7}$ м. Кинематические параметры вращающихся капель жидкости и эффективность гидровихревой гетерокоагуляции регулировались с помощью сменных сопел гидровихревых форсунок. Для измерения расхода воды и ее давления использовались датчики расхода и напора жидкости. Концентрация частиц пыли, диаметр которых соответствует указанным выше диапазонам, была определена по массе оседающей пыли на фильтрах в течение заданного промежутка времени и соответствующему расходу воздуха.

Уровень запрещающего аэродинамического барьера, т.е. кинематические параметры жидкости, при которых не происходит практически адгезионного слипания капель жидкости и частиц пыли вследствие недостаточной скорости капель жидкости, определяемые числом Рейнольдса, устанавливался фактически по максимальной концентрации частиц пыли на фильтре соответствующей концентрации данной фракции пыли, поступающей из бункера. В целях обеспечения требуемой погрешности с учетом порога чувствительности стенда, класса точности приборов экспериментальные исследования осуществлялись по разностной схеме с учетом фактора рандомизации.

Основные параметры, определяемые в процессе экспериментальных исследований:

1. Геометрические: d_c — диаметр сопла гидровихревой форсунки, м; h — ширина кольцевой камеры встречного движения потоков жидкости в форсунке, м; α — угол спирали кольцевой камеры форсунки, °; d_k — диаметр коллектора расходуемого воздуха, м; d_d — диаметр спирали дозатора пыли, м; d_r — диаметр камеры гидровихревой гетерокоагуляции, м.

2. Кинематические: V_n , V_r , $V_{ж}$ — скорость частицы пыли, воздуха, капли жидкости соответственно, c^{-1} ; $\omega_{ж}$ — угловая скорость вращения капли жидкости вокруг вектора поступательной скорости $V_{ж}$, c^{-1} ; ω_d — угловая скорость вращения спирали дозатора пыли, c^{-1} ; Δt — время отбора пробы, с.

3. Динамические: $P_{ж}$ — давление воды, Па; ρ_n , ρ_r , $\rho_{ж}$ — плотность пыли, воздуха, жидкости, $кг/м^3$; $m_{з}$ — масса фильтров до и после эксперимента, кг.

Замеряемые с помощью приборов параметры: Δt — время отбора проб, с; q — расход воздуха, $м^3 \cdot c^{-1}$ (V_0 — скорость воздуха в коллекторе расхода, $м \cdot c^{-1}$); q_n — расход пылевой аэрозоли, $кг \cdot c^{-1}$; $P_{ж}$ — давление воды, Па; $q_{ж}$ — расход воды в гидровихревой форсунке, Па; m , m_0 — масса фильтров до и после отбора проб соответственно, кг.

Скорость поступательного и вращательного движения и диаметр капли жидкости рассчитываем по величине давления воды в гидровихревой форсунке и ее геометрическим параметрам [11, 12]. Фильтры АФА ВП для определения массы оседаемых частиц пыли заданного диапазона диаметров выбираем по диаметру волокон и коэффициенту проскока в заданном диапазоне скорости движения пылевых аэрозолей.

При погрешности коэффициента проскока $\pm 10\%$ на трех фильтрах улавливаются частицы пыли, находящиеся в диапазонах:

- 1) $(7,0 \geq d_n \geq 3,0) \cdot 10^{-6}$ м; (5 ± 2) ;
- 2) $(3,0 \geq d_n \geq 1,25) \cdot 10^{-6}$ м; (5 ± 1) ;
- 3) $1,0 \cdot 10^{-6}$ м $\geq d_n$. $(1 \pm 0,1)$.

Для увеличения точности при осреднении четырехкратных измерений было учтено сглаживание графиков при оценке погрешностей.

Для определения средних квадратических погрешностей измерений использовались классы точности приборов и цена деления их шкал, также учитывались соотношения между средней квадратической и наибольшей погрешностями в соответствии с нормальным и равномерным законами распределения.

Абсолютные погрешности измерений имеют связь средних квадратических погрешностей измерительных приборов и наблюдений с надежностью 0,97, соотношениями $\sigma = \Delta / 3$; $\sigma = \Delta / \sqrt{3}$ соответственно.

Учитывая, что испытания проводились по «разностной схеме» с использованием одного и того же оборудования, выражения для относительных средних квадратических погрешностей замеров, расхода воздуха q_0 ($q_0 \cdot \Delta t$), расхода пылевого аэрозоля q_n ($q_n \cdot \Delta t$), K_n — средней концентрации нормализованной пыли, $г \cdot м^{-3}$; n — основной концентрации пылевой аэрозоли после i -го фильтра, $г \cdot м^{-3}$; Δm_i — массы, осевшей на i -м фильтре пыли за время Δt отбора пробы, кг; суммарной эффективности гидровихревого пылеподавления улавливания частиц пыли e_m , заданного медианного диаметра d_m и его дисперсности σ_m можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{0q_0} = \sqrt{\frac{\sigma_{HK}^2}{16} + \frac{\sigma_{Hf}^2}{4}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{0q_n} = \sqrt{\frac{\sigma_{Hоq}^2}{16} + \frac{\sigma_{Hf}^2}{4}}; \quad (3)$$

$$\sigma_{0K_n} = \sqrt{\frac{\sigma_{HK}^2}{16} + \frac{\sigma_{Hоq}^2}{4} + \frac{\sigma_{0Hf}^2}{4}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{0m_i} = \sqrt{\frac{\sigma_{Hm_i}^2}{4} + \frac{\sigma_{Hf}^2}{4}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{0K_n} = \sqrt{\frac{\sigma_{Hm_i}^2}{4} + \frac{\sigma_{Hоq}^2}{4} + \frac{\sigma_{Hf}^2}{4}}; \quad (6)$$

$$\sigma_{0e} = \sqrt{\frac{\sigma_{HK}^2}{16} + \frac{\sigma_{Hоq}^2}{4} + \frac{\sigma_{Hm_i}^2}{4} + \frac{\sigma_{Hf}^2}{4}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{0ed_{m_i}} = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma_{HK}^2}{4} + \sigma_{Hоq}^2 + \sigma_{Hm_i}^2 + \sigma_{dm}^2 + \sigma_{Hf}^2}, \quad (8)$$

где σ_{HK} , $\sigma_{Hоq}$, σ_{Hf} , $\sigma_{Hm_i}^2$ — относительные средние квадратические погрешности замера наблюдения показаний датчика давления в коллекторе расходомера, датчика угловой скорости вращения спиралевидного механизма подачи нормированной пылевой аэрозоли, секундомера, электронных весов; σ_{dm} — относительная средняя квадратическая погрешность диаметра частицы пыли и его дисперсности с минимальным диаметром оседания на фильтре частиц пыли.

Приведенные формулы (2)–(8) не учитывают того факта, что эффективность гидровихревого пылеподавления представлена в виде зависимости от d_m , следовательно, на точность ее расчета оказывает влияние номинальный диаметр частиц пыли d_{m_i} , оседающих на i -м фильтре, и его дисперсность σ_i . Учитывая сказанное, формулы для определения относительных средних квадратических погрешностей должны быть представлены в виде фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления:

$$\sigma_{ced_m} = \sqrt{\sigma_{0e}^2 + \left(\frac{\partial ed_m}{\partial d_m}\right)^2 \sigma_{dm}^2}. \quad (9)$$

Относительные средние квадратичные погрешности определения эффективности гидровихревого пылеподавления в диапазоне исследуемых параметров $\sigma_{0e} = 0,39 \%$, $\sigma_{ced_m} = 0,92 \%$.

Поскольку порог чувствительности установки определяется наименьшим значением разности экспериментально определяемого параметра при надежности 60%, его величина равна $\Delta e = 0,2$; $\Delta ed_m = 0,34$, что в 2 раза меньше относительной погрешности, определяемой общей и фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления с надежностью 95%.

Анализ результатов исследований

Анализ дисперсного состава пыли проводился на электронном микроскопе TESCAN VEGA LMS. Использование электронного микроскопа позволило исключить вторичное диспергирование пыли, что имеет принципиальное значение, поскольку при определении степени ее улавливания пылеочистными устройствами и гранулометрического состава реальной пыли в газовом потоке для получения достоверных результатов необходимо применять методы, исключающие именно вторичное диспергирование.

На рис. 2–4 представлены фрагменты поверхности исследуемых образцов пыли, полученные после отбора проб с фильтров. Следует заметить, что при пробоподготовке был исключен ситовой рассев, поскольку фильтрами задан диаметр проскакивающих частиц.

Анализ проб показывает, что на первом фильтре, как при классической коагуляции, так и при гидровихревой, количество осевших крупных частиц примерно одинаково в связи с тем, что оба способа пылеподавления эффективны для поглощения большого диаметра частиц пыли. На втором фильтре

количество частиц при гидровихревой гетерокоагуляции заметно снизилось. На третьем фильтре при гидровихревой гетерокоагуляции масса осевшей пыли в разы меньше, чем при классической коагуляции.

Приведенные результаты рентгено-спектрального микроанализа количественно подтверждают существенный рост эффективности гидровихревого пылеулавливания в области мелкодисперсной пыли.

Результаты седиментационного анализа частиц угольной пыли по фракциям на электронном микроскопе: $(5 \cdot 10^{-6})$; $(-5+2,5) \cdot 10^{-6}$; $(2,5 \div 0,5) \cdot 10^{-6}$.

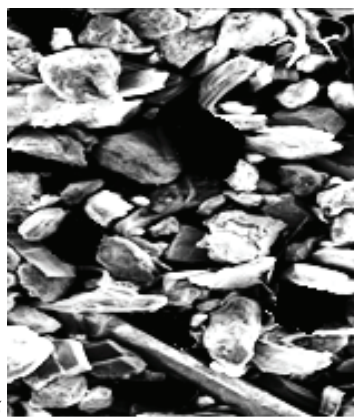
На рис. 5. приведена зависимость фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления от медианного диаметра частиц пыли при угловой скорости вращения капле жидкости.

Из анализа приведенных результатов видно, что фракционная эффективность гидровихревого пылеподавления существенно растет с увеличением дисперсности в направлении уменьшения медианного диаметра частиц пыли. При угловой скорости вращения капле жидкости $\omega_{ж} = 10^4$, c^{-1} , что составляет $(0,5 \div 2)$ м·с⁻¹ линейной скорости, на поверхности капли эффективное улавливание частиц пыли медианным диаметром $d_m = 10^{-6}$ м превышает 68%, что на 27% больше, чем при классической коагуляции, также замеренной на вышеуказанной установке.

На рис. 6. Приведен график зависимости фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления от угловой скорости капли жидкости при медианных диаметрах частиц пыли, который показывает рост эффективности гидровихревого пылеподавления частиц пыли диаметром $d_m < 5 \cdot 10^{-5}$ м, при этом улавливается до 70% пылевых аэрозолей диаметром $d_m 10^{-6}$ м.



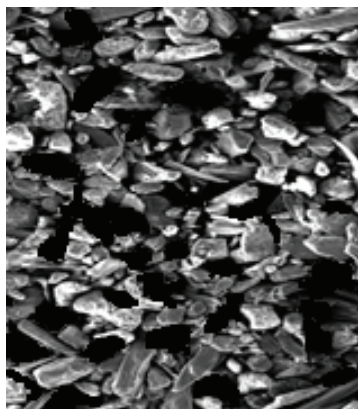
а



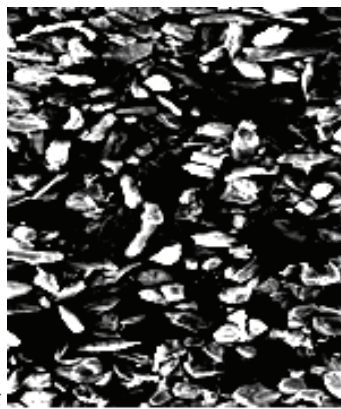
б

Рис. 2. Результаты рентгеноспектрального микроанализа пыли с первого фильтра: а – при классической коагуляции; б – при гидровихревой коагуляции

Fig. 2. Results of X-ray spectral microanalysis of dust from the first filter: a – at classical coagulation; b – at hydrovortex coagulation



а



б

Рис. 3. Результаты рентгеноспектрального микроанализа угольной пыли со второго фильтра: а – при классической коагуляции; б – при гидровихревой коагуляции

Fig. 3. Results of X-ray spectral microanalysis of dust from the second filter: a – at classical coagulation; b – at hydrovortex coagulation

Экспериментальные исследования с достаточной точностью подтвердили результаты расчетов по предложенной в [12] математической модели, показали высокую эффективность инерционной гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции.

При этом необходимо учитывать, что сравнение полученных результатов с данными из других источников исследования проводят с учетом

систематических инструментальных погрешностей.

Выводы

1. Предложенная конструкция и измерительные приборы испытательного стенда позволяют с достаточной точностью определять не только общую, но и фракционную эффективность пылеподавления с порогом чувствительности

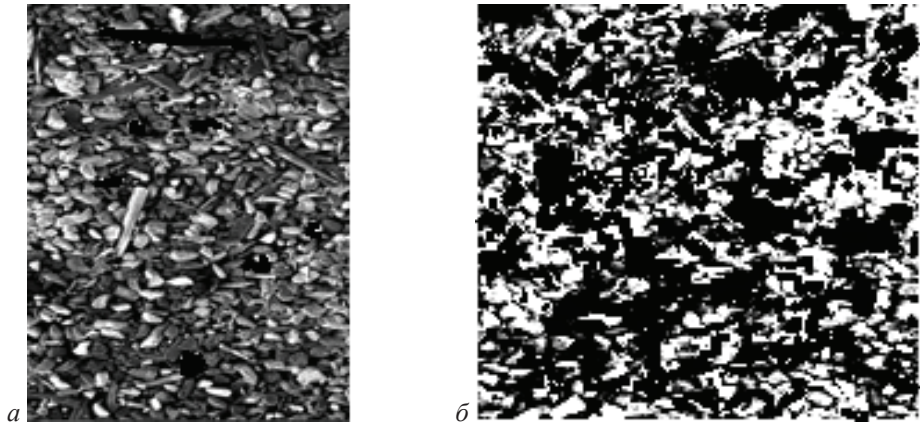


Рис. 4. Результаты рентгеноспектрального микроанализа угольной пыли с третьего фильтра: а – при классической коагуляции; б – при гидровихревой коагуляции
 Fig. 4. Results of X-ray spectral microanalysis of dust from the third filter: a – at classical coagulation; b – at hydrovortex coagulation

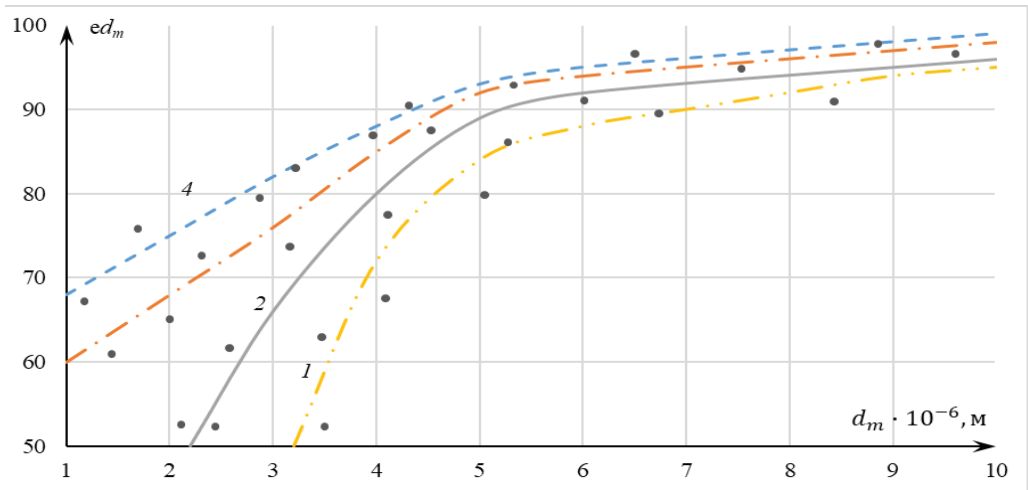


Рис. 5. График зависимости фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления от медианного диаметра при угловой скорости вращения капли жидкости: 1 – $\omega_{жк} = 10^1, c^{-1}$; 2 – $\omega_{жк} = 10^2, c^{-1}$; 3 – $\omega_{жк} = 10^3, c^{-1}$; 4 – $\omega_{жк} = 10^4, c^{-1}$
 Fig. 5. A graph showing the dependence of the fractional efficiency of hydrovortex dust suppression on the median diameter at the angular rotation velocity of a liquid droplet: 1 – $\omega_l = 10^1, s^{-1}$; 2 – $\omega_l = 10^2, s^{-1}$; 3 – $\omega_l = 10^3, s^{-1}$; 4 – $\omega_l = 10^4, s^{-1}$

по эффективности 0,2, по медианному диаметру 0,34.

2. По результатам проведенных экспериментальных исследований была подтверждена достоверность математической модели эффективности гидровихревого пылеподавления

с отклонением не более 8% при надежности 0,95.

3. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую фракционную эффективность гидровихревого пылеподавления частиц пыли с медианным диаметром

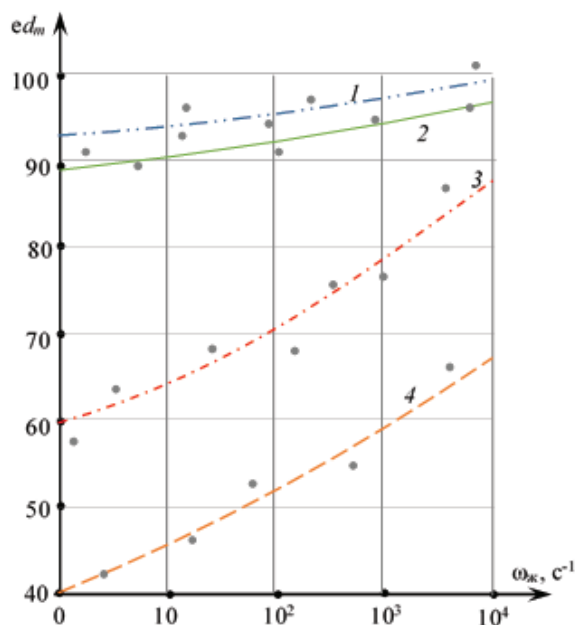


Рис. 6. График зависимости фракционной эффективности гидровихревого пылеподавления от угловой скорости капли жидкости при медианных диаметрах частиц пыли $\omega_{ж}$: 1 – $d_m = 5 \cdot 10^{-6}$, м; 2 – $d_m = 3 \cdot 10^{-6}$, м; 3 – $d_m = 2 \cdot 10^{-6}$, м; 4 – $d_m = 1,0 \cdot 10^{-6}$, м

Fig. 6. A graph showing the dependence of the fractional efficiency of hydrovortex dust suppression on the angular velocity of a liquid droplet at the median particle diameters ω_l : 1 – $d_m = 5 \cdot 10^{-6}$, m; 2 – $d_m = 3 \cdot 10^{-6}$, m; 3 – $d_m = 2 \cdot 10^{-6}$, m; 4 – $d_m = 1,0 \cdot 10^{-6}$, m

$d_m = 2 \cdot 10^{-6}$ м, обеспечивая улавливание не менее 68%.

4. Гидровихревое пылеподавление рационально использовать для обеспечения санитарно-гигиенических условий и устранения техногенных аварий

в угольных шахтах, поскольку, как показывает опыт, наиболее опасной в этих случаях является угольная пыль медианным диаметром менее $2 \cdot 10^{-6}$ м, которая наиболее эффективно улавливается посредством гидровихревой коагуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанов Е. И., Коршунов Г. И., Корнев А. В., Мяков В. В. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005–2019 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 2–1. – С. 18–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.

2. Апарина Н. Ф. К вопросу о традиционных профессиональных рисках угледобычи на угольных предприятиях Кемеровской области – Кузбасса // Уголь. – 2023. – № 2. – С. 45–51. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-45-51.

3. Новиков А. В., Паневников К. В., Писарев И. В. О слагаемых повышения уровня промышленной безопасности в угольной шахте // Горная промышленность. – 2022. – № 2. – С. 46–48. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-46-48.

4. Сидоренко А. А., Черданцев А. М., Сидоренко С. А. Обоснование параметров управления метановыделением в выработки выемочных участков при интенсивной разработке свит газоносных угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S6. — С. 224–234. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-224-234.

5. Hu C., Wu D. A novel gas drainage technology for lower protected coal seams: Application and verification in Xinzhuangzi coal mine, Huainan coalfield. IPPTA // Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association. 2018, no. 30(7), pp. 801–808.

6. Zhang L., Zhang H., Guo H. A case study of gas drainage to low permeability coal seam // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, no. 27(4), pp. 687–692. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.014.

7. 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.

8. Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Боярских Г. А. Математическое моделирование гидровихревой классификации тонкодисперсных отходов горно-металлургического производства. // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 56–60. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.12.

9. Zhang H., Xu Y., Han W., Wang Z. Analysis on the Development Status of Coal Mine Dust Disaster Prevention Technology in China // Journal of Healthcare Engineering. 2021, vol. 2021, 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.

10. Li S., Xie B., Hu S., Jin H. Removal of dust produced in the roadway of coal mine using a mining dust filtration system // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, no. 5, pp. 911–919. DOI: 10.1016/j.appt.2019.02.005.

11. Патент № 2737161 С1, 31.03.2020. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Дылдин Г. П., Чураков Е. О. Способ гидровихревого кинематического пылеподавления и устройство для его реализации. 2020. Бюл. № 33.

12. Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Бельских А. М. Критериальные уравнения эффективности гидровихревого пылеулавливания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2022. — № 1. — С. 200–209. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-200-209.

13. Tripathy D. P., Ala C. K. Risk Assessment in Underground Coalmines Using Fuzzy Logic in the Presence of Uncertainty // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2018, vol. 99, pp. 157–163. DOI: 10.1007/s40033-018-0154-7.

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

15. Niu Y., Zhang L., Shi B. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion // Powder Technology. 2020, vol. 361, pp. 507–511.

16. 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.

17. 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 // Int J Coal Sci Technol. 2020, no. 7(3), pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.

18. 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.

19. Филина В. А., Филин А. Э. Пути повышения эффективности пылеподавления орошением. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S14. – С. 3–10. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-3-10.

20. Hu S., Huang Y., Feng G., Shao H., Liao Q., Gao Y., Hua F. Investigation on the design of atomization device for coal dust suppression in underground roadways // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 129, pp. 230–237. DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.010.

21. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Revazov V. Ch., Piliieva D. E. Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023, no. 1, pp. 84–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84.

22. Скопинцева О. В., Ганова С. Д., Бузин А. А., Федотова В. П. Мероприятия по борьбе с пылью при погрузке и транспортировании твердых полезных ископаемых // Горный журнал. – 2019. – № 12. – С. 76–79. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

MIAB

REFERENCES

1. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Kornev A. V., Myakov V. V. Analysis of the causes of methane explosions, flashes and ignitions at coal mines of Russia in 2005–2019. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 18–29. [In Russ.]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-0-18-29.

2. Aparina N. F. Regarding the traditional occupational risks of coal mining at coal operations in the Kemerovo region – Kuzbass. *Ugol' – Russian Coal Journal.* 2023, no. 2, pp. 45–51. [In Russ.]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-45-51.

3. Novikov A. V., Panevnikov K. V., Pisarev I. V. Regarding the factors of improving industrial safety in a coal mine. *Mining Industry.* 2022, no. 2, pp. 46–48. [In Russ.]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-46-48.

4. Sidorenko A. A., Cherdancev A. M., Sidorenko S. A. Justification of parameters of methane emission control in panel entries at intensive mining of gas-bearing coal seams. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2019, no. S6, pp. 224–234. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-224-234.

5. Hu C., Wu D. A novel gas drainage technology for lower protected coal seams: Application and verification in xinzhuangzi coal mine, huainan coalfield. *IPPTA. Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association.* 2018, no. 30(7), pp. 801–808.

6. Zhang L., Zhang H., Guo H. A case study of gas drainage to low permeability coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2017, no. 27(4), pp. 687–692. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.014.

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

8. Ugolnikov A. V., Makarov V. N., Makarov N. V., Boyarskikh G. A. Mathematical modeling of hydro-vortex classification of fine mining and metallurgical waste. *Minerals and Mining Engineering.* 2019, no. 12, pp. 56–60. [In Russ.]. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.12.

9. Zhang H., Xu Y., Han W., Wang Z. Analysis on the Development Status of Coal Mine Dust Disaster Prevention Technology in China. *Journal of Healthcare Engineering.* 2021, vol. 2021, 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.

10. Li S., Xie B., Hu S., Jin H. Removal of dust produced in the roadway of coal mine using a mining dust filtration system. *Advanced Powder Technology.* 2019, vol. 30, no. 5, pp. 911–919. DOI: 10.1016/j.apt.2019.02.005.

11. Makarov V. N., Makarov N. V., Ugolnikov A. V., Dyldin G. P., Churakov E. O. Patent RU 2737161 S1, 25.11.2020. [In Russ].
12. Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Makarov N. V., Bel'skikh A. M. Criterial equations for the efficiency of hydro-vortex dust collection. *Izvestiya TulGU*. 2020, no. 1, pp. 200–209. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-200-209.
13. Tripathy D. P., Ala C. K. Risk Assessment in Underground Coalmines Using Fuzzy Logic in the Presence of Uncertainty. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*. 2018, vol. 99, pp. 157–163. DOI: 10.1007/s40033-018-0154-7.
14. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkarev Yu. A. Principles of hydrodedusting. *Life Safety*. 2007, no. 10, pp. 1–24. [In Russ.].
15. Niu Y., Zhang L., Shi B. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion. *Powder Technology*. 2020, vol. 361, pp. 507–511.
16. 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.
17. 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. *Int J Coal Sci Technol*. 2020, no. 7(3), pp. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.
18. 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.
19. Filina V. A., Filin A. E. Ways to increase dust supply efficiency by irrigation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S14, pp. 3–10. [In Russ.]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-3-10.
20. Hu S., Huang Y., Feng G., Shao H, Liao Q., Gao Y., Hua F. Investigation on the design of atomization device for coal dust suppression in underground roadways. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 129, pp. 230–237. DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.010.
21. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Revazov V. Ch., Pilieva D. E. Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023, no. 1, pp. 84–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_84.
22. Skopintseva O. V., Ganova S. D., Buzin A. A., Fedotova V. P. Measures to reduce dusting during loading and transportation of solid mineral resources. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 12, pp. 76–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Угольников Александр Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой электротехники, e-mail: ugolnikov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8442-4841;
Макаров Владимир Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор кафедрой горной механики, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569;
Макаров Николай Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедры горной механики, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272;
Дылдин Герман Петрович¹ — канд. техн. наук, доцент кафедры горной механики, e-mail: German.Dyldin@m.ursmu.ru;

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Makarov V. N.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor at the department of Mining Mechanics, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569;

*Ugolnikov A. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, e-mail: ugolnikov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8442-4841;

*Makarov N. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mining Mechanics, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272;

*Dyldin G. P.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Mechanics, e-mail: German.Dyldin@m.ursmu.ru.

¹ Ural State Mining University, 620144, Yekaterinburg, Russian Federation.

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

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 01.11.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 01.11.2023; accepted for printing 10.11.2023.

