

МОДИФИКАЦИЯ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ГИДРОВИХРЕВОГО ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

В.Н. Макаров¹, А.В. Угольников¹, А.Ю. Матеров², Н.В. Макаров¹, В.М. Таугер¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: mnikolay84@mail.ru

² ООО Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш», Подольск, Россия

Аннотация: Рассмотрены модификация математической модели и построение критериального уравнения гидровихревого инерционного ортокинетического пылеподавления на угольных шахтах, поскольку современное состояние техники и технологии пылеподавления показывает ее недостаточную эффективность. На базе теории подобия с использованием правила Фурье, П-теоремы и положения В.А. Веникова о подобии сложных систем сформулирована и решена задача построения уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции в критериальной форме. На базе полученного критериального уравнения определены основные индикаторы и критерии подобия, позволяющие с достаточной достоверностью определять условия идентичности экспериментальных исследований и реальных процессов пылеподавления. Доказано существенное снижение критических значений критерия Стокса, определяющего режим полного поглощения частиц пыли каплями вращающейся жидкости за счет увеличения угла смачивания. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции в целях обеспечения идентичности модельных испытаний с реальными физическими процессами пылеподавления. Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают высокую эффективность гидровихревого пылеподавления позволившего на 25% снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощаемой пыли до $5 \cdot 10^{-7}$ м повысить эффективность пылеподавления до 99%.

Ключевые слова: пылеподавление, угольные шахты, угол смачивания, критериальное уравнение, гидровихревая форсунка.

Для цитирования: 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.

Modified criterion equation of hydro vortex dust suppression in coal mines

V.N. Makarov¹, A.V. Ugolnikov¹, A.Yu. Materov², N.V. Makarov¹, V.M. Tauger¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: mnikolay84@mail.ru

² Scientific-production complex «OylGazMash», Podolsk, Russia

Abstract: The article describes modification of mathematical model and building of criterion equation for hydro vortex inertia orthokinetic dust suppression in coal mines as the currently available technology and equipment of dust control are insufficiently effective. Based on the similarity theory and using the Fourier transform, Pi theorem and Venikov's statements on similarity of complex

systems, the problem on building of an equation for hydro vortex inertia orthokinetic coagulation in the criterion form has been formulated and solved. The obtained criterion equation is used to determine basic indicators and similarity criteria which define identity between experimental research and actual dust suppression processes at sufficient accuracy. The threshold values of the Stokes criterion for total absorption of dust particles by rotating fluid drops at the expense of the increase in the angle of contact are proved to be much lower. The experimental research confirms fidelity of the criterion equation of hydro vortex inertia orthokinetic coagulation in providing identity between model testing and actual physical processes of dust suppression. The theoretical studies and experimental tests prove high efficiency of hydro vortex dust suppression enabling decrease in water consumption by 25%, reduction in minimum size of absorbed dust particle to $5 \cdot 10^{-7}$ and improvement of dust control efficiency to 99%.

Key words: criterion equation, coal mine, wetting angle, of criterion equation, hydrovortex nozzle.

For citation: 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;(7):53-61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-53-61.

На передовых угольных шахтах России очистные забои оборудованы современной выемочной техникой, обеспечивающей нагрузку до 25 тыс. т в сутки. Однако высокая запыленность выработок и обильное метановыделение из обрабатываемых высокогазоносных пластов угля и высокая запыленность выработок сдерживают интенсификацию угледобычи, что существенно снижает экономическую эффективность и конкурентоспособность предприятий подземной угледобычи [1–3].

Исследования показывают, что более 60% случаев образования взрывоопасной среды могут быть исключены при эффективном пылеподавлении.

Наиболее распространенным способом осаждения пыли из воздуха является пылеподавление, основанное на смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием при этом гетерокоагуляционной системы «капля-пылинка» которая выпадает из воздуха и осаждается на стенки выработки [3, 4].

Однако при высоконапорном гидрообеспыливанием существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий и как результат приводит к падению конку-

рентоспособности экотехнологии в недропользовании [4, 5].

В статье [6] предложена математическая модель гидровихревой инерционной орто-кинетической коагуляции, позволяющая исследовать механизм взаимодействия частиц пыли с вращающимися каплями жидкости [7].

Однако в настоящее время отсутствует математический аппарат решения уравнений гидровихревой коагуляции в общем виде с учетом граничных условий.

В связи с выше изложенным, большое значение приобретают методы экспериментального исследования на основе использования теории подобия и физического моделирования. Для проведения экспериментальных исследований и обоснованного использования полученных результатов необходимо установление критериев подобия соответствующих конкретным физическим процессам гидровихревой коагуляции.

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что одним из основных критериев подобия физического процесса инерционной ортокинетической коагуляции является критерий Стокса Stk — «инерционный параметр», который в условиях гидровихревой коагуляции с учетом [8–11] можно представить в виде:

$$Stk_{n\omega} = \frac{l_n}{d_{\text{ж}}} = \frac{\tau_n (V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})_{\text{эф}}}{d_{\text{ж}}} = \frac{\tau_n \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2 + 0,25\omega_{\text{ж}}^2 d_n^2 \cdot \sin^2 \theta_{\omega}}}{d_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где l_n — длина инерционного пробега частицы пыли в газовой среде, м; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{г}} = V_n$ — скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы пыли, м/с; θ_{ω} — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость-газ», рад; τ_n — время релаксации частицы пыли на длине ее инерционного пробега; d_n , $d_{\text{ж}}$ — диаметр частицы пыли и капли жидкости, м; $\omega_{\text{ж}}$ — угловая скорость вращения капли жидкости, с⁻¹.

Таким образом «инерционный параметр» Стокса $Stk_{n\omega}$ зависит от угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}}$, возрастая с ее увеличением.

Многочисленными исследованиями установлено, что существует критическое значение критерия Стокса $Stk_{n\text{кр}}$, при котором эффективность столкновения $K_S = 0$ [9, 12, 13].

При коэффициент эффективности столкновения определяется по формуле:

$$K_S = \frac{Stk_n^2}{Stk_n + a}, \quad (2)$$

где $a = f(Stk_n, Re_{\text{ж}})$; $Re_{\text{ж}}$ — критерий Рейнольдса капли жидкости.

После соответствующих преобразований, с учетом уравнений [6, 9, 14] выражения для критического значения «инерционного параметра» Стокса получим в виде:

$$Stk_{n\text{кр}} = \frac{\tau_n \sqrt{\frac{24\delta_{\text{ж-г}} \cdot \cos \theta_{\omega}}{(\rho_n - \rho_{\text{г}}) d_n}}}{d_{\text{ж}}}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{ж-г}}$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость-газ», Дж/м²; ρ_n , $\rho_{\text{г}}$ — плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м³.

Таким образом, с учетом выше изложенного, задача определения эффективности коагуляции в условиях гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения заключается в установлении зависимости критического значения инерционного критерия Стокса от угловой скорости вращения капли $\omega_{\text{ж}}$ жидкости и диаметра пылинки $d_{n\omega}$.

Из анализа уравнения (12) вытекает, что с увеличением угловой скорости вращения частицы пыли увеличивается угол смачивания θ_{ω} , что приводит к увеличению критического значения критерия Стокса, позволяя тем самым обеспечить эффективное поглощение частиц пыли меньшего диаметра.

Согласно правилу Фурье слагаемые уравнений, описывающих физические явления, имеют одинаковую размерность. Следовательно, можно утверждать, что вышеуказанные дифференциальные уравнения движения частиц в вязкой несжимаемой среде являются гомогенными. Применение Л-теоремы в условиях отсутствия полной информации о механизме гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции базируется на следствии второго дополнительного положения В.А. Веникова о подобии сложных систем согласно которым, «системы остаются подобными после упрощений при условии, что эти упрощения были проведены в них соответственно одинаково» [15].

Учитывая выше сказанное, в качестве основных независимых параметров, определяющих механизм гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции примем:

- геометрические параметры $d_n, d_{ж}, d_{см}$;
- кинематические параметры $\omega_{ж}, \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25\omega_{ж}^2 d_n^2 \cdot \sin^2 \theta \omega} = (V_{ж} - V_r)_{\phi}$;
- динамические параметры $(\rho_n - \rho_r), \rho_r, \mu_r$.

Для построения критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетики коагуляции запишем взаимозависимость вышеуказанных независимых переменных в форме безразмерной степенной зависимости:

$$Stk_n = k d_{ж}^{\alpha} d_n^{\beta} \mu_r^{\delta} \rho_r^{\gamma} (\rho_n - \rho_r)^z \times \left(\sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25\omega_{ж}^2 d_n^2 \cdot \sin^2 \theta \omega} \right)^x (\omega_{ж})^{\varphi} d_{см}^{\psi} \quad (4)$$

Для нахождения критериев подобия составим полную матрицу размерностей независимых параметров.

$$\|M\| = \begin{array}{c|cccccccc} & d_{ж} & d_n & \mu_r & \rho_r & \rho_n - \rho_r & \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25d_{см}^2 \omega_{ж}^2} & \omega_{ж} & d_{см} \\ \hline M & 1 & 1 & -1 & -3 & -3 & 1 & 0 & 1 \\ \hline L & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline T & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{array} \quad (5)$$

Ранг матрицы $\|M\| = 3$, т.е. количество независимых переменных равно трем.

Количество чисел подобия, т.е. безразмерных комплексов, включающих в себя и критерии подобия в соответствии с Π -теоремой составит:

$$K_{\pi} = n - m = 8 - 3 = 5, \quad (6)$$

где n — число размерных физических величин ($n = 8$); m — число независимых размерностей ($m = 3$).

Показатели степени $\alpha, \beta, \delta, \gamma, z, x, \varphi, \psi$ в критериальном уравнении по элементам матрицы (11) составляют однородную систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma - 3z + x + \psi = 0; \\ \gamma + \gamma + z = 0; \\ \gamma + x + \varphi = 0. \end{cases} \quad (7)$$

В соответствии с решением системы уравнений (13) получаем матрицу чисел подобия:

$$\|M_{\pi}\| = \begin{array}{c|cccccccc} & d_{ж} & d_n & \mu_r & \rho_r & \rho_n - \rho_r & \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25d_{см}^2 \omega_{ж}^2} & \omega_{ж} & d_{см} \\ \hline \pi_1 & 0 & 2 & -2 & 2 & 0 & 2 & 2 & -1 \\ \hline \pi_2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ \hline \pi_3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \pi_4 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ \hline \pi_5 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline & \alpha & \beta & \gamma & \gamma & z & x & \varphi & \psi \end{array} \quad (8)$$

Раскрывая соответствующие определители вышеуказанной матрицы построим пять безразмерных комплексов, представляющих собой индикаторы подобия:

$$\pi_1 = \frac{\rho_r^2 d_n^2 \left((V_{ж} - V_r)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{см}^2 \right)}{\mu_r^2} = Re_n^2, \quad (9)$$

где Re_n — критерий Рейнольдса для частицы пыли;

$$\pi_2 = \frac{\mu_r}{d_{ж} \rho_r \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{см}^2}} = Re_{ж}^{-1}, \quad (10)$$

где $Re_{ж}$ — критерий Рейнольдса для капли жидкости;

$$\pi_3 = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_r} = \pi_p = Ard_{ст}, \quad (11)$$

где $Ard_{ст}$ — статический критерий Архимеда;

$$\pi_4 = \frac{2\sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_n^2} \sin^2 \theta_{\omega}}{\omega_{ж} d_n \sin \theta_{\omega}} = \pi_k, \quad (12)$$

где π_k — кинематический критерий подобия;

$$\pi_5 = \frac{1}{\sin \theta_{\omega}} = \pi_r, \quad (13)$$

где π_r — геометрический критерий подобия.

С учетом вышеизложенного, уравнение (4) запишем в критериальной форме:

$$\begin{aligned} Stk_{п\omega} &= \frac{l_n}{d_{ж}} = \frac{Re_n^2}{Re_{ж}} Ard_{ст} \cdot \pi_k \cdot \pi_r = \frac{Re_n d_n}{18 d_{ж}} Ard_{ст} \cdot \pi_k \cdot \pi_r = \\ &= \frac{\tau_n \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_n^2} \sin^2 \theta_{\omega}}{d_{ж}} = idem \end{aligned} \quad (14)$$

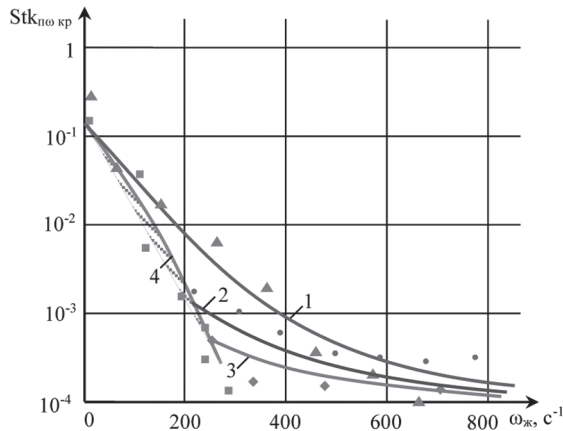


Рис. 1. Зависимость критических значений критерия Стокса от угловой скорости вращения капль жидкости $\omega_{ж}$ для различных диаметров частиц пыли: 1 — $d_p = 5 \cdot 10^{-6}$ м; 2 — $d_p = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 3 — $d_p = 5 \cdot 10^{-7}$ м; 4 — граница автомодельности гидровихревой коагуляции

Fig. 1. Relationship between the threshold values of the Stokes criterion and the rotational speed of fluid drops, ω_r , for dust particles of different diameters: 1— $d_p = 5 \cdot 10^{-6}$ m; 2— $d_p = 2 \cdot 10^{-6}$ m; 3— $d_p = 5 \cdot 10^{-7}$ m; 4—boundary of hydro vortex coagulation self-similarity

С целью установления достоверности полученных формул и критериального уравнения были проведены экспериментальные исследования для установления критического значения критерия Стокса $Stk_{\text{пто кр}}$ зависимости от угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}}$, а также изменения энергетического аэродинамического барьера с изменением диаметра частицы пыли $d_{\text{пто}}$.

На рис. 1, 2 приведены результаты расчета по предложенным критериальным уравнениям вихревой инерционной ортокинетической коагуляции изменения критических значений «инерционного параметра» Стокса $Stk_{\text{пто кр}}$ в зависимости от угловой скорости вращения капель воды $\omega_{\text{ж}}$ диаметром $d_{\text{ж}} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м и диаметра частиц угольной пыли $d_{\text{пто}}$ при значении критерия Рейнольдса капли жидкости $Re_{\text{ж}} = 20$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 1, подтверждает аналитический вывод о существовании автомодельного режима гидровихревой коагуляции для диаметров угольной пыли $d_{\text{п}} < 5 \cdot 10^{-6}$ м. По мере увеличения угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}} > 0$ кри-

тические значения «инерционного параметра» $Stk_{\text{пто кр}}$ существенно уменьшаются, что подтверждает эффективность полного поглощения мелкодисперсных частиц пыли. При угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}} = 400 \text{ с}^{-1}$ критическое значение Стокса снижается более чем в 200 раз, позволяя полностью поглощать частицы пыли диаметром $5 \cdot 10^{-7}$ м. При этом критическое значение критерия Стокса $Stk_{\text{пто кр}}$, рассчитанное по формуле (3), соответствуют с достаточной точностью его критическому значению полного поглощения полученному по результатам экспериментальных исследований.

На рис. 2 приведена зависимость «инерционного параметра» $Stk_{\text{пто}}$ от диаметра частиц угольной пыли $d_{\text{пто}}$ при различных значениях угловой скорости вращения капель воды $\omega_{\text{ж}}$. Линия 4 на рис. 2 подтверждает наличие запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, т.е. критического уровня аэродинамического энергетического барьера, являющегося границей автомодельности гидровихревой коагуляции.

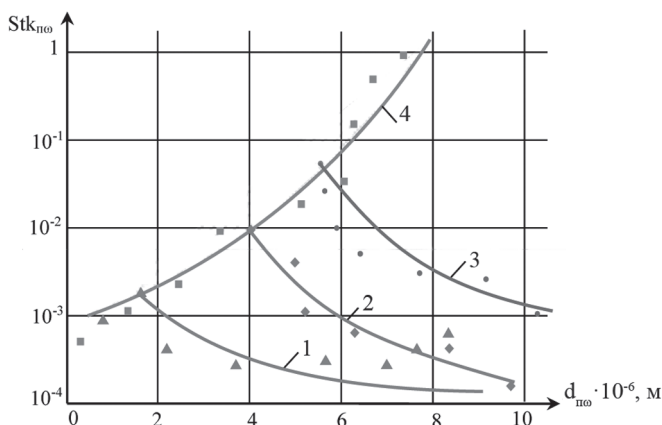


Рис. 2. Зависимость критерия Стокса и его критического значения от диаметра частиц пыли $d_{\text{пто}}$ и угловой скоростью вращения капли жидкости $\omega_{\text{ж}}$: 1 – $\omega_{\text{ж}} = 200 \text{ с}^{-1}$; 2 – $\omega_{\text{ж}} = 100 \text{ с}^{-1}$; 3 – $\omega_{\text{ж}} = 0 \text{ с}^{-1}$; 4 – критическое значение критерия Стокса, $Stk_{\text{пто кр}}$

Fig. 2. The Stokes criterion and its threshold value versus the dust diameter $d_{\text{пто}}$ and the fluid drop rotation speed $\omega_{\text{ж}}$: 1 – $\omega_{\text{ж}} = 200 \text{ s}^{-1}$; 2 – $\omega_{\text{ж}} = 100 \text{ s}^{-1}$; 3 – $\omega_{\text{ж}} = 0 \text{ s}^{-1}$; 4 – Stokes criterion threshold $Stk_{\text{пто кр}}$

По мере снижения диаметра частиц угольной пыли $d_{\text{по}}$ для обеспечения эффективной гидровихревой коагуляции необходимо увеличивать угловую скорость вращения капель воды $\omega_{\text{ж}}$, что согласно предложенной модели и результатов эксперимента способствует снижению критического значения «инерционного параметра» $Stk_{\text{по кр}}$.

Снижение энергетического барьера при гидровихревой коагуляции обусловлено снижением потребной кинетической энергии в связи со снижением энергии поверхностного натяжения, что подтверждается формулой (3) и уравнением (14). Основным фактором снижения «инерционного параметра» $Stk_{\text{по кр}}$ является увеличение угла смачивания θ_{ω} при гидровихревом взаимодействии частицы пыли с вращающейся каплей жидкости, что подтверждается уравнением (14).

Из анализа рис. 1, 2 видно, что по мере снижения диаметра частиц диспергированной угольной пыли снижение «инерционного параметра» $Stk_{\text{по кр}}$ достигается кинематически за счет вращательного движения капли воды согласно уравнению (3), обеспечивая тем самым полное поглощение частиц пыли меньшего диаметра по сравнению классической коагуляцией.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достаточную достоверность критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции для применения его в целях обеспечения идентичности результатов моделей испытаний с реальны-

ми физическими процессами пылеподавления.

Результаты расчетов по предложенной математической модели критериальных уравнений показали высокую эффективность гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции, позволившей на 25% снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощаемых абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли до $5 \cdot 10^{-7}$ м повысить эффективность пылеподавления до 99% в сравнении с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

Выводы

1. Критериальные уравнения с достаточной точностью позволяют устанавливать условия идентичности механизма гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения в системе «твердое-жидкое» при проведении экспериментальных исследований.

2. Результаты расчета критического значения «инерционного параметра» $Stk_{\text{п кр}}$ по предложенным математическим моделям и экспериментальным исследованиям в условиях достижения максимальных значений коэффициента эффективности коагуляции $K_k = 1$ показали достаточную сходимость.

3. Критические значения критерия Стокса в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции уменьшаются с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_{\text{ж}}$, уменьшая диаметр полностью поглощаемых частиц пыли пылинок $d_{\text{по}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцева О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № S7. — С. 315–325.

2. Ковшов С., Эрзин А., Ковшов В. Связывание пыли с экологически безопасными составами на открытых пылеобразующих поверхностях угледобывающих предприятий // Международный журнал экологии и развития. — 2015. — 30 (1). — С. 11–23.

3. Gendler S. G., Kovshov S. V. Investigation into adhesive properties of sodium carboxymethyl cellulose aiming at development of dust suppression layer // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016 7(1), pp. 2084–2090.

4. Makarov V. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. Vol. 56, iss. 1, pp. 103–106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7.

5. Korshunov G. I., Kovshov S. V., Safina A. M. Dust control methods in open-pit mining // Current state of physical & chemical research *Ecology, Environment and Conservation*. 2017. Vol. 23, No 2, pp. 883–889.

6. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Плотников Н. С., Потапов В. В. Математическое моделирование вихревого гидрообеспыливания на горно-обогатительных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 4. — С. 210–217.

7. Макаров В. Н., Горшкова Н. А., Чуркин В. А. Патент 2575372 РФ Установка динамического пылеподавления, заявл.: 20.11.2014, опубл.: 20.02.2016.

8. Макаров В. Н., Косарев Н. П., 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. — № 2. — Т. 18. — С. 178–189.

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

10. 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: 10.1134/S0018151X14020035.

11. Cecala A. B., Dust A. D. Control handbook for industrials minerals mining and processing / Office of Mine safety and Health Research, 2012. — 159 с.

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

13. Program evaluation and information resources, standardized information system. Arlington: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, 2009.

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

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

REFERENCES

1. Skopintseva O. V. Scientific justification of integrated gas and dust hazard reduction in coal mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no S7, pp. 315–325. [In Russ].

2. Kovshov S., Erzin A., Kovshov V. Dust binding with ecologically safe compounds on exposed dusting surfaces in coal mines. *Mezhdunarodnyy zhurnal ekologii i razvitiya*. 2015. 30 (1), pp. 11–23. [In Russ].

3. Gendler S. G., Kovshov S. V. Investigation into adhesive properties of sodium carboxymethyl cellulose aiming at development of dust suppression layer. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016 7(1), pp. 2084–2090.

4. Makarov V. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. Vol. 56, iss. 1, pp. 103–106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7.

5. Korshunov G. I., Kovshov S. V., Safina A. M. Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical & chemical research *Ecology, Environment and Conservation*. 2017. Vol. 23, No 2, pp. 883–889.

6. Makarov V. N., Makarov N. V., Plotnikov N. S., Potapov V. V. Mathematical modeling of vortex hydrodedusting at mining and processing plants. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 4, pp. 210–217. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217.

7. Makarov V. N., Gorshkova N. A., CHurkin V. A. *Patent RU 2575372*, 20.02.2016.
8. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugol'nikov A. V., Lifanov A. V. Efficient localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2018, no 2, vol. 18, pp. 178–189. [In Russ].
9. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. Principles of hydrodedusting. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2007, no 10, pp. 1–24. [In Russ].
10. 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: 10.1134/S0018151X14020035.
11. Cecala A. B., Dust A. D. *Control handbook for industrials minerals mining and processing*. Office of Mine safety and Health Research, 2012. 159 с.
12. 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.
13. *Program evaluation and information resources, standardized information system*. Arlington: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, 2009.
14. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Uchebnik dlya vuzov. 7-e izd. [Mechanics of fluid and gas. Textbook for high schools. 7th edition], Moscow, Drofa, 2003, 840 p.
15. Venikov V. A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya primenitel'no k zadacham elektroenergetiki*. Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd. [Theory of modeling and similarity in problems of electrical power engineering. Textbook for high schools. 4th edition], Moscow, Librokom, 2014, 439 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Владимир Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор,
 Угольников Александр Владимирович¹ — канд. техн. наук, зав. кафедрой,
 Матеров Артем Юрьевич — заведующий отделом,
 e-mail: a.materov@oilgazmash.ru,
 ООО Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш»,
 Макаров Николай Владимирович¹ — канд. техн. наук, зав. кафедрой,
 e-mail: mnikolay84@mail.ru,
 Таугер Виталий Михайлович¹ — канд. техн. наук, зав. кафедрой,
¹ Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Макаров Н.В., e-mail: mnikolay84@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Makarov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
 A.V. Ugol'nikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Chair,
 A.Yu. Materov, Head of Department, e-mail: a.materov@oilgazmash.ru,
 Scientific-production complex «OylGazMash», 142103, Podolsk, Russia,
 N.V. Makarov¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Chair,
 e-mail: mnikolay84@mail.ru,
 V.M. Tauger¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Chair,
¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: N.V. Makarov, e-mail: mnikolay84@mail.ru.

