

УДК 621.982.622.273, 622.44  
DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-13-20

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОНАПОРНОГО ГИДРООБЕСПЫЛИВАНИЯ

### A PROMISING METHOD OF HIGH-PRESSURE HYDRO-DUSTING EFFICIENCY INCREASING



**В. Н. Макаров,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
mnikolay84@mail.ru



**Н. В. Макаров,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
mnikolay84@mail.ru



**В. В. Потапов,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
E-2c1@inbox.ru



**Э. М. Горшкова,**  
Уральский  
государственный  
горный университет,  
г. Екатеринбург  
Gmf.gm@m.ursmu.ru

**V. Makarov,**  
Ural State Mining  
University,  
Yekaterinburg

**N. Makarov,**  
Ural State Mining  
University,  
Yekaterinburg

**V. Potapov,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

**E. Gorshkova,**  
Ural State Mining  
University, Yekaterinburg

Рассмотрен перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания. Анализ существующих способов гидрообеспыливания показал недостаточную эффективность обеспечения санитарно-гигиенических условий на горных предприятиях. Установлено, что при высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий в шахтах и приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в горном производстве. Предложен метод вихревого высоконапорного гидрообеспыливания, основанный на принципе вихревой инерционной ортокINETической гетерокоагуляции в системе «жидкое – твердое». Представлена математическая модель вихревого гидрообеспыливания, показано существенное снижение величины потребной энергии полного поглощения гидрофобных частиц пыли каплями жидкости при интенсивном закручивании капель жидкости. Уточнена графическая модель взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «твердое – жидкое». Установлено, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания. Получены уравнения для расчета значений критериев Стокса и Рейнольдса в условиях вихревой инерционной ортокINETической гетерокоагуляции. Получено уравнение для расчета величины снижения потребной энергии полного поглощения частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Доказано существенное увеличение поверхности смачивания и краевого угла смачивания в условиях вихревой кинематической коагуляции. Представлены уравнения для расчета эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Доказано существенное снижение медианального размера диспергированного состава частиц пыли, повышение эффективности пылеподавления, снижение расхода воды в условиях вихревого гидрообеспыливания. Установлено, что снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено увеличением значений критериев Стокса и Рейнольдса при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями, рассчитанными без учета вращения капли жидкости

**Ключевые слова:** гидрообеспыливание; вихревая инерционная ортокINETическая гетерокоагуляция; гидрофобность; краевой угол смачивания; кинематическая коагуляция; критерий Стокса; угловая скорость; энергетический барьер; высоконапорное гидрообеспыливание; добытый уголь

A promising method for increasing the efficiency of high-pressure hydro-dusting is considered. Analysis of existing methods of hydro-dusting has showed their inadequate efficiency of ensuring sanitary and hygienic conditions in mining enterprises. It has been established that with high-pressure hydro-dusting, energy consumption for aeration is significantly increased, which reduces the energy efficiency of sanitary-hygienic conditions in mines and, as a result, leads to a drop in the competitiveness of environmental technology in mining. A method of vortex high-pressure hydro-dusting based on the principle of vortex inertial orthokinetic hetero-coagulation in the system "liquid-solid" is proposed. A mathematical model of vortex hydro-dusting is proposed; a significant reduction in the amount of energy required for the complete absorption of absolutely hydrophobic dust particles by liquid droplets is observed when the liquid droplets are rapidly curled. The graphic model of interaction in the contact zone at the moment of collision in the "solid-liquid" system is specified, it is established that the contact area of the liquid drop with the dust particle has a direct effect on the value of the contact angle of wetting. Equations for calculating the values of the Stokes and Reynolds criteria under conditions of vortex inertial orthokinetic hetero-coagulation are obtained. An equation is obtained for calculating the value of the decrease in the energy required for the total absorption of dust particles as a function of the angular velocity of rotation of liquid droplets. A significant increase in the wetting surface and contact angle of wetting under conditions of vortex kinematic coagulation is proved. Equations for calculating the effective wetting contact angle and the minimum diameter of the dust particles to be absorbed as a function of the angular velocity of liquid droplet rotation are obtained. A significant reduction in the median size of the dispersed composition of dust particles, an increase in the effectiveness of dust suppression, and a reduction in the flow rate of water under vortex hydrodeposition conditions have been demonstrated. It was found that the decrease in energy barriers in the conditions of vortex coagulation is due to an increase in the values of the Stokes and Reynolds criteria, with the rotation of the liquid droplet in comparison with their values calculated without taking into account the rotation of the liquid drop

**Key words:** hydrodispersing; vortex inertial orthokinetic hetero-coagulation; hydrophobicity; wetting contact angle; kinematic coagulation; Stokes criterion; angular velocity; energy barrier; high-pressure hydrodeposition; mined coal

**Введение.** Пылеподавление при помощи аэрированных частиц жидкости (гидрообеспыливание) является одним из наиболее распространенных средств обеспечения санитарно-гигиенических условий в технологиях горного производства.

Существенное влияние на эффективность пылеподавления оказывают плотность орошения и удельный расход воды. Заметный рост эффективности пылеподавления наблюдается при удельном расходе воды не менее 50 л на 1 т добытого угля. Низконапорное орошение не улавливает мелкие фракции пыли, наиболее пневмоконнозоопасные для человеческого организма. При этом остаточная запыленность не обеспечивает безвредные условия труда [3].

Резервом роста эффективности гидрообеспыливания является повышение давления жидкости на выходе из форсунок. Это обусловлено тем, что эффект пылеподавления в существенной мере сводится к преодолению энергетического барьера и переводу системы «твердое — жидкое» в более устойчивое состояние, т. е. определяется степенью коагуляции и способностью

капель жидкости схватывать частицы пыли [8].

При высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий в шахтах и, как результат, приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в горном производстве [1; 11].

Актуальность задачи совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания как составной части программы внедрения экологического недропользования требует нового подхода к построению графоаналитической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции воднопылевого аэрозоля [6].

*Цель моделирования* кинематических и динамических параметров системы «капля жидкости — частица пыли» в процессе предлагаемой вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции — исследование механизма кинематической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря в зоне контакта, индуцированного

вращающейся каплей жидкости [9; 13]. Математическая модель вихревой кинематической коагуляции, использующей указанный принцип, послужит основой подготовки рекомендации по совершенствованию технологического оборудования динамического высоконапорного гидрообеспыливания, созданию энергоэффективных вихревых форсунок для установок пылеподавления.

*Методология и методика исследования.* Фиксация частиц, приблизившихся к капле на расстояние действия адгезионных сил, зависит от величины краевого угла смачивания  $\theta$ . Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних инерционных сил, которая соответствует кинетической энергии взаимодействия в процессе их контакта  $W_k$ . Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, если кинетическая энергия  $W_k$  будет больше или равна энергии поглощения  $P_{ж-г}$ , соответствующей сумме энергии адгезии, определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания, определяемой удельной энергией растекания [2; 4; 5; 7].

С учетом изложенного, используя известное выражение кинетической энергии частицы пыли как твердого тела  $W_k$  и энергии поглощения ее жидкостью  $P_{ж-г}$ , условие полного захвата частицы пыли с минимальным диаметром  $d_{п.м.}$  каплей жидкости после соответствующих преобразований получим в виде

$$d_{п.м.} = 24 \frac{2\delta_{ж-г} \cos \theta}{(\rho_{п.} - \rho_{г.})(V_{ж.} - V_{г.})^2}, \quad (1)$$

где  $d_{п.м.}$  — минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м;

$\rho_{п.}$  и  $\rho_{г.}$  — плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{ж.}$  и  $V_{г.}$  — скорость капли жидкости и газа соответственно, м/с;

$\delta_{ж-г}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость — газ», Дж/м<sup>2</sup>;

$\theta$  — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость — газ», рад.

Из анализа графической модели взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «твердое — жидкое», приведенной на рис. 1, и формулы (1) видно, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания  $\theta$ . Чем меньше радиус кривизны поверхности капли в зоне контакта, т. е. меньше ее размер, тем меньше краевой угол смачивания  $\theta$ , а следовательно, тем больше потребуется затратить энергии для полного поглощения частицы пыли диаметром  $d_{п.м.}$  каплей жидкости, определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

С ростом краевого угла смачивания  $\theta$  величина энергии поглощения  $P_{ж-г}$  снижается, что позволяет обеспечить заданный уровень эффективности обеспыливания.

Критериями подобия, определяющими идентичность кинематических, инерционных и аэродинамических явлений коагуляции, т. е. переход системы «частицы пыли в капле жидкости» в устойчивое энергетическое состояние, являются инерционные критерии Стокса (Stk) и Рейнольдса (Re), характеризующие соотношение сил инерции и вязкости в трехфазной среде «жидкое — твердое — газообразное» [2; 9; 13].

Экспериментально установлено существование аэродинамического энергетического барьера, препятствующего переходу системы «жидкое — твердое» на более высокий энергетический уровень коагуляционного взаимодействия при низких значениях кинетической энергии взаимодействия капли жидкости и частицы пыли, что соответствует критическим значениям критерия Стокса, при которых невозможен захват частиц пыли [9; 13].

Влияние кинематических и динамических параметров вращения капли жидкости на аэродинамический поверхностно-адгезионный энергетический барьер и краевой угол смачивания показано на графической модели вихревой инерционной ортокинетики гетерокоагуляции при взаимодействии частицы пыли с вращающейся с угловой скоростью  $\omega_{ж.}$  каплей жидкости, представленной на рис. 1.

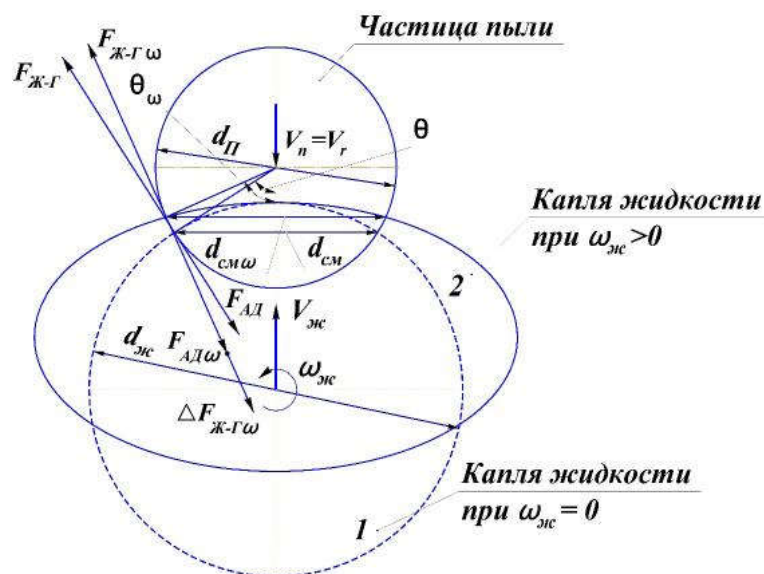


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли капли жидкости:

1 – классическая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция,  $\omega_{\text{гг}} = 0$ ;

2 – вихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция,  $\omega_{\infty} > 0$

Fig. 1. Graphical model of the vortex kinematic coagulation of a dust particle of a liquid drop:

1 – classical inertial orthokinetic hetero-coagulation,  $\omega_{xx} = 0$ ;

2 – vortex inertial orthokinetic hetero-coagulation,  $\omega_{\text{max}} > 0$

При вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_{\text{ж}}$  вокруг её поверхности и в зоне контакта, по условию Гельмгольца-Бернулли, создаётся область разрежения, т.е. пониженного статического давления на величину удельной энергии присоединенного вихря  $\Delta W_{\text{к}}$ , скорость которого, согласно гидродинамической аналогии, определяется по известной в теории электродинамики формуле Био-Саварра. Таким образом, присоединенный вихрь, обусловленный вращением капли жидкости, снижая статическое давление в зоне ее контакта с частицей пыли, способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [10; 12].

Изменение кинематических параметров, характеризующих взаимодействие частицы пыли и капли жидкости в зоне контакта при соударении, приводит к существенным изменениям фактических значений критериев Стокса и Рейнольдса, которые в условиях вихревой кинематической коагуляции определяются по формулам:

$$Stk_{\omega} = \frac{d_n^2 (\rho_n - \rho_f) \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_n)^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_n^2 \sin \theta}}{18 \mu_f d_n};$$

$$Re_{\kappa\omega} = \frac{d_{\kappa}\rho_{\Gamma}\sqrt{(V_{\kappa}-V_{\Gamma})^2+0.25\omega_{\kappa}^2d_{\pi}^2\sin\theta}}{\mu_{\Gamma}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{ж}}$  – диаметр капли жидкости, м;

$V_{\pi} = V_r$  — скорость перемещения частицы пыли, м/с;

$\rho_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$  — плотности частицы пыли и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{\Gamma}$  — коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

**Результаты исследования.** Таким образом, вращательное движение капли жидкости увеличивает фактическое эффективное значение критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{ж\omega}$  в зоне контакта, способствуя снижению как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

Снижение потребной энергии для полного поглощения частицы пыли вращающейся каплей жидкости, равное работе силы депрессии в зоне контакта на длине частицы пыли, можно выразить уравнением

$$\Delta \Pi_{\mathbf{k}-\Gamma} = \Delta F_{\mathbf{k}-\Gamma} d_{\Pi} = \frac{1}{2} \Gamma_{\omega} \omega_{\mathbf{k}} d_{\Pi} S_{\mathbf{k}}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_\omega$  — циркуляция газа в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$S_k$  — площадь контакта, соответствующая площади смачивания,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta F_{ж-г}$  — сила давления разряжения (депрессия) в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленная влиянием присоединенного вихря и равная снижению силы поверхностного натяжения, Н.

Уравнение для дополнительной кинетической энергии, снижающей аэродинамический барьер поглощения, т. е. фактически уменьшающей потребную кинетическую энергию, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капле жидкости, с учётом рис. 1, уравнений Бернулли, Остроградского-Гаусса, получим в виде [5]

$$\Delta W_k = -\Delta P_{ж-г} = \frac{\pi^2}{32} \rho_r d_n^2 \sin^4 \theta \omega_\omega^2. \quad (4)$$

С учетом формулы (3) уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленной влиянием присоединенного вихря и равной снижению силы поверхностного натяжения, получим в виде

$$\Delta \Gamma_{ж-г} = \frac{\pi^2}{32} \rho_r d_n^4 \sin^4 \theta \omega_\omega^2. \quad (5)$$

$$d_{n \omega m} = \sqrt[3]{\frac{768 \delta_{ж-г} (\cos \theta - \cos \arccos(\cos \theta - \frac{\pi \rho_r \omega_\omega^2 \delta_{ж-г}^2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{(\rho_n - \rho_r)^3 (V_{ж-г} - V_n)^6}))}{\pi \rho_r \sin^2 \theta \omega_\omega^2}}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены результаты расчета по предложенной математической модели вихревой кинематической коагуляции изменения критических значений критерия Стокса  $Stk_{кр}$  в зависимости от угловой скорости вращения капель воды  $\omega_\omega$  диаметром  $d_{ж-г} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  для абсолютно гидрофобных частиц окиси кремния.

Приведенные изолинии угловой скорости вращения капель жидкости в функции от критических значений критериев Стокса и Рейнольдса подтверждают существенное

Для вихревой инерционной ортокINETической гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения с учетом указанных уравнений примет вид

$$P_{ж-г \omega} = P_{ж-г} - \Delta P_{ж-г} = 2 \delta_{ж-г} \cos \theta_\omega. \quad (6)$$

С учетом уравнений [4-6] после соответствующих преобразований уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы при вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_\omega$  имеет вид

$$\theta_\omega = \arccos(\cos \theta - \frac{\pi \rho_r d_n^3 \sin^2 \theta \omega_\omega^2}{64 \delta_{ж-г} \cos \theta}). \quad (7)$$

Таким образом, с учётом предложенной модели инерционной ортокINETической гетерокоагуляции системы «частица пыли — капля жидкости» при вращении частицы жидкости с угловой скоростью  $\omega_\omega$  минимальный диаметр  $d_{n \omega m}$  частицы пыли, полностью поглощаемой в процессе захвата и смачивания каплями жидкости при действии сил поверхностного натяжения, инерционных сил поступательного и вращательного движения, может быть записан в виде

снижение как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера. При угловой скорости вращения капель жидкости  $\omega_\omega = 3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  критическое значение критерия Стокса снижается более чем в четыре раза, а критическое значение критерия Рейнольдса — более чем в три раза, по сравнению с их значениями в условиях поступательного движения капель жидкости, т. е. при  $\omega_\omega = 0$ .



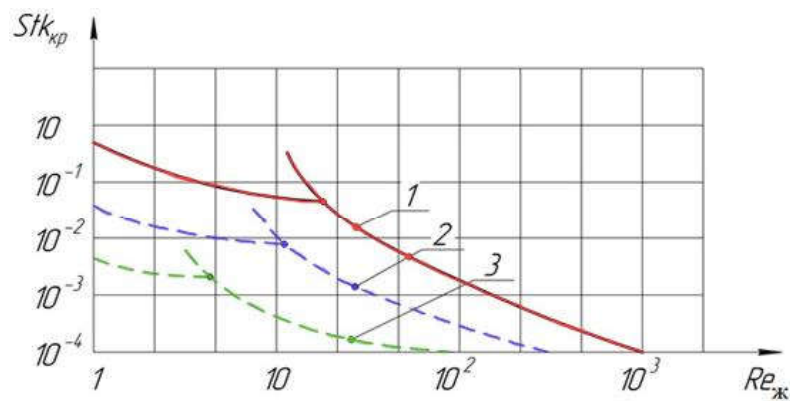


Рис. 2. Изолинии угловой скорости вращения капли воды в функции от критических значений критерия Стокса и Рейнольдса:

- 1 –  $\omega_{\text{ж}} = 0$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 4,1 \cdot 10^{-2}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 20$ ,  $d_{\text{пм}} = 6 \cdot 10^{-6}$  м;  
 2 –  $\omega_{\text{ж}} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-2}$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 9 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 15$ ,  $d_{\text{пм}} = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м;  
 3 –  $\omega_{\text{ж}} = 3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-2}$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 6$ ,  $d_{\text{пм}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м/

Fig. 2. Isolines of the angular velocity of rotation of a water drop as a function of the critical values of the Stokes and Reynolds criterion:

- 1 –  $\omega_{\text{ж}} = 0$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 4,1 \cdot 10^{-2}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 20$ ,  $d_{\text{пм}} = 6 \cdot 10^{-6}$  м;  
 2 –  $\omega_{\text{ж}} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-2}$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 9 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 15$ ,  $d_{\text{пм}} = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м;  
 3 –  $\omega_{\text{ж}} = 3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-2}$ ,  $Stk_{\text{кр}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{\text{ж}} = 6$ ,  $d_{\text{пм}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м/

Снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено, как показано ранее (3), увеличением значений критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{\text{ж}\omega}$  при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями  $Stk$ ,  $Re_{\text{ж}}$ , рассчитанными без учета вращения капли жидкости, т. е. при  $\omega_{\text{ж}} = 0$ .

Снижение величины критерия Рейнольдса для капель жидкости при вихревом высоконапорном гидрообеспыливании соответствует уменьшению ее расхода и потребного давления, т. е. повышению ресурса эффективности системы пылеподавления. Приведенные данные показывают, что при вихревом инерционном ортокинетическом гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капель жидкости и несмачиваемых частиц пыли коэффициент захвата  $\eta_{Stk}$  будет равен коэффициенту коагуляции  $\eta_{\kappa}$  при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т. е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости либо меньших размерах частицы пыли.

**Выводы.** Вращение капли жидкости в процессе вихревой инерционной ортокине-

тической коагуляции увеличивает фактическое эффективное значение критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{\text{ж}\omega}$  в зоне контакта, способствуя снижению их критических значений.

Вихревое высоконапорное гидрообеспыливание способствует увеличению угла смачивания, снижению минимального размера абсолютной гидрофобности частиц пыли, уменьшению запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

Применение вихревых форсунок в установках пылеподавления позволяет уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц пыли до  $1,5 \cdot 10^{-6}$  м, т. е. существенно уменьшить медианальный размер диспергированного состава частиц пыли, повышая эффективность пылеулавливания до 99 %.

Вихревая кинематическая коагуляция позволяет на 20 % снизить расход воды по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием, доведя его до 8 л/т.

## Список литературы

1. Борьба с пылью и вредными газами в железорудных шахтах / А. П. Янов, В. С. Ващенко, Ф. Г. Гагауз [и др.]. М.: Недра, 1984. 228 с.
2. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1976. 416 с.
3. Ксенофонтова А. И., Бурчаков А. С. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах. М.: Недра, 1965. 231 с.
4. Лойцянский И. Л. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
5. Макаров В. Н., Горшкова В. А., Воегжанин В. А. Математическое моделирование активного управления аэродинамикой шахтных центробежных вентиляторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 39–45.
6. Моделирование и проектирование систем гидрообеспыливания / В. П. Журавлев, В. И. Саранчук, И. А. Страхов [и др.]. Киев: Наукова думка, 1990. 132 с.
7. Патент 260 14 95 РФ. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления / Н. В. Макаров, В. Н. Макаров; заявл. 22.06.2015; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31.
8. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли / В. И. Саранчук, В. П. Качан, В. В. Рекун [и др.]. Киев: Наукова думка, 1984. 216 с.
9. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкереv Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1–24.
10. 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. P. 103–106.
11. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS) // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 38. No. 3. P. 288–292.
12. Malmyth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. Studies of upper surface blown airfoils in incompressible and transonic flows // *AIAA*. 1980. No. 18. P. 14–16.
13. Owyer F. B., Thompson R. L. Ore sorting (Develop and Innovat. Aust. Process Ind) // *Aust. Chem. Eng. Conf. Newcastle*, 1972. P. 81–88.

## References

1. *Borba s pylyu i vrednymi gazami v zhelezorudnykh shahtah* / A. P. Yanov, V. S. Vashchenko, F. G. Gagauz [i dr.] (A fight with dust and harmful gases in iron ore mines / A. P. Yanov, V. S. Vashchenko, F. G. Gagauz [and others]). Moscow: Nedra, 1984. 228 p.
2. Zimon A. D. *Adgeziya zhidkosti i smachivanie* (Adhesion of liquids and wetting). Moscow: Chemistry, 1976. 416 p.
3. Ksenofontova A. I., Burchakov A. S. *Teoriya i praktika borby s pylyu v ugolnykh shahtah* (Theory and practice of dust control in coal mines). Moscow: Nedra, 1965. 231 p.
4. Loytsiansky I. L. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of Fluids and Gas). Moscow: Nauka, 1978. 736 p.
5. Makarov V. N., Gorshkova V. A., Volegzhanin V. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information-analytical bulletin), 2016, no. 4, pp. 39–45.
6. *Modelirovaniye i proektirovaniye sistem gidroobespylivaniya* / V. P. Zhuravlev, V. I. Saranchuk, I. A. Strakhov [i dr.] (Modeling and design of hydrodispersing systems / V. P. Zhuravlev, V. I. Saranchuk, I. A. Strakhov [and others]). Kiev: Naukova Dumka, 1990. 132 p.
7. *Patent 260 14 95 RF. Sposob sozdaniya podemnoy sily i ustroystva dlya ego osushchestvleniya* / N. V. Makarov, V. N. Makarov; *zayavl. 22.06.2015; opubl. 10.11.2016* (The patent 260 14 95 of the Russian Federation. The method of creating a lifting force and a device for its implementation / N. V. Makarov, V. N. Makarov; claimed. 22.06.2015; published on 10.11.2016). Bul. No. 31.
8. *Fiziko-khimicheskie osnovy gidroobespylivaniya i preduprezhdeniya vzryvov ugolnoy pyli* / V. I. Saranchuk, V. P. Kachan, V. V. Rekun [i dr.] (Physical and chemical basis of hydrodeposition and prevention of coal dust explosions / V. I. Saranchuk, V. P. Kachan, V. V. Rekun [and others]). Kiev: Naukova Dumka, 1984. 216 p.
9. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti* (Life safety), 2007, № 10, pp. 1–24.
10. Makarov V. N., Davydov S. Ya. *Refractories and Industrial Ceramics* [Refractories and Industrial Ceramics], 2015, vol. 56, pp. 103–106.
11. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. *Refractories and Industrial Ceramics* [Refractories and Industrial Ceramics], 2017, vol. 38, no. 3, pp. 288–292.

12. Malmyth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. *AJAA* [AJAA], 1980, no. 18, pp. 14–16.

13. Owyer F. B., Thompson R. L. *Ore sorting (Develop and Innosot, Aust. Process Ind.)* [Ore sorting (Develop and Innosot, Aust. Process Ind.)]. Aust. Chem. Eng. Conf. Newcastle, 1972. P. 81–88.

### *Коротко об авторах*

---

**Макаров Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование  
mnikolay84@mail.ru

**Макаров Николай Владимирович**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой горной механики, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование  
mnikolay84@mail.ru

**Потапов Владимир Валентинович**, канд. техн. наук, доцент кафедры горного дела, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование  
E-2c1@inbox.ru

**Горшкова Элла Михайловна**, преподаватель кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование  
Gmf.gm@m.ursmu.ru

### *Briefly about the authors*

---

**Vladimir Makarov**, doctor of technical sciences, professor, Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

**Nikolai Makarov**, candidate of technical sciences, head of Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

**Vladimir Potapov**, candidate of technical sciences, associate professor, Mining department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

**Ella Gorshkova**, teacher, Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

### *Образец цитирования*

---

Макаров В. Н., Макаров Н. В., Потапов В. В., Горшкова Э. М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 5. С. 13–20. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-13-20.

Makarov V., Makarov N., Potapov V., Gorshkova E. A promising method of high-pressure hydro-dusting efficiency increasing // Transbaikalian State University Journal, 2018, vol. 24, no. 5, pp. 13–20. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-5-13-20.

Статья поступила в редакцию: 06.04.2018 г.  
Статья принята к публикации: 28.04.2018 г.

