

УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АДГЕЗИОННЫМ БАРЬЕРОМ ПРИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В.Н. Макаров¹, А.В. Угольников¹, Н.В. Макаров¹, А.М. Филатов²

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

² АО «Северский гранитный карьер», Екатеринбург, пос. Северка, Россия

Аннотация: Обеспечение санитарно-гигиенических условий и безопасности на горных предприятиях отличается повышенной энергоемкостью, что отрицательно сказывается на их конкурентоспособности. Одно из перспективных направлений обеспечения энергоэффективности улавливания угольной пыли заключается в использовании эффекта депрессии закрученной капли жидкости. Вихревая коагуляция снижает энергию отталкивания каплей вращающейся жидкости и частиц пыли в поле инерционных сил за счет разрежения в зоне их контакта, обусловленного переходом потенциальной энергии статического давления в кинетическую энергию циркуляционного движения. Уменьшение критерия Стокса при неизменном расходе жидкости приводит к достижению эффекта поглощения более мелких частиц пыли вращающимися каплями жидкости. Результаты математического моделирования управлением энергией коагуляции за счет изменения угловой скорости вращения каплей жидкости верифицированы на специально спроектированном стенде с учетом критериев геометрического, кинематического и динамического подобия. Снижение порогового значения критерия Рейнольдса позволяет на 25% уменьшить потребность воды. При этом наиболее значимый результат заключается в повышении эффективности поглощения частиц пыли в диапазоне от $2 \cdot 10^{-6}$ м до $5 \cdot 10^{-7}$ м, с 85% до 98%, поскольку именно частицы пыли с размерами менее $2 \cdot 10^{-6}$ м наиболее вредны для здоровья и взрывоопасны. Использование теоретических и экспериментальных исследований позволяют усовершенствовать методику проектирования гидровихревых форсунок, являющихся основным элементом пылеулавливающего оборудования, применяемого в ТЭК и при производстве строительных материалов.

Ключевые слова: пылеподавление, инерционная ортокинетическая гидровихревая гетерокоагуляция, аэродинамический, поверхностно-адгезионный, барьеры, критерии Стокса, Рейнольдса.

Для цитирования: Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Филатов А. М. Управление поверхностно-адгезионным барьером при пылеподавлении на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. – С. 114–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_114.

Surface adhesion barrier management in dust suppression at mining enterprises

V.N. Makarov¹, A.V. Ugolnikov¹, N.V. Makarov¹, A.M. Filatov²

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

² JSC Seversky Granite Quarry, Severka, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The effect of dust suppression at mining enterprises depends significantly on overcoming the energy barrier during the collision of liquid droplets with dust particles, and the transfer of the system «solid-liquid» into a more stable state, i.e. it is determined by the degree of coagulation and the ability of liquid droplets to capture dust particles. Under the conditions of inertial orthokinetic hydrovortex heterocoagulation and the change in the angular velocity of a liquid droplet rotation ω_1 , one can control the critical value of Stokes number reducing the inhibitory surface adhesion barrier. The attached vortex caused by the rotation of a liquid droplet reduces the static pressure in the zone of its contact with a dust particle, thus, increasing the wetting angle up to θ_{ω} , which contributes to the reduction in aerodynamic energy barrier. The experiments verified the criterial equation of hydrovortex coagulation to be applied in order to ensure the identity of the results of simulation tests and real physical processes of dust suppression. The results of calculations and experiments using the proposed mathematical model showed high efficiency of hydrovortex heterocoagulation enabling to reduce water consumption by 25%, reduce the minimum size of absorbed particles of coal dust to $5 \cdot 10^{-7}$ m, to increase the efficiency of dust suppression up to 99% in comparison with traditional high-pressure hydrodedusting. The use of theoretical and experimental studies enables to improve the methods for designing hydrovortex injectors, which are the main element of dust precipitators utilized in the fuel and energy complex and in manufacturing construction materials.

Key words: dust suppression, inertial orthokinetic hydrovortex heterocoagulation, aerodynamic, surface adhesive, barriers, Stokes number, Reynolds number.

For citation: Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Makarov N. V., Filatov A. M. Surface adhesion barrier management in dust suppression at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-2):114-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_114.

Введение

В условиях постоянно увеличивающейся глубины разработки, добыча угля в шахтах сопровождается ухудшением санитарно-гигиенических условий, ростом взрывоопасности, снижением производительности труда, увеличением затрат на вспомогательные мероприятия, снижением конкурентоспособности горных предприятий [1 – 4]. Высокая твердость и хрупкость горных пород при подземной добыче и транспортировке угля приводит к интенсивному запылению, что в свою очередь является причиной образования взрывоопасной, запыленной воздушной среды.

Разработка эффективных систем пылеподавления является важнейшей составной частью обеспечения санитар-

но-гигиенических норм в технологиях горного производства. Для обеспечения нормативных параметров шахтной атмосферы применяют комплекс мероприятий, устраняющих либо локализирующих отрицательные факторы технологических процессов добычи угля [4, 6]. Наиболее опасными в плане обеспечения санитарно-гигиенических норм и взрывоопасности являются угольные шахты, в связи с особенностями физико-химических свойств. Кроме того, рост производительности труда, применение энергоёмкости технологического оборудования способствует усугублению проблемы, повышая актуальность поиска эффективных решений [7, 9].

Одним из распространенных путей обеспечения нормативных условий в

шахтах является пылеулавливание, заключающееся в поглощении каплями жидкости частицы пыли, т.е. в агрегатировании перехода на более устойчивый энергетический уровень в процессе контакта [10 – 12]. Процесс поглощения каплей жидкости частицы пыли возможен только при энергии, достаточной для преодоления действия расклинивающих сил в процессе контакта [13, 15].

Поскольку основной момент при коагуляции заключается в механизме преодоления сил отталкивания задача управления поверхностно адгезионным барьером заключается формировании условий создания депрессии при контакте капель жидкости и частиц пыли [16]. Для обеспечения полного поглощения частиц пыли каплями жидкости необходимо воздействовать на силы поверхностного натяжения в зоне контакта за счет применения кинематики их взаимного сближения [14, 17, 18].

Постановка задачи

Возможность поглощения частицей пыли каплей жидкости в процессе сближения определяется краевым углом смачивания θ и происходит самостоятельно и исключительно только под действием внешних силовых факторов для гидрофобных частиц. Многочисленные эксперименты доказали, что гидрофильная способность твердых тел уменьшается с увеличением их дисперсности. Практически частицы δ_p размером меньше $5 \cdot 10^{-6}$ м, относятся к гидрофобным независимо от их состава [5, 6].

Если частица достигла поверхности капли, на прочность контакта начинают влиять адгезионные силы. Различие механизмов взаимодействия гидрофобных и гидрофильных частиц можно объяснить отличием в величине расклинивающего давления в зоне контакта. Его величина определяется природой пыли и жидкости, геометрическими парамет-

рами и связана с краевым углом смачивания θ . Возникновение расклинивающего давления объясняется образованием на них адсорбционных оболочек воздуха. Прочность этих оболочек характеризуется удельной поверхностной энергией \bar{W} . Наиболее прочной адсорбционной оболочкой обладает капля, потому что ее удельная поверхностная энергия $\sigma_{ж-г}$, определяемая как коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость – газ», во много раз больше таковой частицы пыли ($\sigma_{ж-г} \gg \sigma_{п-г}$), причем размеры адсорбционных оболочек достигают величины порядка 10 молекулярных слоев газа (для воздуха $\geq 3,6 \cdot 10^{-3}$ мкм) [5, 11, 19].

Струи обтекающего каплю воздуха стремятся оторвать осевшую частицу пыли с поверхности капли и вернуть ее обратно в поток, если частица не погрузилась в каплю на достаточную для полной фиксации глубину [5]. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние аэродинамических сил обтекающего потока газа на исход контактного взаимодействия частиц пыли с поверхностью капли в условиях гидровихревой инерционной ортокинетики гетерокоагуляции (далее по тексту гидровихревая гетерокоагуляция). Исходя из названия исследуемого явления в статье представлена модель процесса взаимодействия двух фаз, т.е. вращающихся вокруг вектора поступательной скорости движения капли жидкости с частицей пыли однонаправленно по линии вектора поступательной скорости и инерционных сил исключительно в рамках аэрогидромеханики.

В статье [10] предложена модель кинетической коагуляции частицы пыли каплей жидкости при $\omega_{ж} = 0$, разработанная графическая модель гидровихревой гетерокоагуляции, при которой капля жидкости вращается с угловой скоростью $\omega_{ж}$, индуцируя в зоне контакта присоединенный вихрь.

Вращение капли жидкости позволяет в зоне контакта создавать разрежение, т.е. снижать расклинивающий эффект от действия сил поверхностного натяжения [10, 20, 21].

Поглощение частицы пыли каплей будет происходить при условии, что ее кинетическая энергия W_k больше или равна сумме энергии адгезии $W_{ад}$ ($F_{ад}$ — сила адгезии) и энергии смачивания $W_{ж-г}$ ($F_{ж-г}$ — сила поверхностного натяжения).

Пороговую энергию полного поглощения частиц пыли каплями жидкости вокруг вектора поступательной с учетом [10] получим в виде:

$$\Pi_{п.з} = \frac{m \cdot d_{жс}^2}{2\tau_{п.з}^2} \cdot Stk_{п.кр.\omega}^2 - \frac{\pi^2}{32} \cdot \rho_g \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \quad (1)$$

где m — масса частиц пыли, кг; $d_{жс}$, d_n — диаметр капли жидкости и частицы пыли соответственно, м; $\tau_{п.з}$ — время релаксации частицы пыли, с; $Stk_{п.кр.\omega}$ — критическое значение числа Стокса; ρ_g — плотность пыли и газа, кг/м³; $\omega_{жс}$ — угловая скорость вращения капель жидкости с⁻¹.

Следовательно, для сравнения значений аэродинамических запрещающих уровней при изменении кинематических и энергетических параметров процесса гидровихревой гетерокоагуляции достаточно анализа корреляции с изменением инерционного параметра Стокса $Stk_{п.кр.\omega}$.

Однако, улавливание пылинок возможно также за счет их прилипания т.е. адгезии к каплям жидкости без полного поглощения пылинки каплей. При контакте частиц малых размеров и капель жидкости наблюдается быстрое растекание жидкости по твердой поверхности до образования полусферы.

Удельная энергия растекания определяет изменение свободной энергии системы: «капля жидкости — частица пыли» в процессе смачивания [5]. Удельная энергия налипания частицы пыли на каплю жидкости вдвое меньше энергии

ее полного поглощения и определена в [10] в виде:

$$\Pi_{ад\omega} = \delta_{ж-г} \cdot \cos\theta_{\omega}, \quad (2)$$

где $\delta_{ж-г}$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость — газ», Дж/м²; θ_{ω} — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость — газ» при гидровихревой коагуляции, рад.

Математическое моделирование

Задача заключается в построении, с учетом (1), (2), приведенных в [10], математической модели гидровихревой коагуляции в расчете на полное поглощение в условиях налипания. Удельная энергия при которой достигается налипание гидрофобных частиц и соответственно минимальный диаметр налипающих частиц пыли с учетом (1), (2) и [10] получим в виде:

$$\Pi_{ад\omega} = \delta_{жс-г} - \frac{\pi^2}{32} \rho_g \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \quad (3)$$

$$d_{номин} = \frac{\delta_{жс-г} \cdot \cos(\arccos(\cos\theta))}{(\rho_n - \rho_g)(V_{жс} - V_g)^2} + \frac{\pi \cdot \rho_g \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2}{8\delta_{жс-г} \cdot \cos\theta} \quad (4)$$

Для преодоления энергетического адгезионного барьера и обеспечения устойчивого налипания частиц пыли на каплю жидкости необходимо соблюдение условий удержания:

$$F_{ад} \geq F_l \quad (5)$$

где $F_{ад}$ — сила адгезии частицы пыли с каплей жидкости, Н; F_l — сила аэродинамического лобового сопротивления, действующего на частицу пыли, Н.

Критерий Эйлера при обтекании частицы пыли турбулентных потоков при числах Рейнольдса $1 < Re < 10^4$ определяется по формуле [12, 17, 22]:

$$Eu = \frac{48}{Re_{0n}} (1 + 0,15Re_{0n}^{0,687}), \quad (6)$$

где Re_{0n} — критерий Рейнольдса частицы пыли в момент контакта с каплей жидкости.

С учетом (6) и [11, 17] силу аэродинамического лобового сопротивления, стремящуюся преодолеть силу адгезии и отрывов гидрофобных частиц пыли от капель жидкости получим в виде:

$$F_n = \frac{3}{2} \left(1 + 0,15 Re_{0n}^{0,687}\right) \cdot \frac{\rho_n (V_{жс} - V_z)^2}{Re_{0n}} \cdot \pi \cdot d_n^2. \quad (7)$$

Величина энергии адгезии гидрофобной частицы пыли в момент захвата капли жидкости пропорциональна площади адгезии и определяется с учетом (2) по формуле:

$$\Pi_{ад\omega} = \left(\delta_{жс-z} - \frac{\pi^2}{32} \rho_z \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \right) \cdot \frac{\pi d_n^2}{2}. \quad (8)$$

Тогда поверхностную силу адгезии гидрофобной частицы пыли определим по формуле:

$$F_{ад\omega} = \pi d_n \left(\delta_{жс-z} - \frac{\pi^2}{32} \rho_z \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \right). \quad (9)$$

Полагая в уравнении (9) $\omega_{жс} = 0$ получаем выражение d_n критического диаметра частицы пыли при классической коагуляции [11, 17].

С учетом (5) и (7) получим уравнения для расчета критического диаметра гидрофобной частицы пыли при котором коэффициент ее захвата соответствует коэффициенту коагуляции, т.е. наступает необратимая ее фиксация и дальнейший их переход двухфазной системы в стабильное энергетическое состояние:

$$d_{n,кр\omega}^2 + \frac{48\rho_n \left(1 + 0,15 Re_{0n}^{0,687}\right) \cdot (V_{жс} - V_z)^2}{\pi \cdot \rho_z \cdot \omega_{жс}^2 \cdot Re_{0n}} \cdot d_{n,кр} - \frac{32\delta_{жс-z}}{\pi \cdot \rho_z \cdot \omega_{жс}^2} = 0. \quad (10)$$

Таким образом в условиях гидровихревой гетерокоагуляции критический диаметр частицы пыли, удерживаемой силами адгезии на поверхности капли жидкости в момент захвата определяем по формуле:

$$d_{n,кр\omega} = \sqrt[3]{\frac{16\delta_{жс-z}}{\pi \cdot \rho_z \cdot \omega_{жс}^2} + \sqrt{\frac{49\delta_{жс-z}^2}{\pi^2 \cdot \rho_z^2 \cdot \omega_{жс}^4} + \frac{682,7\rho_n^3 \left(1 + 0,15 Re_{0n}^{0,687}\right) \cdot (V_{жс} - V_z)^6}{\pi^3 \cdot \rho_z^3 \cdot \omega_{жс}^6 \cdot Re_{0n}^3}} + \sqrt[3]{\frac{16\delta_{жс-z}}{\pi \cdot \rho_z \cdot \omega_{жс}^2} - \sqrt{\frac{49\delta_{жс-z}^2}{\pi^2 \cdot \rho_z^2 \cdot \omega_{жс}^4} + \frac{682,7\rho_n^3 \left(1 + 0,15 Re_{0n}^{0,687}\right) \cdot (V_{жс} - V_z)^6}{\pi^3 \cdot \rho_z^3 \cdot \omega_{жс}^6 \cdot Re_{0n}^3}}}. \quad (11)$$

Из анализа (11) видно, что критическим диаметром необратимой фиксации частицы пыли на поверхности капли жидкости за счет силы адгезии при гидровихревой коагуляции можно управлять изменением скорости, соотношением поступательного и вращательного движения капель жидкости.

С учетом (11) формулу для расчета критического значения критерия Стокса, соответствующего улавливанию частиц пыли диаметром d_n при гидровихревой гетерокоагуляции на границе энергетического запрещающего барьера, получим в виде:

$$Stk_{n,кр\omega} = 0,27 \sqrt{\frac{d_n^2 \left(\delta_{жс-z} - \frac{\pi^2}{32} \rho_z \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \right) (\rho_n - \rho_z)}{\mu_z \cdot d_{жс}}} \quad (12)$$

Формулы для расчета пороговой величины критерия Стокса при гидровихревой коагуляции из условия достижения удерживающей силы адгезии на границе энергетического аэродинамического ограничения, определяется по формуле:

$$Stk_{ад.кр.ω} = 1,16 \cdot 10^{-2} \left(\delta_{ж-з} - \frac{\pi^2}{32} \rho_z \cdot d_n^3 \cdot \omega_{жс}^2 \right) \times \frac{Re_{0n} (\rho_n - \rho_z)}{\rho_z \cdot \mu_z \cdot d_{жс} \cdot (1 + 0,15 Re_{0n}^{0,687}) \cdot (V_{жс} - V_z)^2} \quad (13)$$

Из анализа уравнений (12) и (13) видно, что во всех диапазонах изменения числа Рейнольдса Re_{0n} в процессе гидровихревой гетерокоагуляции $Stk_{ад.кр.ω} < Stk_{п.кр.ω}$, что подтверждает практическую возможность уменьшения энергетической емкости гидровихревой гетерокоагуляции.

Более того в условиях гидровихревой гетерокоагуляции за счет изменения угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{ж}$ можно управлять запрещающим поверхностным адгезионным барьером, существенно снижая его.

Экспериментальные исследования

Механизм инерционного ортокинетического взаимодействия капель жидкости с частицами пыли в рассматриваемом нами механизме является определяющим фактором формирования математической модели эффективности гидрооборудования в факеле высоконапорнораспыляемой жидкости в то время как влиянием остальных механизмов взаимодействия можно пренебречь. Медленно протекающие гравитационные электростатические и диффузионные механизмы обеспыливания за время релаксации τ_n не успевают проявить себя в существенной мере, и не в состоянии обеспечить кинетическую энергию

контактного взаимодействия частиц пыли и капель жидкости, даже если частица достигает поверхности капли [5].

Количественные и качественные оценки достаточного соответствия предложенных взаимосвязей аэродинамических и физических параметров позволяют идентифицировать адекватность математической модели фактическому процессу гидровихревого пылеподавления [5, 11].

Критерий Стокса $Stk_{п.ω}$ можно рассмотреть, как основной определяющий критерий подобия для натурального эксперимента, с помощью которого результаты, полученные на физической модели, можно перенести на группу или класс подобных систем, что указывает на причинно-следственную адекватность теоретических положений, принятых при создании математической модели гидровихревого пылеподавления, физическим явлениям, реализуемым в натурном эксперименте [5, 11].

Анализ существующих представлений о свойствах дисперсных систем позволяет заключить, что эффективность пылеулавливания при гидровихревом пылеподавлении зависит в значительной степени от кинематических и динамических условий существования пылежидкостного аэрозоля. Это подтверждает основные теоретические положения о взаимосвязи физических и аэрогидродинамических факторов, действующих при гидровихревом пылеподавлении в факеле высоконапорнораспыляемой жидкости. Однако следует отметить, что подтверждение физической модели гидровихревой гетерокоагуляции пылевого аэрозоля диспергированной жидкостью носит в основном общий характер, поскольку для прямого и однозначного экспериментального определения каждого из сложных явлений взаимосвязи физико-химических и гидродинамических факторов в настоящее время на-

дежных методов и правил не существует.

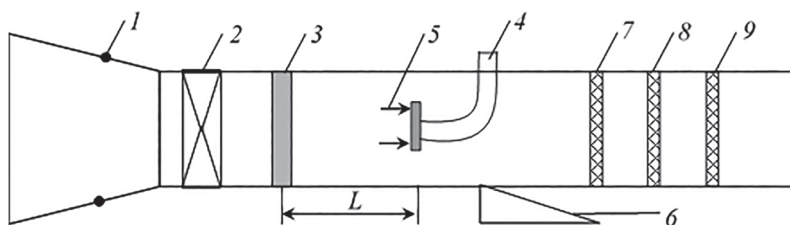
Для верификации построений математической модели была создана экспериментальная установка с возможностью моделирования гидровихревой гетерокоагуляции пылевых аэрозолей с различным дисперсным составом (рис. 1).

Расход и скорость подаваемого в установку вентилятором 2 воздуха определяется с помощью расходомера 1. В результате смешения подаваемого воздуха и пыли конкретного дисперсного состава в дозаторе 3 в область гидровихревых форсунок 5 расположим на расстоянии от него, достаточного для равномерного распределения по сечению установки, поступает аэрозольная смесь заданного дисперсного состава и концентрации. Подаваемая через аэратор 4 жидкость, проходя через гидровихревые форсунки 5 интенсивно смачивая пылевые частицы, обеспечивая переход их в бункер 6. Очищенный гидровихревыми форсунками воздух поступает на фильтры 7–9, обеспечивающие оседание на них пылевых частиц заданного номинального диаметра и дисперсии с учетом коэффициента проскока.

В частности, при проведении испытаний использовались фильтры, обеспе-

чивающие оседание частиц пыли диаметром соответственно больше: $5 \cdot 10^{-6}$ м; $2,5 \cdot 10^{-6}$ м; $5 \cdot 10^{-7}$ м. Кинематические параметры вращающихся капель жидкости и соответственно эффективность гидровихревой гетерокоагуляции регулировались сменными соплами гидровихревых форсунок. Расход воды и ее давление определялись датчиками расхода и напора жидкости. Концентрация частиц пыли соответствующих вышеуказанным диапазонам их диаметров определялась по массе оседаемой пыли на фильтрах за заданный промежуток времени и соответствующий этому расход воздуха.

Запрещающие энергетические барьеры определялись по критическим энергетическим параметрам подаваемой жидкости в условиях практически полного оседания частиц пыли на соответствующем фильтре, т.е. при условии отсутствия процесса поглощения частиц пыли заданного диапазона размеров каплями жидкости. Для повышения качества эксперимента, снижения погрешности получаемых результатов, испытания результатов производились по разностной схеме в течение одного промежутка времени. Последовательно проводилось два эксперимента при одинаковых исходных параметрах в условиях класси-



- 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 коэффициентами проскока

Рис. 1. Установка определения эффективности гидровихревой гетерокоагуляции о медианному диаметру частиц пыли

Fig. 1. An installation for determining the effectiveness of hydrovortex heterocoagulation according to the median diameter of dust particles

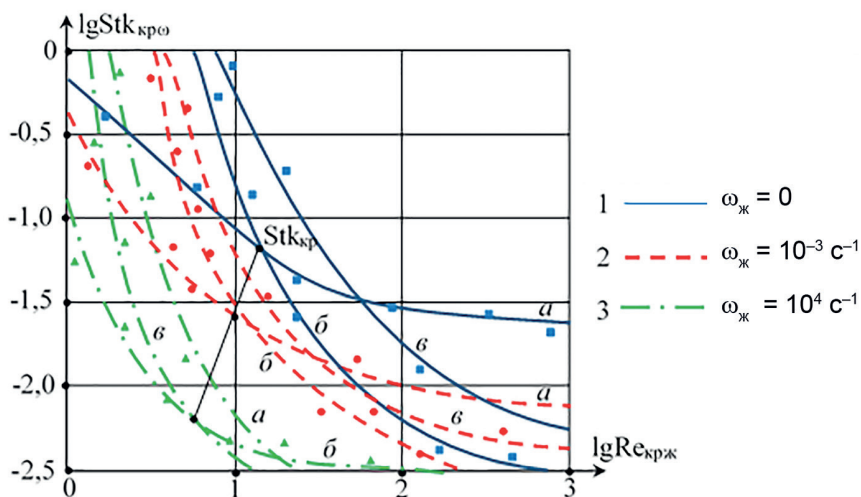


Рис. 2. Графики зависимости критерия Стокса от критерия Рейнольдса при различных значениях угловой скорости вращения капель жидкости: аэродинамический барьер (а); поверхностно-адгезионный барьер (б); барьер налипания (в)

Fig. 2. Suppressive energy levels of aerodynamic (a), surface adhesion (b) and coagulation (v) barriers and their critical values of Stokes number (Stk_{cr})

ческого и гидровихревого пылеподавления.

Анализ результатов исследований

На рис. 2 приведены данные расчета математической модели гидровихревого пылеулавливания.

Приведенные изолинии $\omega_{ж}$ подтверждают уменьшение значений критериев Стокса и Рейнольдса для достижения полного поглощения частиц пыли каплями жидкости, поскольку с ростом угловой скорости вращения капель жидкости, их эффективные значения, т.е. величины с учетом вращения капель жидкости, увеличиваются при фиксированной расходной скорости. Данные эксперимента и расчеты по формулам (12, 13) с надежностью 0,95, дают погрешность, не превышающую 9%.

Таким образом энергия налипания частиц пыли на каплю жидкости, неизбежно приводящая к полному ее поглощению при гидровихревом улавливании, достигает часто при меньшей энергии поступательного движения, т.е. меньшей

расходной скорости, это позволяет при угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_{ж} = 10^4 \text{ c}^{-1}$ снизить расход воды на 25%, повысив эффективность пылеулавливания.

Выводы

1. Управление скоростью вращения капель жидкости позволяет при фиксированной расходной скорости изменять основной инерционный критерий процесса коагуляции — критерий Стокса.

2. Увеличение угловой скорости вращения капель жидкости до 10^4 c^{-1} позволило снизить величину критериев Стокса и Рейнольдса, обеспечивающих минимально необходимую энергию поглощения в 8 и 2,5 раза соответственно по отношению к классической коагуляции.

3. Снижение порогового значения критерия Рейнольдса позволяет на 25% уменьшить потребность воды. При этом наиболее значимый результат заключается в повышении эффективности поглощения частиц пыли в диапазоне от

$2 \cdot 10^{-6}$ м до $5 \cdot 10^{-7}$ м, с 85% до 98%, поскольку именно частицы пыли с размерами менее $2 \cdot 10^{-6}$ м наиболее вредны для здоровья и взрывоопасны.

4. Из анализа уравнений (12) и (13) видно, что во всех диапазонах изменения

числа Рейнольдса $Re_{оп}$ в процессе гидровихревой гетерокоагуляции $Stk_{ад,кр.ω} < Stk_{п,кр.ω}$, что подтверждает практическую возможность уменьшения энергетической емкости гидровихревой гетерокоагуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцева О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 57. — С. 315–325.

2. Мохначук И. И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. — 2008. — № 2. — С. 21–26.

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

4. Коршунов Г. И., Корнев А. В., Ерзин А. Х., Сафина А. М. Исследование особенностей взаимодействия растворов поверхностно-активных веществ с угольной пылью // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 3. — С. 75–80.

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

6. Лебецки К. А., Романченко С. Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. — М.: Горное дело, 2012. — 463 с.

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

8. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Особенности процесса классификации в гидроциклонах при измельчении титаномagnetитовой руды // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 74–84. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84.

9. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades / ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1115/GT2016-57105.

10. Косарев Н. П., Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В., Лифанов А. В. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — Т. 18. — № 2. — С. 178–189. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7.

11. 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.

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

13. Liu X., Qian J., Wang E., Zhang Z. Study of integrated vortex ventilation and dust removal system in mechanized excavation face // Proceedings of the Institution of Mechanical En-

gineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021, vol. 235, no. 1, pp. 42–51. DOI: 10.1177/0954408920936795.

14. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control // Applied Sciences. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.

15. 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, vol. 24, no. 2, pp. 707–714. DOI: 10.24200/sci.2017.4055.

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

17. Косарев Н. П., Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Дылдин Г. П. Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 4(60). — С. 155–165. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4-155-165.

18. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces // High Temperature. 2015, vol. 53, no. 6, pp. 928–930. DOI: 10.7868/S0040364415050038.

19. Novakovskiy N. S., Bautin S. P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1D gas layer's // Journal of Physics: Conference Series. 2017, vol. 894, no. 1, article 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067.

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

21. Угольников А. В., Макаров Н. В. Применение систем автоматизации для контроля и учета показателей энергоэффективности эксплуатации компрессорного хозяйства горных предприятий // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245.

22. Tauger V., Valiev N., Volkov E., Simisinov D., Adas V. Remote-controlled robotic complex for underground mining // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 177, article 03006. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703006. **MIAB**

REFERENCES

1. Skopintseva O. V. Scientific substantiation of the integrated method of reducing the dust and gas hazards of mining sites of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. S7, pp. 315–325. [In Russ].

2. Mokhnachuk I. I. Security Issues in Coal Mining Enterprises. *Ugol'*. 2008, no. 2, pp. 21–26. [In Russ].

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

4. Korshunov G. I., Kornev A. V., Erzin A. K., Safina A. M. Investigation of the features of interaction of solutions of surfactants with coal dust. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 75–80. [In Russ].

5. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Y. A. Basics of hydrodusting. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2007, no. 10, pp. 1–24. [In Russ].

6. Lebetki K. A. Romanchenko S. B. *Pylevaya vzryvoopasnost' gornogo proizvodstva* [Dust explosion hazard of mining production], Moscow, Gornoye delo, 2012, 463 p.

7. Makarov V. N., Makarov N. V., Ugol'nikov A. V., Sverdlov I. V. Energy-efficient technology of technogenic accidents containment in mines based on a numerically simulated model of

hydro vortex coagulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 2, pp. 118–127. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-118-127.

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

9. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor by variation of splitter blades. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Seoul, 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1115/ GT2016-57105.

10. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugol'nikov A. V., Lifanov A. V. Effective localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoye delo*. 2018, vol. 18, no. 2, pp. 178–189. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7.

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

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

13. Liu X., Qian J., Wang E., Zhang Z. Study of integrated vortex ventilation and dust removal system in mechanized excavation face. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021, vol. 235, no. 1, pp. 42–51. DOI: 10.1177/0954408920936795.

14. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.

15. 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, vol. 24, no. 2, pp. 707–714. DOI: 10.24200/sci.2017.4055.

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

17. Kosarev N. P., Makarov V. N., Ugol'nikov A.V., Makarov N. V., Dyldin G. P. Mine aerology of dust aerosols under conditions of hydro-vortex coagulation. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 4(60), pp. 155–165. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4-155-165.

18. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces. *High Temperature*. 2015, vol. 53, no. 6, pp. 928–930. DOI: 10.7868/S0040364415050038.

19. Novakovskiy N. S., Bautin S. P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1D gas layer's. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 894, no. 1, article 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067.

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

21. Ugolnikov A. V., Makarov N. V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 236, pp. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245.

22. Tauger V., Valiev N., Volkov E., Simisinov D., Adas V. Remote-controlled robotic complex for underground mining. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 177, article 03006. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Макаров Владимир Николаевич*¹ — д-р техн. наук, профессор,

e-mail: uk.intelnedra@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

*Угольников Александр Владимирович*¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,

e-mail: ugolnikov@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8442-4841,

*Макаров Николай Владимирович*¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,

e-mail: mnikolay84@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,

Филатов Александр Михайлович — начальник горного цеха, АО «Северский гранитный карьер».

¹ Уральский государственный горный университет.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.N. Makarov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: uk.intelnedra@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,

*A.V. Ugolnikov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,

e-mail: ugolnikov@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8442-4841,

*N.V. Makarov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,

e-mail: mnikolay84@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7039-6272,

A.M. Filatov, Head of Mining Department, JSC Severky Granite Quarry,

620920, Severka, Ekaterinburg, Russia,

¹ Ural State Mining University,

620144, Ekaterinburg, Russia.

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

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

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

