

УДК 622.276:622.814:622.793.1

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

## ЭФФЕКТИВНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОВИХРЕВОЙ КОАГУЛЯЦИИ

Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, А.В. Лифанов<sup>1</sup>

Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

<sup>1</sup>Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш» (142103, Россия, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 2д)

## EFFECTIVE LOCALIZATION OF COAL DUST EXPLOSIONS USING HYDRO VORTEX COAGULATION

Nikolay P. Kosarev, Vladimir N. Makarov, Nikolay V. Makarov, Aleksandr V. Ugolnikov, Aleksandr V. Lifanov<sup>1</sup>

Ural State University of Mining (30 Kuibysheva st., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation)

<sup>1</sup>OilGazMash Research and Production Complex LLC (2d Zheleznodorozhnaya st., Podolsk, 142103, Russian Federation)

Получена / Received: 25.07.2018. Принята / Accepted: 24.10.2018. Опубликовано / Published: 30.11.2018

### Ключевые слова:

экотехнология, пылеподавление, гетерокоагуляция, гидрофобность, циркуляция, угол смачивания, адгезия, энергия поглощения, присоединенный вихрь, медиальный размер, ортокINETИКА, коэффициент захвата, коэффициент поглощения, энергетический барьер налипания, сила депрессии.

Статья посвящена разработке математической модели высоконапорного гидровихревого инерционного кинематического пылеподавления, применение которого позволяет существенно повысить эффективность локализации техногенных аварий и снизить уровень профессиональных легочных заболеваний. Динамика совершенствования техники и технологии пылеподавления в горно-металлургическом комплексе России показывает их недостаточную эффективность в обеспечении санитарно-гигиенических условий, а главное локализации взрывов пылевых смесей. Дальнейшее повышение эффективности угледобычи и переработки минерального сырья существенно ограничено несовершенством технологии локализации и ликвидации взрывов угольной пыли. На базе теории присоединенных вихрей разработан метод гидровихревого высоконапорного обеспыливания. Предложена математическая модель гидровихревой инерционной, кинематической гетерокоагуляции, существенно повышающей энергоэффективность пылеподавления. Уточнена графическая модель взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «жидкое – твердое», получены уравнения критериев Стокса и Рейнольдса при гидровихревой инерционной ортокINETИЧЕСКОЙ гетерокоагуляции. Получено уравнение для расчета величины снижения потребной энергии полного поглощения частиц пыли в функции от циркуляции капель жидкости. Получены уравнения для расчета эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Показано, что гидровихревая коагуляция существенно снижает размер диспергированного состава пыли, расход воды, повышая эффективность пылеподавления. Существенное снижение размера поглощаемых частиц пыли повышает эффективность локализации взрывов угольной пыли, снижает заболеваемость силикозом и антракозом. Сертификационные испытания с применением защищенных патентом вихревых форсунок подтвердили снижение минимального размера поглощаемой пыли в четыре раза, повышение эффективности пылеулавливания до 99 % при одновременном снижении расхода воды на 20 % по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием. Предложенная технология пылеподавления может быть использована на горных предприятиях в условиях образования мелкодисперсных взрывоопасных пылевых смесей.

### Key words:

ecotechnology, dust suppression, heterocoagulation, hydrophobicity, circulation, wetting angle, adhesion, absorption energy, attached vortex, medial size, orthokinetics, capture coefficient, absorption coefficient, sticking energy barrier, depression force.

The paper is devoted to the development of a mathematical model for high-pressure hydro vortex inertial kinematic dust suppression. The suppression can significantly improve the efficiency of localization of man-made accidents and reduce the level of occupational pulmonary diseases. The dynamics of improving the technology and technical means of dust suppression in the mining and metallurgical complex of Russia shows their lack of effectiveness in ensuring sanitary conditions, especially in localization of dust mixture explosions. A further increase in the efficiency of coal mining and mineral processing is significantly limited by the imperfection of the technology for localizing and eliminating explosions of coal dust. The method of high-pressure hydro vortex dedusting is developed based on the theory of attached vortices. A mathematical model of hydro vortex inertial, kinematic heterocoagulation, which significantly increases the energy efficiency of dust suppression, is proposed. The graphical model of the interaction in the contact zone at the time of the collision in the liquid-solid system is refined. Stokes and Reynolds criteria equations are obtained with hydro vortex inertial orthokinetic heterocoagulation. An equation is obtained which allows to calculate the magnitude of the reduction in the required energy of the total absorption of dust particles as a function of the circulation of liquid droplets. Equations for calculation of effective wetting angle and the minimum diameter of absorbed dust particles are obtained as a function of the angular velocity of rotation of liquid droplets. It is shown that hydro vortex coagulation significantly reduces the size of the dispersed dust composition, water consumption, increasing the efficiency of dust suppression. A significant decrease in the size of the absorbed dust particles increases the efficiency of localization of coal dust explosions, reduces the incidence of silicosis and anthracosis. Certification tests using patent-protected vortex nozzles confirmed that there was a reduction in the minimum size of absorbed dust in four times, increase in dust collection efficiency of up to 99 %, reduce in water consumption by 20 % compared to classic high-pressure spray cleaning. The proposed technology of dust suppression can be used in mining companies when fine explosive dust mixtures are formed.

Косарев Николай Петрович – доктор технических наук, профессор (тел.: +007 343 295 13 05, e-mail: ursmu@bk.ru).

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики (тел.: +007 343 295 04 48, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горной механики (тел.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Контактное лицо для переписки

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники (тел.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Лифанов Александр Викторович – генеральный директор (тел.: +007 495 505 66 97, e-mail: info@oilgazmash.ru).

Nikolay P. Kosarev (Author ID in Scopus – 6602443934) – Doctor of Engineering, Professor (tel.: +007 343 295 13 05, e-mail: ursmu@bk.ru).

Vladimir N. Makarov (Author ID in Scopus – 56682510900) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mining Mechanics (tel.: +007 343 295 04 48, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com).

Nikolay V. Makarov (Author ID in Scopus – 57196121902) – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mining Mechanics (tel.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru). The contact person for correspondence.

Aleksandr V. Ugolnikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering (tel.: +007 343 257 45 42, e-mail: mnikolay84@mail.ru).

Aleksandr V. Lifanov – Chief Executive Officer (tel.: +007 495 505 66 97, e-mail: info@oilgazmash.ru).

## Введение

Задача очистки воздуха на горных предприятиях весьма актуальна с позиции роста производительности труда, обеспечения санитарно-гигиенических норм, ограничивающих допустимые концентрации вредных взрывоопасных газов и аэрозолей. Практика показывает, что интенсификация производства, внедрение новых технологий, обеспечивающих эффективную добычу и переработку минерального сырья, сдерживает несовершенство технологий локализации взрывов угольной пыли.

Угледобыча в условиях постоянного увеличения глубины горных работ сопровождается ростом негативных техногенных и природных процессов: газовая, пылевая, эндогенная пожарная опасности, внезапные выбросы угля и газа. Кроме того, устойчивая корреляция причинно-следственных связей вышеуказанных процессов приводит к тому, что устранение одних опасных явлений сопряжено с ростом других не менее катастрофичных процессов в угольных шахтах [1–4].

Дегазация угольных пластов и управление газовыделением, имеющие целью предотвратить опасность загазирования выработок, повышают эндогенную пожароопасность и увеличивают пылеобразующую способность угля. Предварительное физико-механическое воздействие на пласт при дегазации повышает склонность угля к самовозгоранию. Управление газовыделением с помощью дренажных штреков и отсоса метановоздушной смеси из выработанного пространства ведет к усилению проветривания выработанного пространства и интенсификации окислительных процессов, являющихся причиной самовозгорания угля [5–9].

Причинами образования взрывоопасной пылевоздушной среды является высокая твердость и хрупкость горных пород, приводящие к интенсивному пылеобразованию при отделении горных пород от массива и их транспортировании. Взрывы газа и пыли существенно различаются, однако взрывчатые свойства газов и пыли имеют много общего, что делает возможным разработку комплексных методов снижения газовой и пылевой опасностей выемочных участков угольных шахт [3, 10–13].

В современных условиях борьба со взрывами пылевоздушных смесей осуществляется по следующим основным направлениям:

предотвращение образования пыли и газовыделений; недопущение опасных концентраций газа и пыли в рудничной атмосфере; исключение возникновения теплового импульса; локализация взрывов; защита персонала при взрыве [14–17].

Для устранения взрывоопасных концентраций используют диверсифицированные способы уменьшения выхода взрывоопасных примесей при разрушении массива, удаления их с рабочих мест, нейтрализацию и пылеподавление [18–22].

В угольных шахтах пылеобразование обусловлено технологическими особенностями ведения горных работ, применением системы разработки, предполагающей интенсивное обнажение угольного пласта на всей площади отработки. Кроме того, угольная пыль обладает высокой витаемостью, низкой смачиваемостью, а интенсивное проветривание вызывает захват большого количества пыли турбулентным воздушным потоком. При этом рост энерговооруженности с механическим отделением и дроблением горных пород и угля непосредственно в активно проветриваемом рабочем пространстве горных выработок приводит к непрерывному интенсивному запылению атмосферы горных выработок на всем их протяжении.

С учетом вышеизложенного снижение взрывоопасности в шахтах должно осуществляться по следующим основным взаимосвязанным направлениям:

– изменение свойств и состояния продуктивной толщи, особенно разрабатываемого пласта или залежи, с целью уменьшения отрицательных их проявлений, т.е. подготовка месторождения к безопасной разработке;

– проведение технических мероприятий в шахте по пылеподавлению.

Опыт показывает, что пассивные заслоны как громоздкие стационарные сооружения не способны локализовать взрыв в выработках с многочисленными и относительно подвижными потенциальными источниками воспламенения из-за сложности в производственных условиях постоянно поддерживать допустимые расстояния их установки [22–25].

Автоматические системы, в отличие от пассивных заслонов, снабжаются независимым от внешних условий источником энергии, служащим для принудительного диспергирования и подачи в зону воспламенения ингибиторного вещества по сигналу датчика. Гашение пламени взрыва осуществляется

значительно меньшим количеством гасящего вещества по сравнению с пассивными заслонами. Устройства имеют небольшие габариты и массу, что позволяет сравнительно легко их перемещать по выработке по мере развития горных работ, не загромождая свободное пространство горной выработки, оставляя место для горно-шахтного оборудования различного назначения [22].

Указанное подтверждает необходимость комплексного подхода к безопасности в угольных шахтах. На передовых угольных шахтах России очистные забои оборудованы современной выемочной техникой, обеспечивающей нагрузку до 25 тыс. т в сутки. Однако высокая запыленность выработок, обильное метановыделение из отрабатываемых высокогазоносных пластов угля и высокая запыленность сдерживают интенсификацию угледобычи, что существенно снижает экономическую эффективность и конкурентоспособность предприятий подземной угледобычи [1, 3, 25, 26].

Травматизм от взрывов пыли на угольных шахтах с тяжелыми последствиями составляет более 10 %. Это определяет особую социальную значимость предупреждения и локализации взрывов пылевоздушных смесей в шахтах и защиты персонала. Мероприятия обеспечения пылевого режима в шахтах основаны на недопущении взрывоопасных скоплений пыли и предотвращении появления источника высокой температуры, способного воспламенить пылевые аэрозоли [2, 27].

Кроме того, пыль негативно влияет на организм человека, вызывая заболевания легких: силикоз – при воздействии породной пыли, антракоз – при воздействии угольной пыли. Особенно активно действуют на легкие человека частицы пыли размером  $(1...6)10^{-6}$  м.

Наибольшую актуальность проблема взрыва пылегазовых смесей представляет для газообильных угольных шахт, и в первую очередь для подготовительных забоев, в которых происходит более половины аварий.

На шахтах с высокой газообильностью и выбросами горных пород и газа успешная борьба с образованием взрывоопасной пылегазовой среды возможна только на основе рационального сочетания пылеподавления и дегазации.

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

Мероприятия по борьбе с угольной пылью можно объединить в следующие основные группы: предупреждение или снижение пылеобразования, вентиляция, пылеулавливание, пылеподавление.

Одним из эффективных методов предотвращения пылеобразования является предварительное увлажнение угольного массива. Сущность предварительного увлажнения заключается в том, что нагнетаемая в пласт под давлением жидкость приводит к увеличению влажности угля, вызывающему образование из пылинок, находящихся в трещинах, агрегатов, которые при поступлении в воздух быстро осаждаются [10, 17, 18, 20].

Вентиляция предусматривает вынос пыли из забоя и разжижение пылевого аэрозоля поступающим свежим воздухом с ограничением скорости движения воздуха по пылевому фактору: в подготовительных выработках – 0,4–0,7 м/с; в очистных забоях – 1–3 м/с [1].

Пылеулавливание заключается в аккумулировании пылевоздушной смеси в специальном бункере за счет создания отрицательной депрессии, воздействию на нее тонкодиспергированной жидкости и осаждении ее в виде шлама [24].

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 [11, 15, 18, 20].

Для повышения эффективности пылеподавления используют химическую пену, которая растекается по поверхности горной массы, смешивается с ней, предотвращая переход пыли во взвешенное состояние. Пена создает большую поверхность взаимодействия жидкости с горной массой и способствует эффективному подавлению тонких фракций пыли и экранированию очагов пылеобразования [19].

Таким образом, комплексный подход к обеспечению безопасности в угольных шахтах с учетом взаимообусловленности негативных явлений может обеспечить рост экономической эффективности и конкурентоспособности угольных предприятий.

В условиях роста интенсификации угледобычи, высокой энерговооруженности снижение опасности взрыва пыли может быть обеспечено только при полной автоматизации

всех процессов комплексного пылеподавления и пылевзрывозащиты:

– система мониторинга интенсивности накопления пыли и пылевзрывобезопасности горных выработок, аналогичная системе газового контроля;

– автоматические системы пылеподавления, гидрообеспыливания, функционально связанные с системой мониторинга интенсивности накопления пыли.

Совершенствование системы локализации вероятных взрывов угольной пыли – составная часть проблемы пылевзрывозащиты шахт, решение которой – одна из важнейших задач в области техники безопасности и охраны труда на ближайшие годы [1, 3, 22].

### **Методология исследований.**

#### **Описание научной идеи**

Эффект пылеподавления в существенной мере сводится к преодолению энергетического барьера в процессе столкновения капель жидкости с частицами пыли и переводу системы «твердое – жидкое» в более устойчивое состояние, т.е. определяется степенью коагуляции и способностью капель жидкости захватывать частицы пыли.

Как показано выше, гидрообеспыливание является одним из наиболее распространенных средств предотвращения взрывов пылевых смесей, обеспечения санитарно-гигиенических условий в технологиях горного производства [20, 25, 28, 29, 30].

Однако при высоконапорном гидрообеспыливанием существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий и, как результат, приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в недропользовании [30].

Актуальность совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания, внедрения экологического недропользования требует нового подхода к построению математической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции воднопылевого аэрозоля [31–34].

Определяющую роль в увеличении эффективности коагуляционного взаимодействия капель воды и частиц пыли играет именно кинетическая энергия движения капель распыляемой воды, а не общий ее расход. Для низконапорного распыления жидкости влияние начального участка факела на общую эффективность коагуляции не столь существенно

из-за малой кинетической энергии диспергируемой струи.

Динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости при высоконапорном гидрообеспыливанием играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды.

Поскольку пылеподавление фактически возможно только при непосредственном контакте капли жидкости с частицей пыли, то механизм именно этого процесса необходимо изучить с тем, чтобы разработать технологию и соответствующие технические средства, обеспечивающие наибольшие комфортные условия для его эффективного осуществления.

Технически коагуляция представляет собой результат столкновения двух фаз: жидкой и твердой. Соударение происходит при контакте капли жидкости и частицы пыли, при этом сам факт коагуляции, т.е. поглощения пыли жидкостью, может и не наступить, поскольку для окончательного захвата и перехода в единую систему «капля жидкости – частица пыли» необходимо, чтобы силы инерции частиц пыли были больше сил адгезии и смачивания [30, 35].

Степень взаимного проникновения двух фаз, особенно применительно к частицам микроразмера, соответствующим гидрофобности, т.е. эффективность коагуляции, зависит от характера протекания поверхностных явлений в зоне их контакта, обусловленного влиянием относительной скорости капли воды и частицы пыли, их размера, поверхностного натяжения на границе раздела. Экспериментально установлено [30], что частицы пыли диаметром менее  $5 \cdot 10^{-6}$  м практически гидрофобны. При этом в структуре угольной пыли преобладают частицы размером  $(1...200)10^{-6}$  м.

Таким образом, значительная часть наиболее взрывоопасной пыли гидрофобна, что существенно снижает эффективность систем высоконапорного гидродинамического пылеподавления [30].

Целью моделирования параметров системы «капля жидкости – частица пыли» в процессе предлагаемой вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции является исследование механизма кинематической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости [30, 36–38].

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  $W_k$  взаимодействия в процессе их контакта. Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда ее кинетическая энергия  $W_k$  будет больше или равна энергии поглощения  $W_{ж-г}$ , соответствующей сумме энергии адгезии  $W_{ад}$  ( $F_{ад}$  – сила адгезии), определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания  $W_{ж-г}$  ( $F_{ж-г}$  – сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [30].

### Математическое обоснование научной идеи

С учетом изложенного условия, выразив массу частицы пыли, принимая ее в форме шара, через диаметр  $d_{п\ min}$ , м, выражение для минимального диаметра частицы пыли, поглощаемой каплей жидкости, получим в виде

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

где  $\delta_{ж-г}$  – 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;  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{г}$  – плотность

частицы пыли и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{ж}$ ,  $V_{г} = V_{п}$  – скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы пыли, м/с.

На базе известной модели кинетической коагуляции частицы пыли каплей жидкости при  $\omega_{ж} = 0$  [1] на рис. 1 представлена графическая модель вихревой кинематической коагуляции, при которой капля жидкости вращается с угловой скоростью  $\omega_{ж}$ , индуцируя в зоне контакта присоединенный вихрь [30, 37, 39].

Из анализа графической модели взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «твердое – жидкое», приведенной на рис. 1, видно, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, определяемая диаметром периметра смачивания  $d_{см}$ , 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  $\theta$  и, следовательно, тем больше потребуются затраты энергии для полного поглощения частицы пыли диаметром  $d_{п\ min}$  каплей жидкости диаметром  $d_{ж}$ , определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

В данной работе рассмотрен механизм целенаправленного управления краевым углом смачивания  $\theta$  и кинетической энергией взаимодействия капель жидкости и частиц пыли  $W_k$ .

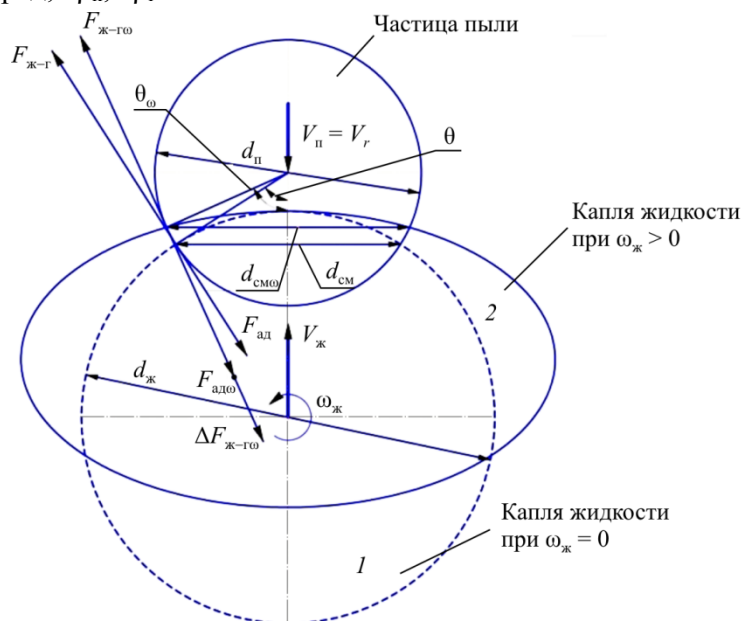


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли и капли жидкости: 1 – модель классической инерционной ортокинетической гетерокоагуляции, т.е. при  $\omega_{ж} = 0$ ; 2 – вихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция,  $\omega_{ж} > 0$

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $\omega_{ж}$  – угловая скорость вращения капли жидкости относительно скорости  $V_{ж}$ ;  $F_{ж-г}$ ,  $F_{ж-г\omega}$ ,  $\Delta F_{ж-г\omega}$  – сила поверхностного натяжения при  $\omega_{ж} = 0$ ,  $\omega_{ж} > 0$  и сила депрессии в зоне контакта, обусловленная вращением капли жидкости соответственно;  $F_{ад}$ ,  $F_{ад\omega}$  – сила адгезии при  $\omega_{ж} = 0$ , при  $\omega_{ж} > 0$  соответственно;  $d_{п}$ ,  $d_{ж}$  – диаметр частицы пыли и капли жидкости соответственно;  $d_{см}$ ,  $d_{см\omega}$  – диаметр периметра смачивания при  $\omega_{ж} = 0$ , при  $\omega_{ж} > 0$  соответственно;  $\theta$ ,  $\theta_{\omega}$  – краевой угол смачивания при  $\omega_{ж} = 0$ , при  $\omega_{ж} > 0$  соответственно;  $V_{ж}$ ,  $V_{г}$ ,  $V_{п}$  – скорость капли жидкости, газа и частицы пыли соответственно.

Однако сам по себе размер капли не является решающим условием, так как при одинаковых объемах две капли могут иметь разные формы, определяемые, в частности, скоростью вращения  $\omega_{ж}$  и, соответственно, диаметром периметра смачивания  $d_{см}$  при  $\omega_{ж} = 0$  и  $d_{см\omega}$  при  $\omega_{ж} > 0$ .

С ростом краевого угла смачивания  $\theta$  величина энергии поглощения снижается, что позволяет обеспечить заданный уровень эффективности обеспыливания при меньших энергозатратах либо расширить диапазон поглощения частиц пыли меньшего размера, т.е. повысить эффективность пылеподавления при заданных энергозатратах.

Из рис. 1 видно, что при соударении частицы пыли с вращающейся со скоростью  $\omega_{ж}$  каплей жидкости диаметр периметра смачивания увеличивается до величины  $d_{см\omega}$  по сравнению с его величиной  $d_{см}$  при  $\omega_{ж} = 0$ , т.е. при классической гетерокоагуляции.

Чем больше значение краевого угла смачивания  $\theta$ , тем меньше требуемая для поглощения частицы пыли кинетическая энергия капли жидкости, т.е. чем больше площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, тем меньшую скорость необходимо сообщать каплям жидкости для обеспечения эффективного пылеподавления.

Таким образом, для снижения энергоемкости высоконапорного гидродинамического пылеподавления необходимо изменить кинематику взаимодействия капли жидкости и частиц пыли в зоне контакта. С учетом вышеизложенного это возможно за счет влияния энергии вихря, обусловленной вращением капли жидкости со скоростью  $\omega_{ж}$  вокруг ее оси, совпадающей с вектором скорости  $V_{ж}$  [30, 36, 37].

В работе [30] 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.

Таким образом, для снижения энергоемкости высоконапорного гидродинамического пылеподавления необходимо изменить кинематику взаимодействия капли жидкости и частиц пыли в зоне контакта. С учетом изложенного выше это возможно за счет влияния энергии вихря, обусловленной вращением капли жидкости со скоростью  $\omega_{ж}$  вокруг ее оси, совпадающей с вектором скорости  $V_{ж}$ .

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.

При вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_{ж}$  вокруг ее поверхности и в зоне контакта согласно условию Гельмгольца – Бернулли создается область разрежения, т.е. пониженного статического давления на величину удельной энергии  $\Delta W_{к}$  присоединенного вихря, скорость которого согласно гидродинамической аналогии определяется по известной в теории электродинамике формуле Био-Саварра. Таким образом, присоединенный вихрь, обусловленный вращением капли жидкости, снижая статическое давление в зоне ее контакта с частицей пыли, увеличивает краевой угол смачивания до величины  $\theta_{ж}$ , способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [30, 36, 37].

В зоне контакта частица пыли будет двигаться по винтовой линии с углом спирали

$$\alpha = \arctg \frac{d_{п} \sin \theta_{\omega_{ж}}}{(V_{ж} - V_{г})}$$

поступательной скоростью  $(V_{ж} - V_{г})$ , вращаясь при этом с угловой скоростью  $\omega_{ж}$  [37].

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 [30]

$$\text{Re}_{\text{ж}\omega} = \frac{d_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta}}{\mu_{\text{г}}};$$

$$\text{Stk}_{\omega} = \frac{d_{\text{п}}^2 (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}) \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_{\text{п}})^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta}}{18 \mu_{\text{г}} d_{\text{ж}}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{ж}}$  – диаметр капли жидкости, м;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность капли жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{г}}$  – коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

Таким образом, вращательное движение капли жидкости увеличивает фактическое эффективное значение критериев Стокса  $\text{Stk}_{\omega}$  и Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{ж}\omega}$  в зоне контакта, способствуя снижению величины поверхностно-адгезионного энергетического барьера и критического уровня аэродинамического энергетического барьера [30].

Силу давления разрежения в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленную влиянием присоединенного вихря и равную снижению силы поверхностного натяжения, можно выразить уравнением

$$\Delta F_{\text{ж-г}\omega} = \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} \Gamma_{\omega} \omega_{\text{ж}} S_{\text{к}} S_{\text{п}}^{-1}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_{\omega}$  – циркуляция в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $S_{\text{к}}$  – площадь контакта, соответствующая площади смачивания, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{п}}$  – площадь поверхности частицы пыли, м<sup>2</sup>.

Уравнение для дополнительной кинетической энергии, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капле жидкости, с учетом (3) и рис. 1, уравнений Бернулли и Остроградского – Гаусса [36, 37] получим в виде

$$\Delta W_{\text{к}\omega} = \frac{\pi}{8} \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^3 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2. \quad (4)$$

Уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленной влиянием присоединенного вихря, с учетом (3), (4) получим в виде

$$\Delta F_{\text{ж-г}\omega} = \frac{\pi^2}{32} \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^4 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2. \quad (5)$$

Для вихревой инерционной ортокинетики гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения с учетом уравнений (4) по аналогии с гетерокоагуляцией при  $\omega_{\text{ж}} = 0$  запишем в виде

$$\Pi_{\text{ж-г}\omega} = \Pi_{\text{ж-г}} - \Delta W_{\text{к}\omega} = 2\delta_{\text{ж-г}} \cos \theta_{\omega}. \quad (6)$$

С учетом уравнений (4), (6) уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фаз при вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_{\text{ж}}$  получим в виде:

$$\theta_{\omega} = \arccos \left( \cos \theta - \frac{\pi \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^3 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta} \right). \quad (7)$$

Таким образом, с учетом (1), (7), предложенной модели инерционной ортокинетики гетерокоагуляции системы «частица пыли – капля жидкости» при вращении частицы жидкости с угловой скоростью  $\omega_{\text{ж}}$  минимальный диаметр  $d_{\text{п}\omega \text{ min}}$  частицы пыли, полностью поглощаемой в процессе захвата и смачивания каплями жидкости при действии сил поверхностного натяжения, инерционных сил поступательного и вращательного движения, получим в виде

$$d_{\text{п}\omega \text{ min}} = \frac{\delta_{\text{ж-г}} \cos \arccos \left( \cos \theta - \frac{\pi \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^3 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta} \right)}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}) (V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2}. \quad (8)$$

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета по предложенной математической модели вихревой кинематической коагуляции изменения критических значений критерия Стокса  $\text{Stk}_{\text{кр}}$  в зависимости от угловой скорости вращения капель воды  $\omega_{\text{ж}}$  диаметром  $d_{\text{ж}} = 4 \cdot 10^{-6}$  м и зависимости минимального диаметра  $d_{\text{п}\omega \text{ min}}$  частицы пыли, полностью поглощаемой в процессе захвата и смачивания каплями жидкости, и изменения критерия Стокса  $\text{Stk}$  при фиксированном эффективном критическом значении критерия Стокса  $\text{Stk}_{\text{окр}} = 4,1 \cdot 10^{-2}$  для абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли.

Приведенные на рис. 2 изолинии угловой скорости вращения капель жидкости в функции от критических значений критериев Стокса и Рейнольдса подтверждают существенное снижение как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

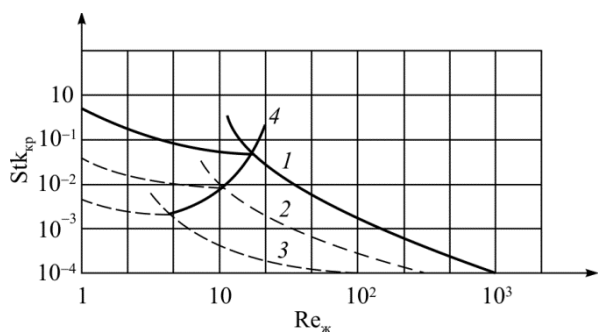


Рис. 2. Изолинии угловой скорости вращения капли воды в функции от критических значений критериев Стокса и Рейнольдса: 1 –  $\omega_{ж} = 0$ ,  $Stk_{кр} = 4,1 \cdot 10^{-2}$ ,  $Re_{ж} = 20$ ,  $d_{п\ min} = 4 \cdot 10^{-6}$  м; 2 –  $\omega_{ж} = 1,5 \cdot 10^2$  с $^{-1}$ ,  $Stk_{кр} = 8 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{ж} = 15$ ,  $d_{п\ min} = 3 \cdot 10^{-6}$  м; 3 –  $\omega_{ж} = 2,5 \cdot 10^2$  с $^{-1}$ ,  $Stk_{кр} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{ж} = 6$ ,  $d_{п\ min} = 1,2 \cdot 10^{-6}$  м; 4 – зависимость критического значения критерия Стокса от угловой скорости вращения капли

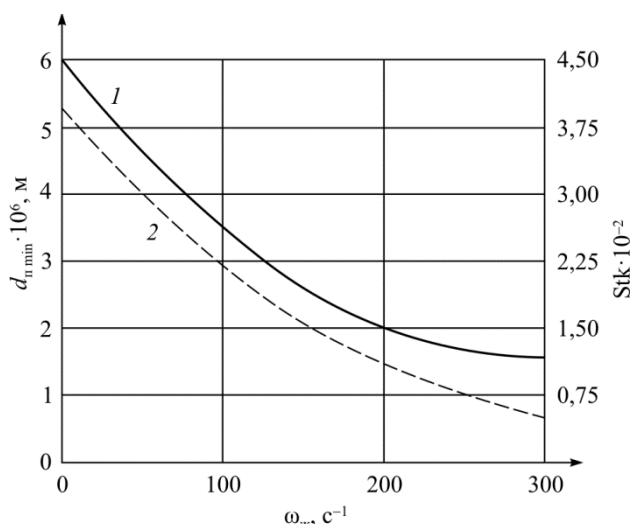


Рис. 3. Зависимость  $d_{п\ \omega\ min}$  (1) и  $Stk$  (2) от изменения угловой скорости вращения капли жидкости  $\omega_{ж}$  при  $Stk_{окр} = 4,1 \cdot 10^{-2}$

При угловой скорости вращения капель жидкости  $\omega_{ж} = 2,5 \cdot 10^2$  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  $\omega_{ж} = 0$ . При этом эффективные значения критерия Рейнольдса и Стокса, рассчитанные по формуле (2) на линии 4 (см. рис. 2), соответствуют их критическим значениям полного поглощения при  $\omega_{ж} = 0$ , т.е. по известным критериальным уравнениям.

Снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено, как показано выше (3), увеличением значений критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{ж\omega}$ , при

вращении капли жидкости по сравнению с их значениями  $Stk$ ,  $Re_{ж}$ , рассчитанными без учета вращения капли жидкости, т.е. при  $\omega_{ж} = 0$ .

Из анализа рис. 3 видно, что по мере снижения диаметра частиц диспергированной пыли постоянство критического эффективного значения критерия Стокса  $Stk_{окр} = 4,1 \cdot 10^{-2}$  достигается кинематически за счет вращательного движения капли жидкости согласно уравнению (1), обеспечивая тем самым полное поглощение частиц пыли меньшего диаметра по сравнению с классической гетерокоагуляцией.

При угловой скорости вращения капель жидкости  $\omega_{ж} = 3 \cdot 10^2$  с $^{-1}$  значения  $Stk$  снижаются более чем в четыре раза по сравнению с их критическими значениями, обеспечивающими полное поглощение частиц пыли в условиях поступательного движения капель жидкости, т.е. при  $\omega_{ж} = 0$ . При этом эффективные значения критерия Стокса, рассчитанные по формуле (1), соответствуют их критическим значениям полного поглощения при  $\omega_{ж} = 0$ , т.е. полученным по известным критериальным уравнениям [6].

Снижение величины критерия Рейнольдса для капель жидкости при гидровихревом высоконапорном гидрообеспыливанием соответствует уменьшению скорости поступательного движения капли жидкости  $V_{ж}$ , т.е. уменьшению расхода воды, при этом повышается ресурсоэффективность 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  $\eta_k$  при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т.е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости либо меньших размерах частицы пыли. На рис. 3 приведены результаты расчета по предложенной математической модели гидровихревой кинематической гетерокоагуляции, рассчитанной по формуле (1) в зависимости от угловой скорости вращения капель воды  $\omega_{ж}$ .

Проведенные экспериментальные исследования с достаточной для инженерного расчета точностью подтвердили результаты расчетов по предложенной математической модели, показали высокую эффективность вихревой инерционной ортокинетической



гетерокоагуляции, позволившей на 20 % снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли до  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м, повысить эффективность пылеподавления до 99 % в сравнении с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

### Выводы

1. Вращение капли жидкости снижает раскливающее действие газовой среды на границе «твердое – жидкое», т.е. снижает величину потребной энергии полного поглощения  $P_{ж-г}$ , увеличивает поверхность смачивания и фактическое эффективное значение критериев Стокса  $Stk_0$  и Рейнольдса  $Re_{ж0}$ .

2. Вихревое высоконапорное гидрообеспыливание способствует увеличению угла смачивания, уменьшению запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

3. Вихревая кинематическая коагуляция позволяет на 20 % снизить расход воды, повысив эффективность пылеподавления до 99 % за счет снижения медиального размера частиц пыли по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

4. Вихревое высоконапорное гидрообеспыливание позволяет уменьшить минимальный размер поглощаемой гидрофобной угольной пыли до  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м, тем самым существенно снизить вероятность взрывов аэрозольных пылевых смесей, обеспечить нормативные требования предельно допустимых концентраций по запыленности воздуха.

5. Взрывы газа и пыли существенно различаются, однако их взрывчатые свойства имеют много общего (близка по величине температура воспламенения, имеются нижний и верхний пределы взрываемости и др.), что делает возможным разработку комплексных методов снижения газовой и пылевой опасностей выемочных участков угольных шахт.

### Библиографический список

1. Скопинцева О.В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – С. 315–325.
2. Левкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. – Макеевка: МакНИИ, 2002. – 392 с.
3. Мохначук И.И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. – 2008. – № 2. – С. 21–26.
4. Reed W.R., Organiscak J.A. Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck / Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28 – March 2, Salt Lake City, Utah, 2005. – P. 147–153
5. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271 с.
6. Метан / Ф.А. Алексеев, Г.И. Войтов, В.С. Лебедев [и др.]. – М.: Недра, 1978. – 310 с.
7. Васючков Ю.Ф. Физико-химические способы дегазации угольных пластов. – М.: Недра, 1986. – 255 с.
8. Сластунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 1996. – 273 с.
9. Handbook for dust control in mining / Ed. F.N. Kissell; Pittsburgh Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication № 2003. – 132 p.
10. Скопинцева О.В. Исследование взаимодействий в системе «уголь – жидкость – газ» при увлажнении угольного массива // Аэрология: сб. научн. тр. по материалам симп. «Неделя горняка – 2009». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2009. – № 0В 13. – С.212–221.
11. Шаталов А.Н., Шмурыгин В.А. Современный подход к методам борьбы с пылью в подземных горных выработках // Проблемы геологии и освоения недр / Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т. – Томск. – С. 378–379.
12. Шевцов Н.Р. Взрывозащита горных выработок. – Донецк: Нордпресс, 2002. – 286 с.
13. NIOSH/industry collaborative efforts show improved mining equipment cab dust protection / J.A. Organiscak, A.B. Cecala, E.D. Thimons, W.A. Heitbrink, M. Schmitz, E. Ahrenholtz; ed. W.R. Yernberg // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. – 2003. – Vol. 314. – P. 145–152.
14. 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. – P. 103–106. DOI: 10.1007/s11148-015-9791-7
15. Либецкий К. Пылевые опасности в горнодобывающей промышленности // Главный институт горного дела, Польша. – Катовице, 2004. – 486 с.
16. Охрана труда: учеб. для вузов / К.З. Ушаков, Б.Ф. Кирич, Н.В. Ножкин и др.; под ред. К.З.Ушакова. – М.: Недра, 1986. – 624 с.
17. Исследование сорбции углеводородов при увлажнении угля / В.С. Лебедев, С.Ю. Телешева, О.В. Скопинцева, А.Ю. Прокопович // Горный журнал. – 2009. – № 2. – С. 70–71.
18. Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю., Соловьев Ю.В. Исследование пылеобразующей способности углей при увлажнении их рабочей жидкостью в режиме

капиллярного насыщения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 9. – С. 68–70.

19. Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Пылеподавление пеной на горных предприятиях // Аэрология: сб. науч. тр. по материалам симпозиума «Неделя горняка-2009». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2009. – № ОВ 13. – С. 221–227.

20. Петрухин П.М., Качан В.Н. Теоретические основы пылевзрывозащиты способами, основанными на применении воды // Безопасность труда в угольных шахтах: тр. МакНИИ. – М.: Недра, 1972. – Т. XXII. – С. 89–103.

21. Organiscak J.A., Reed W.R. Characteristics of fugitive dust generated from unpaved mine haulage roads // International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment. – 2004. – 18(4). – P. 236–252. DOI: 10.1080/1389526042000263333

22. Джигрин А.В., Горлов Ю.В., Чигрин В.Д. Автоматическая система взрывоподавления – локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 8. – С. 22–26.

23. Recirculation filter is key to improving dust control in enclosed cabs: Technology news 528. Pittsburgh: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 2007. – Publication № 2008-100.

24. Improve drill dust collector capture through better shroud and inlet configurations: Technology news 512. – Pittsburgh: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 2005. – Publication № 2006-108.

25. 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.

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

27. Толченкин Ю. А., Чекветадзе Ф.А., Разумняк Н.Л. Роль переподготовки руководителей и специалистов в повышении промышленной безопасности на шахтах отрасли // Уголь. – 2007. – № 10. – С. 41–44.

28. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block / V.N. Makarov,

V.Ya. Potapov, S.Ya. Davydov, N.V. Makarov // Refractions and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 38, № 3. – P. 288–292. DOI: 10.1007/s11148-017-0098-8

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

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

31. Bautin S.P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. – 2014. – Т. 52, № 2. – С. 259–263. DOI: 10.1134/S0018151X14020035

32. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants / V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolniiy, N.A. Taran // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – № 4. – P. 8–17.

33. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления: пат. 2601495 Рос. Федерация М.кл.В64С23/0,6 / Макаров Н.В., Макаров В.Н., заявл.: 22.06.2015, опубл.: 11.10.2016.

34. Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, № 1. – P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067

35. Лойцянский И.Л. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

36. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces // High temperature. – 2015. – P. 53, № 6. – P. 928–930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X

37. 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 (Switzerland). – 2017. – Т. 7, № 1. – P. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005

38. Listak J.M., Reed W.R. Water separator shows potential for reducing respirable dust generated on small-diameter rotary blasthole drills // Int J Min Reclam Environ Zi(3). – 2007. – P. 160–172. DOI: 10.1080/17480930601176846

39. Kilau H.W. The wettability of coal and its relevance to the control of dust during coal mining // Journal of adhesion science and technology. – 1993. – Vol. 7, № 6. – P. 649–667. DOI: 10.1163/156856193X00899

## References

1. Skopintseva O.V. Nauchnoe obosnovanie kompleksnogo metoda snizheniya pylevoy i gazovoy opasnostey vyemochnykh uchastkov ugolnykh shakht [Scientific substantiation of the integrated method of reducing the dust and gas hazards of mining sites of coal mines]. *Gornyyu informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, pp.315-325.

2. Levkin N.B. Predotvrashchenie avariyy i travmatizma v ugolnykh shakhtakh ukrainy [Prevention of accidents and injuries in coal mines in Ukraine]. Makeevka, MakNII, 2002, 392 p.

3. Mokhnachuk I.I. Problemy bezopasnosti na ugledobyvayushchikh predpriyatiyakh [Security Issues in Coal Mining Enterprises]. *Ugol*, 2008, no.2, pp.21-26.

4. Reed W.R., Organiscak J.A. Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28 – March 2, Salt Lake City, Utah, 2005, pp.147-153.

5. Nozhkin N.V. Zablagovremennaya degazatsiya ugolnykh mestorozhdeniy [Advance degassing of coal deposits]. Moscow, Nedra, 1979, 271 p.

6. Alekseev F.A., Voytov G.I., Lebedev V.S. et al. Metan [Methane]. Moscow, Nedra, 1978, 310 p.
7. Vasyuchkov Yu.F. Fiziko-khimicheskie sposoby degazatsii ugolnykh plastov [Physico-chemical methods of coal seam degassing]. Moscow, Nedra, 1986, 255 p.
8. Slastunov S.V. Zablagovremennaya degazatsiya i dobycha metana iz ugolnykh mestorozhdeniy [Advance degassing and extraction of methane from coal deposits]. Moscow, Izdatelstvo MGGU, 1996, 273 p.
9. Handbook for dust control in mining. Ed. F.N. Kissell Pittsburgh, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), Publication no. 2003, 132 p.
10. Skopintseva O.V. Issledovanie vzaimodeystviy v sisteme "ugol – zhidkost – gaz" pri uvlazhnenii ugolnogo massiva [Study of interactions in the system "coal – liquid – gas" at moistening the coal massif]. *Aerologiya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam simpoziuma "Nedelya gornyaka-2009"*. Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2009, no.OB13, pp.212.
11. Shatalov A.N., Shmurygin V.A. Sovremennyy podkhod k metodam borby s pylyu v podzemnykh gornykh vyrabotkakh [Modern approach to dust control in underground mines]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr.* Tomsk, Natsionalnyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet, pp.378-379.
12. Shevtsov N.R. Vzryvozashchita gornykh vyrabotok [Explosion protection of mine workings]. Donetsk, Nordpress, 2002, 286 p.
13. Organiscak J.A., Cecala A.B., Thimons E.D., Heitbrink W.A., Schmitz M., Ahrenholtz E. *NIOSH/industry collaborative efforts show improved mining equipment cab dust protection*. Ed. W.R. Yernberg. Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2003, vol. 314, pp.145-152
14. 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
15. Libetskiy K. Pylevye opasnosti v gornodobyvayushchey promyshlennosti [Dust hazards in the mining industry]. Glavnyy institut gornogo dela. Katovitse, 2004, 486 p.
16. Ushakov K.Z., Kirin B.F., Nozhkin N.V. et al. Okhrana truda [Occupational Safety and Health]. Ed. K.Z. Ushakov. Moscow, Nedra, 1986, 624 p.
17. Lebedev V.S., Telesheva S.Yu., Skopintseva O.V., Prokopovich A.Yu. Issledovanie sorbtzii uglevodorodov pri uvlazhnenii uglya [The study of the sorption of hydrocarbons in the wetting of coal]. *Gornyy zhurnal*, 2009, no.2, pp.70-71.
18. Skopintseva O.V., Prokopovich A.Yu., Solov'ev Yu.V. Issledovanie pyleobrazuyushchey sposobnosti ugley pri uvlazhnenii ikh rabochey zhidkostyu v rezhime kapillyarnogo nasyshcheniya [The study of the dust-forming ability of coals when moistened with a working fluid in the capillary saturation mode]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, no.9, pp.68-70.
19. Skopintseva O.V., Savelev D.I. Pylepodavlenie penoy na gornykh predpriyatiyakh [Dust suppression in mining enterprises]. *Aerologiya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam A99 Simpoziuma "Nedelya gornyaka-2009"*. Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2009, no. OV13, pp.221-227.
20. Petrukhin P.M., Kachan V.N. Teoreticheskie osnovy pylevzryvozashchity sposobami, osnovannymi na primenenii vody [Theoretical basis of dust and explosion protection methods based on the use of water]. *Bezopasnost truda v ugolnykh shakhtakh. Trudy MakNII*, vol.XXII, Moscow, Nedra, 1972, pp.89-103.
21. Organiscak J.A., Reed W.R. Characteristics of fugitive dust generated from unpaved mine haulage roads. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, 2004, 18(4), pp.236-252. DOI: 10.1080/1389526042000263333
22. Dzhigrin A.V., Gorlov Yu.V., Chigrin V.D. Avtomaticheskaya sistema vzryvopodavleniya – lokalizatsii vzryvov metanovozdushnoy smesi i ugolnoy pyli v podzemnykh gornykh vyrabotkakh ugolnykh shakht [Automatic explosion suppression system – localization of methane-air mixture explosions and coal dust in underground mines of coal shafts]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2003, no.8, pp.22-26.
23. Recirculation filter is key to improving dust control in enclosed cabs. Technology news 528. Pittsburgh, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 2007, Publication no.2008-100.
24. Improve drill dust collector capture through better shroud and inlet configurations. Technology news 512. Pittsburgh, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 2005, Publication no. 2006-108.
25. Yanov A.P., Vashchenko V.S., Gagauz F.G. et al. Borba s pylyu i vrednymi gazami v zhelezorudnykh shakhtakh [Combating dust and harmful gases in iron ore mines]. Moscow, Nedra, 1984, 228 p.
26. Cecala A.B., Andrew D. Dust control handbook for industrials minerals mining and processing. Office of Mine safety and Health Research, 2012, 159 p.
27. Tolchenkin Yu.A., Chekvetadze F.A., Razumnyak N.L. Rol perepodgotovki rukovoditeley i spetsialistov v povyshenii promyshlennoy bezopasnosti na shakhtakh otrasli [The role of retraining of managers and specialists in improving industrial safety in the mines of the industry]. *Ugol*, 2007, no.10, pp.41-44.
28. 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
29. Program evaluation and information resources, standardized information system. Arlington, Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, 2009.
30. Frolov A.V., Telegin V.A., Sechkerev Yu.A. Osnovy gidroobespylivaniya [Basics of hydrodusting]. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*, 2007, no.10, pp.1-24.

31. 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
32. Lyashenko V.I., Gurin A., Topolnyy F.F., Taran N.A. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants. *Metallurgical and Mining Industry*, 2017, no.4, pp.8-17.
33. Makarov N.V., Makarov V.N. Sposob sozdaniya podzemnoy sily i ustroystva dlya ego osushchestvleniya [The techniques to create lift force and device for its implementation]. Patent 2601495 Russian Federation (2016).
34. Novakovskiy N.S., Bautin S.P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol.894, no.1, pp.012067. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012067
35. Loytsyanskiy I.L. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Nedra, 1978, 736 p.
36. Bautin S.G., Krutova I.Y., 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: 10.1134/S0018151X1505003X
37. 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 (Switzerland)*, 2017, vol.7, no.1, pp.5-20. DOI: 10.3390/app7010005
38. Listak J.M., Reed W.R. Water separator shows potential for reducing respirable dust generated on small-diameter rotary blasthole drills. *Int J Min Reclam Environ Zi(3)*, 2007, pp.160-172. DOI: 10.1080/17480930601176846
39. Kilau H.W. The wettability of coal and its relevance to the control of dust during coal mining. *Journal of adhesion science and technology*, 1993, vol.7, no.6, pp.649-667. DOI: 10.1163/156856193X00899

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, А.В. Лифанов // 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

Please cite this article in English as:

Kosarev N.P., Makarov V.N., Makarov N.V., Ugolnikov A.V., Lifanov A.V. Effective Localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.18, no.2, pp.178-189. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.7