

УДК 622.411.52:532:62-784.4

Гого В.Б.

Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Сироватченко В.О.

Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Михайлов О.І.

Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

В работе приведено новое решение актуальной научной проблемы, заключающейся в улучшении условий труда шахтеров по пылевому и температурным факторам путем развития теории гидродинамического обеспыливания на основе импульсно-волновых эффектов, создаваемых в процессах поглощения частиц пыли каплями жидкости и обосновании рациональных технических средств гидродинамической борьбы с пылью. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что для частиц пыли и капель жидкости в процессе импульсно-волнового взаимодействия возникают частотные пульсации вместе с изменениями амплитуд колебаний их импульсов в виде волны давления, что повышает эффективность синергетических импульсов ударных взаимодействий капель жидкости и частиц пыли в процессах их слияния (обеспыливание) и охлаждения. Практическое значение состоит в том, что на основе установленных закономерностей и особенностей импульсно-волнового воздействия капель жидкости на частицы пыли, разработаны установки, прошедшие промышленную проверку и показавшие эффективность в процессах улучшения условий труда шахтеров по пылевому и температурным факторам.

Ключевые слова: угольная шахта, пыль, гидравлическое обеспыливание, охлаждения рудничного воздуха.

Постановка проблемы. Прогресс угольной отрасли Украины, как основы национальной энергетической независимости, требует решения ряда проблем в охране труда шахтеров. Тревожной является статистика по профессиональным заболеваниям горняков от пыли и высоких температур рудничного воздуха, которые ведут к ежегодным экономическим потерям на сумму, превышающую 1,5 млрд. гривен. Большинство шахт Донецкого бассейна в Украине ведет работы на глубинах свыше 1 тыс. метров, где температура горных пород превышает 40°C, что ведет к нагреву рудничного воздуха выше нормы 26°C. Это отрицательно влияет на здоровье горняков, вызывая патологии сердечно-сосудистой системы, обостряя заболевания органов дыхания и т.д. Поэтому необходимы безотлагательные меры, повышающие качество рудничного воздуха, на основе

новых научных разработок для охраны труда шахтеров.

Анализ последних научных исследований и публикаций. В научных работах Г.А. Позднякова, И.Г. Ищука, Е.И. Онтина, В.П. Журавлева, И.Н. Логачева и др. [1; 2; 3] исследовались, главным образом, практические аспекты борьбы с рудничной пылью и возможного охлаждения воздуха в горных выработках шахт на основе применения орошения. Первые исследования по оптимизации параметров гидравлического пылеподавления и охлаждения воздуха при орошении изложены в работах Б.М. Кривохижи, А.Ю. Вальдберга, Ю.В. Ковалевского, Г.К. Лебедюка [2; 3]. Фундаментальные обобщения, сформировавшие научные основы гидравлического подавления пыли в условиях ведения горных работ в угольных шахтах, приведены в работах В.П. Журавлёва, И.Г. Ищука,

Г.А. Позднякова, Э.Н. Медведева, А.П. Коренева и др. [1-3]. В исследованиях этих авторов установлено, что скорость поглощения частиц пыли каплями воды, известного радиуса, зависит от размеров частиц пыли и коэффициента захвата. Чем выше давление воды, тем больше в процессе её дробления турбулизация потока и наблюдается повышение коагуляции пылевых частиц.

Наряду с определенными успехами, достигнутыми в реализации гидродинамического способа, сохраняется **важная научная проблема в раскрытии физической природы действия механизмов и закономерностей комплексного процесса гидрообеспыливания и охлаждения воздуха**, позволяющих повысить эффективность процесса, в частности, импульсно-волновым воздействием капель жидкости. При этом не поставлены и не решены **важные теоретические задачи** по использованию фрактальных представлений о структурности системы турбулентного дисперсного потока «газ – капли жидкости – частицы пыли» для повышения эффективности гидрообеспыливания и охлаждения. Однако, анализ аналогичных исследований показывает, что **проблему повышения эффективности обеспы-**

ливания с одновременным охлаждением рудничного воздуха капельной жидкостью следует решать комплексно, на основе использования гидродинамических, в частности, импульсно-волновых и термодинамических эффектов, к примеру, с применением предварительно охлажденного воздуха.

Актуальность указанной проблемы, ее научно-техническая и социальная значимость сконцентрировались в исследовании, направленном на обоснование научных решений, повышения качества рудничного воздуха по факторам запыленности и температуры. Как эффективный вариант предлагается импульсно-волновое гидравлическое пылеподавление и охлаждение воздуха, создаваемое специальными эжекторами, что позволит снизить уровень запыленности рудничного воздуха и его температуру в глубоких горных выработках угольных шахт.

В связи с этим сформулирована цель и задачи исследования: на основе развития теории и совершенствования гидродинамических средств борьбы с пылью и охлаждения рудничного воздуха импульсно-волновым процессом улучшить условия труда шахтеров по пылевому и температурному факторам. Для достижения указанной цели выполнены такие задания:

1. Раскрыть механизм импульсно-волнового гидрообеспыливания воздуха каплями жидкости путем действия капель жидкости на частицы пыли и определить условия возникновения эффективного процесса импульсно-волнового гидрообеспыливания при генерации импульсной волны давления, а также получить термодинамические характеристики процесса для повышения энерго-технологической эффективности средств гидродинамического охлаждения рудничного воздуха.

2. Определить аналитически и проверить экспериментально условия для обеспечения процесса гидрообеспыливания и охлаждения воздуха на основе разработанных средств.

3. Обобщить экспериментально-аналитические исследования и провести синтез разработанных элементов средств импульсно-волнового гидрообеспыливания и охлаждения воздуха для производственных условий угольных шахт.

Изложение основного материала исследования. Для формирования физико-математической модели комплексного процесса улавливания пыли и охлаждения воздуха, проведено аналитическое исследование динамики изменений структур газожидкостного потока по экспериментальным фотоснимкам, которые были обработаны компью-

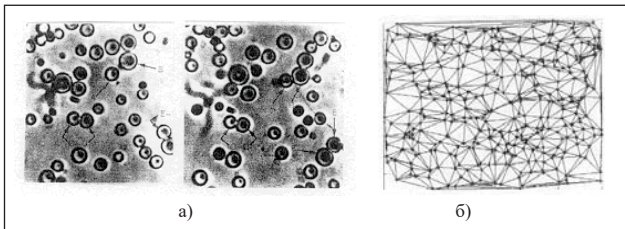


Рис. 1. Фрактальные структуры взаимодействий капель жидкости и пылевых частиц: а – фотоснимки; б – компьютерная обработка

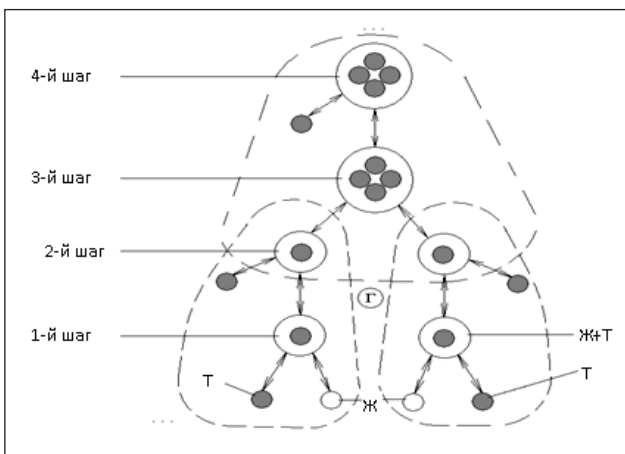


Рис. 2. Схема структур фракталов: Г – газ; Ж – капля; Т – твердая частица

терной программой координатной фрактальной диспозиции зон потоков, как объектов с искомыми изменениями.

Компьютерная обработка снимков позволила разработать модель фрактальной структуры потока, что сделало возможным описание динамики переходов состояний систем «газ – капли жидкости – частицы пыли» в системы «газ – капли жидкости с поглощёнными частицами пыли», а также происходящих тепловых и массообменных процессов, что адекватно гидравлическому улавливанию пыли каплями жидкости, и охлаждению газа. Фото фрактальных структур потока и его модели приведены на рис. 1.

Случайные флуктуации в волновом потоке учитывались в аналитическом описании неоднородных состояний систем при переходах одной структуры компонентов в другую на основе анализа геометрических моделей фрактальных композиций, показанных на рис. 2.

Геометрические фракталы системы «газ – капли жидкости – твердые частицы» получены с помощью линий (поверхностей для пространства), охватывающих элементы фрактала (на рис. 2 – пунктирные линии).

Фрактальное структурирование потока позволило получить аналитическое выражение для предельной массы капли жидкости с поглощенными частицами пыли в виде:

$$M = m_0 \left(\sum_i^N 2^i k_s^{(N+2)-1} + (2^N - 1)(k_s^2 + 1) + 1 \right), \quad (1)$$

где k – массовый коэффициент для i -го шага слияния; N – число шагов (слияний); m_0 – начальная масса капли.

Математическое выражение (1) определяет, что существует дискретность в процессе поглощения частиц пыли одной каплей жидкости, т.е. формирования капли предельных параметров с дискретностью ее массового и энергетического состояния совместно с поглощенными частицами пыли.

Исследуемый фрактал структуры пыле-газо-жидкостного потока является бинарным, поэтому одна капля может захватить только одну или две частицы пыли, не нарушая фрактальной структуры потока. Предельная по массе капля в стабильном энергетическом состоянии формируется с частотой, равной частоте волнового процесса перемещения компонентов потока. Принимаем, что время формирования «предельной капли» и есть технологическое время процесса улавливания частицы пыли каплей жидкости в рабочем объеме потока.

При создании физической модели процесса импульсно-волнового улавливания пыли каплями жидкости в газовом потоке сделаны предположения, что собственные колебания компонентов учитываются без взаимного влияния друг на друга, а эффективность внедрения частицы пыли в каплю зависит от величины внешнего импульса давления. Все столкновения частиц пыли и капель предположительно происходят в области рабочего пространства трехфазного потока.

В разработке математической модели процесса принималось, что в газовой среде образуются системы двух тел (капля-частица). Масса системы равна сумме масс капли жидкости (m) и частицы пыли (\bar{m}). В динамике потока учитываются частоты собственных колебаний частиц и волновой характер процесса их перемещения в виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3)$$

где x – координата движущейся частицы потока (пыли или капли) по оси x ;

γ – коэффициент пропорциональности, который формируется параметрами частицы и характеристиками потока;

ω_0 – собственная циклическая частота колебаний частицы потока.

Решением уравнения (3) является:

$$x(t) = x_0 e^{-\varepsilon t} \left(\frac{1}{\omega} (1 + \varepsilon) \sin \omega t + \cos \omega t \right). \quad (4)$$

Анализ уравнения (4), позволил установить, что при слабых колебаниях частиц потока экспоненциальный показатель (εt) можно считать постоянным в течение одного цикла колебаний. При этом предположении второе слагаемое в (4) не учитывается, тогда полная энергия частицы равна:

$$E(t) = E_0 e^{-\gamma t}, \quad (5)$$

где $E(t)$ – полная энергия частицы в волновом процессе (сумма кинетической и потенциальной энергий) для данного момента времени; E_0 – исходная энергия частицы.

Полная энергия частицы в волновом процессе:

$$x(t) = x_0 e^{-\varepsilon t} \left(\frac{1}{\omega} (1 + \varepsilon) \sin \omega t + \cos \omega t \right). \quad (6)$$

где m – масса частицы (капли или пыли).

Исходная энергия частицы определяется выражением:

$$E(t) = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \omega_0^2 x^2 \right], \quad (7)$$

где ω – циклическая частота колебаний частицы потока; c_1 и c_2 – постоянные.

Учитывая, что $\omega = 2\pi\nu$ из (6-7) частота колебаний частицы будет равна:

$$\nu = \nu_0 e^{-\frac{\gamma d_0}{V}}, \quad (8)$$

где d_0 – диаметр частицы (до столкновения с другой частицей);

V – скорость частицы (потока).

Граничные условия: $\delta(t_0) = \delta_0$; $P_0 = P(t_0, x_0)$,

где t_0 – время начала отсчета импульса по координате (x); P_0 – начальное давление.

Предполагается, что поток идеальный и в лагранжевых переменных характеризуется системой уравнений в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J} \left(\frac{\partial P_{ж}}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial P_{г}}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} \right), \quad \frac{\partial x}{\partial t} = u; \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J} \left(\frac{\partial P_{ж}}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial P_{г}}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} \right), \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v; \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho J} \left(\frac{\partial P_{ж}}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} - \frac{\partial P_{г}}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial \alpha_{г}}{\partial t} = \frac{3\alpha_{г}}{a} w - \frac{\alpha_{г}}{J} \frac{\partial J}{\partial t}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_{г}}{\partial t} = -\frac{3\gamma P_{г}}{a} w - \frac{3\gamma - 1}{\alpha_{г}} \frac{q}{a}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial a_{ж}}{\partial t} = w = w_A + w_R; \quad (14)$$

$$w_A = \frac{P_{г} - P_{ж}}{T_{ж} \rho_{ж} C_{ж} \sqrt[3]{\alpha_{г}}} w_R; \quad (15)$$

$$\frac{\partial w_R}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{P_{г} - P_{ж}}{\rho_{ж}} - 1,5\alpha_{г} w_R^2 - 4v_{ж} \frac{w_R}{\alpha_{г}} \right); \quad (16)$$

$$J = \frac{\partial x}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial x}{\partial y_0} \frac{\partial y}{\partial x_0}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial u}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0} + \frac{\partial v}{\partial x_0} \frac{\partial y}{\partial y_0} - \frac{\partial v}{\partial y_0} \frac{\partial x}{\partial x_0}, \quad (18)$$

где ρ – плотность смеси потока; $P = P_{г}$ – давление в потоке; u – скорость по координате (x); v – скорость по координате (y); w – радиальная скорость капель; J – якобиан перехода от лагранжевых к эйлеровым переменным; C – удельная теплоемкость жидкости; γ – показатель адиабаты газа; a – средний радиус фазовой области; α – относительное объемное содержание фаз; q – интенсивность теплообмена между фазами; $ж$ – индекс жидкости; $г$ – индекс газа; x_0, y_0 – лагранжевые переменные, за которые приняты начальные эйлеровы координаты.

Система уравнений (9-18) решается численными методами (например, в программной реализации MathCad-2005) и даёт иллюстрацию эффекта нелинейности эволюции волнового импульса в потоке в виде:

$$P(t, x) = P_0 + P^* \exp(-\varepsilon), \quad (19)$$

где P_0 – начальное давление (в начальном сечении); P^* – амплитуда импульса давления; ε – показатель действия импульса, равный:

$$\varepsilon = (t - 0,5t^*) t_0^{-1},$$

где t – координатное время; t^* – длительность импульса; t_0 – длительность начального импульса.

Уравнения импульсно-волнового движения капель и частиц в газовом потоке составлены при условии, что мгновенные эффективные радиусы капель в процессе действия на частицы пыли изменяются по зависимости:

$$R_k(t) = R_{k0} + \Delta_k f(t); \quad \Delta_k (R_{k0})^{-1} \ll 1,$$

где $R_k(t)$ – мгновенный радиус капли; R_{k0} – невозмущенный радиус капли; Δ_k – амплитуда пульсаций капли в эффективном объеме; $f(t)$ – функция, зависящая от времени.

Тогда, система уравнений импульсно-волнового движения капли жидкости относительно оси потока, с точностью до величины второго порядка малости, имеет вид:

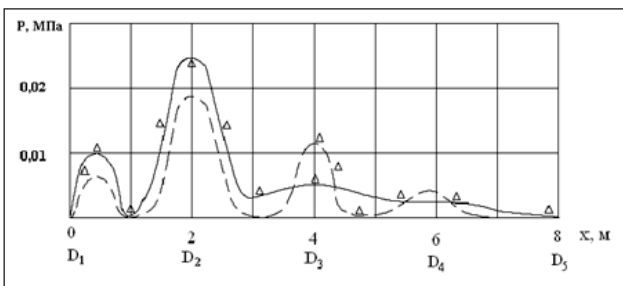


Рис. 3. Графическая интерпретация распространения импульса давления в рабочем объеме потока: пунктир – теория; Δ – эксперимент; D_1, D_2, \dots, D_5 – датчики давления, установленные по длине потока



Рис. 4. Фотография многокамерного эжектора

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dV_k}{dt} &= 2(\dot{V}_r - g) - \dot{V}_k \left[\frac{9\eta}{R_{k0}^2 \rho_{ж}} \left(1 - \frac{2\Delta_k}{R_{k0}} + \frac{3\Delta_k}{R_{k0}^2} \right) + \frac{3}{R_{k0}} \Delta_k \left(1 - \frac{\Delta_k}{R_{k0}} \right) \right], \quad (20) \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2 \Delta_k &= \chi_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k, V_k, \dots), \end{aligned} \right.$$

где V_k – скорость поступательного движения капли; $VГ$ – скорость газа; g – ускорение силы тяжести; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости капли; η – динамический коэффициент вязкости; ω – циклическая частота пульсаций (столкновений).

Частота столкновений капель жидкости и частиц пыли, которая пропорциональна пульсациям в потоке, определяется соотношением:

$$\omega = \left\{ \left(R_{A1}^2 - R_{M0}^2 \right)^{-1} \left[3Ag(n_A - n_M) + \frac{2\sigma[R_{M0}(3n_A - 1) + R_{A1}(1 - 3n_M)]}{\rho_{ж} R_{A1} R_{M0}} \right] \right\}^{1/2} \quad (21)$$

где ω – циклическая частота пульсаций в потоке; R_{B0} , R_{M0} – начальные радиусы больших и малых капель; n_B , n_M – относительные количества больших и малых капель; A – параметр, зависящий от координаты частицы; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Упругие свойства газожидкостного потока обеспечивают пульсации давления, а, соответственно, и качество процесса внедрения частицы пыли в каплю жидкости без дополнительных технических средств только путем специальной организации потока.

Таким образом, теоретическое исследование позволило определить, что для частиц пыли и капель жидкости в газовом потоке частотные пульсации повышают эффективность импульсов ударных взаимодействий капель жидкости и частиц пыли, т.е. эффективность подавления пыли и охлаждения.

Экспериментальные исследования проведены на установках, имеющих натурные размеры и режимы, соответствующие условиям промышленной эксплуатации (с целью уменьшения эффекта масштабности). Эксперименты выполнены в лаборатории гидромеханики Индустриального института ДонНТУ и на опытно-промышленных установках в условиях шахт региона.

На рис. 3 приведены экспериментальная и теоретическая зависимости распространения импульса давления в смеси потока, что подтверждает его импульсно-волновое перемещение и взаимодействие компонентов.

На рис. 4 показана фотография многокамерного эжектора, реализующего импульсно-волно-

вой процесс, разработанного на основе патентов [4; 5], и испытанного в условиях угольных шахт региона.

С целью проверки расчетных параметров многокамерного эжектора для обеспыливания и охлаждения воздуха были проведены эксперименты по определению зазоров между цилиндрическими камерами, а также углов раскрытия, образуемого диффузора, для диапазонов рабочих давлений воды (0,5-2) МПа. Экспериментально определено, что зазоры между цилиндрическими камерами составляют убывающую арифметическую прогрессию. Определено, что зазоры между камерами должны быть в пределе (5-9) мм, что создает импульсно-волновое движение потока. Рациональный угол раскрытия диффузорной части эжектора находится в пределах (20-22)°.

Получена эффективность подавления пыли 98,8%, а охлаждение воздуха на (7-9)С° при начальной температуре воды 20С°, а воздуха 32С°. Разработка найдет применение в очистных и проходческих забоях угольных шахт.

Выводы. Впервые раскрыт и аналитически описан механизм импульсно-волнового комплексного процесса гидравлического подавления пыли и охлаждения воздуха капельной жидкостью, заключающийся в колебательном внедрении частиц пыли в капли. Определено, что за счет результирующих импульсов действующих сил и энергетических потенциалов систем «капля жидкости – частица пыли», повышается эффективность вращательного дрейфа и диффузии частиц пыли в капли жидкости. При этом доминирующим фактором является величина кинетического момента, который проявляется через циклическую частоту колебаний системы, а она зависит от дискретных массовых состояний капли. Эта частота соответствует частоте импульсов, создаваемых в дисперсной пыле-газожидкостной среде, с повышением которых повышается эффект внедрения частиц пыли в капли жидкости и охлаждение воздуха.

Перспективным в исследовании является научное обоснование параметров импульсно-волнового пылеподавления и охлаждения рудничного воздуха при низконапорном орошении. Для этого необходимо определить частоты пульсаций капель больших и малых размеров (100-200) мкм при давлениях воды (0,7-1,0) МПа.

Список литературы:

1. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах / Э.Н. Медведев, В.Д. Мартовицкий, О.И. Кашуба и др. Макеевка, МакНИИ: Промдрук, 2006. 600 с.

2. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев и др. М.: Недра, 1981. 271с.
3. Гого В.Б., Малеев В.Б. Гидродинамическое подавление пыли в условиях угольных шахт: теория и технические решения. Донецк: ДонНТУ, 2008. 240 с.
4. Пат. 27195 Україна, МПК E 21 F 5/100. Спосіб попередження вибуху газопилоповітряної суміші у гірничих виробках / В.Б. Гого, В.Б. Малеев, А.К. Семенченко, О.С. Булич, С.В. Москаленко; заявник та патентовласник Донецький НТУ; заявл. 07.05.07 ; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.
5. Пат. 16953 Україна, МПК F 04 F 5/16. Ежектор / В.Б. Гого, В.Б. Малеев; заявник та патентовласник Донецький НТУ; заявл. 10.11.05 ; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ЗАСОБІВ КОМПЛЕКСНОГО ГІДРАВЛІЧНОГО ЗНЕПИЛЮВАННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ РУДНИКОВОГО ПОВІТРЯ

У роботі наведено нове рішення актуальної наукової проблеми, що полягає у покращенні умов праці шахтарів за пиловим та температурним факторами шляхом розвитку теорії гідродинамічного знепилювання на основі імпульсно-хвильових ефектів, що створюються в процесах поглинання частинок пилу краплями рідини і обґрунтуванні раціональних технічних засобів гідродинамічної боротьби з пилом. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено, що для частинок пилу і крапель рідини у процесі імпульсної хвильової взаємодії виникають частотні пульсації разом зі змінами амплітуд коливань їх імпульсів у вигляді хвилі тиску, що підвищує ефективність імпульсів ударних взаємодій крапель рідини і частинок пилу у процесах їх злиття (знепилювання) та охолодження. Практичне значення полягає у тому, що на основі встановлених закономірностей і особливостей імпульсно-хвильової дії крапель рідини на частинки пилу, розроблено установки, що пройшли промислово перевірку і показали ефективність у процесах покращення умов праці шахтарів за пиловим і температурним факторами.

Ключові слова: вугільна шахта, пил, гідравлічне знепилювання, охолодження рудникового повітря.

DEVELOPMENT OF THE THEORY AND MEANS OF INTEGRATED HYDRAULIC SPRAYING AND COOLING OF MUNICIPAL AIR

The paper presents a new solution to the actual scientific problem, which is to improve the working conditions of miners by dust and temperature factors by developing a theory of hydrodynamic dust removal based on pulsed-wave effects created in the processes of absorption of dust particles by droplets of a fluid and substantiation of rational technical means of hydrodynamic dust control. It is theoretically substantiated and experimentally mentally proved that for dust particles and liquid droplets in the process of pulse-wave wave interaction, frequency pulsations occur along with changes in the amplitude of the fluctuations of their pulses in the form of a pressure wave that increases the efficiency of synergistic impulses of shock interactions of liquid droplets and dust particles. in the process of their merging (dust removal) and cooling. The practical significance is that on the basis of the established regularities and features of the pulsed-wave action of droplets of a liquid on dust particles, the installations that have undergone an industrial test and demonstrated efficiency in the process of improving the working conditions of miners for dust and temperature factors have been developed.

Key words: coal mine, dust, hydraulic abatement, cooling of mine air.