УДК 622.8.7:502

В.Б. Гого, д-р техн. наук, доц.,
Ю.Ф. Булгаков, д-р техн. наук, проф.,
С.В. Подкопаев, д-р техн. наук, проф.,
Донецкий национальный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ГИДРООБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА

В работе изложена сущность построения и анализа математической модели процесса импульсно-волнового воздействия капель на частицы пыли с целью повышения эффективности гидрообеспыливания воздуха.

математическая модель, импульсно-волновое гидрообеспыливание, воздух, пыль, капли

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Для обеспечения безопасных условий труда шахтёров на угольных предприятиях актуальной является борьба с угольной пылью. Это связано, прежде всего, с угрозой заболевания пылевой этиологии, а также формированием взрывоопасной среды. Как показывает практика борьбы с пылью, наибольший эффект достигается при гидроорошении и гидропылеулавливании в комплексе мероприятий, которые включают снижение пылеобразования, борьбу с распространением пыли и очисткой рудничного воздуха. Для разработки эффективных систем гидрообеспыливания актуальным является решение проблемы физико-математического моделирования процессов улавливания каплями частиц пыли.

Анализ исследований и публикаций. Анализируя теоретические работы и исследования по проблемам гидрообеспыливания, в частности [1- 3], приходим к выводу, что в разработанных моделях улавливания частиц пыли каплями (например, воды) весьма упрощенно отражено сущность процесса и поэтому в практические решения закладывались результаты экспериментальных исследований, что не позволяло аналитически обосновать направление для повышения эффективности гидропылеулавливания.

Работа над теоретической стороной этого вопроса приводит к необходимости сформулировать ***цель исследования,*** излагаемого в статье, как моделирование процесса импульсно-волнового воздействия капель на частицы пыли в воздушном (газовом) потоке для нахождения характеристик, которые влияют на повышение эффективности процесса гидрообеспыливания.

Постановка задачи. Математически смоделировать и описать процесс воздействия капель жидкости на частицы пыли в потоке воздуха (газа) с учетом того, что частицы пыли и капли находятся в поступательно-вращательных и колебательных движениях, создаваемых в рабочем пространстве потока.

Изложение материала и результаты.

Для решения задачи о пульсационном движении капель жидкости и частиц пыли в газовом потоке при определенности их физических параметров предположим, что степень их подобия определяется факторами – амплитудой и частотой пульсаций компонентов.

Изложим суть математического моделирования процесса импульсно-волнового гидрообеспыливания газового потока, на который воздействует диспергированная жидкость (капли), с учетом динамических эффектов среды при различных соотношениях между собственной частотой пульсаций потока и частотой вынуждающих колебаний капель. Как объект исследования выбираем динамическое состояние капель, воздействующих на частицы пыли, относительно неинерциальной системы координат.

Для составления уравнений движения системы «газ-капли-частица пыли» введем упрощающие предположения: размеры капель и частиц малы по сравнению с расстояниями между ними, а сами эти расстояния малы по сравнению с характерными изменения гидродинамических параметров несущей газовой среды; тепловые процессы в каплях возможно описать с помощью эффективных показателей теплоёмкости и теплопередачи; действие несущей среды на капли описывается тремя силами: силой межфазового трения, которая при малых числах Рейнольдса соответствует силе вязкого сопротивления согласно закону Стокса; силой, обусловленной эффектом присоединенных масс; силой, обусловленной наличием градиентов поля давления в несущей среде; вязкость жидкой фазы учитывается в процессах межфазных взаимодействий. Математическая модель процесса строится на рассмотрении состояния единичной капли, а полученные закономерности ее движения переносятся на совокупность всех капель исследуемой системы.

Уравнения поступательных и пульсационных состояний капель, воздействующих на частицы пыли, составим на основе представлений о многофазной дисперсной смеси. Мгновенные радиусы капель запишем в виде:

$$R_k(t) = R_{k0} + \Delta_k(t); \qquad {R_{k0}}^{-1}\Delta_k << 1, \tag{1}$$

Система уравнений, описывающая поступательные и пульсационные состояния капель относительно неподвижных осей, с точностью до величины второго порядка, имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dV_k}{dt} = 2(V_0 - g) - V_k[\dfrac{9\eta}{R_{k0}^2\rho_{ж}}(1 - \dfrac{2\Delta_k}{R_{k0}} + \dfrac{3\Delta_k}{R_{k0}^2}) + \dfrac{3}{R_{k0}}\Delta_k(1 - \dfrac{\Delta_k}{R_{k0}})], \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2\Delta_k = \chi_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k, V_k ...), \end{cases} \tag{2}$$

где Δ_k – амплитуда пульсаций капли;

R_{k0} – невозмущенный радиус капли.

V_k – скорости поступательного движения капель;

V_0 – скорость газового потока;

g – ускорение силы тяжести;

η – динамический коэффициент вязкости.

Введем лагранжев радиус-вектор центра капли $r_k(t)$. Тогда,

$$\dot{r}_k = V_k(0,0,Z_k);$$

$$\dot{r}_k = \dot{V}_k .$$

Уравнения (2) можно записать в виде:

$$\begin{gathered} \ddot{Z}_k = 2(g + \dot{V}_{0z}) - 3\dot{Z}_k[\dot{\Delta}_k R_{k0}^{-1}(1 - \Delta k R_{k0}^{-1}) + 3\eta R_{k0}^{-2}\rho_{ж}^{-1}(1 - 2\Delta_k R_{k0}^{-1})], \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2\Delta_k = V_{0z}R_{k0}^{-1}(h - Z_k) + \Delta_k R_{k0}^{-2}[(Z_k - h) + 3_{nk}gZ_k] - 1{,}5\dot{\Delta}_k^2 R_{k0}^{-1} + \\ + 4{,}5n_k(n_k+1)\Delta_k^2\rho_{ж}^{-1}R_{k0}^{-3} \times \{P_0 + (4{,}5)^{-1}\sigma[9n_k(n_k+1) - 4]n_k(n_k+1)^{-1}R_{k0}^{-1}\} - \\ - 0{,}25\dot{Z}^2 R_{k0}^{-1} + \Delta_k^2\dot{V}_{0z}(h - Z_k)R_{k0}^{-3} - 4\eta\dot{\Delta}_k R_{k0}^{-2}\rho_{ж-1}, \end{gathered} \tag{3}$$

где P_0 - давление в газовом потоке;

σ - коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела системы «жидкость-газ»;

ω_k - собственная частота пульсаций капли:

$$\omega_k = [\frac{3n_k}{\rho_{ж}R_{k0}^2}(P_0 + \rho_{ж}gh + \frac{3n_k - 1}{3n_k}\cdot\frac{2\sigma}{R_{k0}})]^{1/2}. \tag{4}$$

Исследуем движение капель как близкое к стационарному, когда скорость поступательного перемещения центра капли мала по сравнению со скоростью вибрационных перемещений масс потока. Рассмотрим нерезонансный случай, т.е. $\omega << \omega_k$.

Заменим переменные:

$$
\begin{aligned}
&Z_k = X_{1k};\\
&\dot{Z}_k = x_{2k} + 2\alpha\omega\cos\omega t;\\
&\dot{\Delta} = x_{3k}\cos\omega_k t + x_{4k}\sin\omega_k t + \frac{a\omega^2(h - x_{1k})}{R_{k0}(\omega_k^2 - \omega^2)}\sin\omega t;\\
&\dot{\Delta} = \omega_k(x_{4k}\cos\omega_k t) - x_{3k}\sin\omega_k t) + \frac{a\omega^3(h - x_{1k})}{R_{k0}(\omega_k^2 - \omega^2)}\cos\omega t.
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Приведем дифференциальные уравнения (3) к стандартной форме в виде:

$$
\dot{X}_{sk} = \mu f_s(x_{1k},\ldots x_{4k}); \qquad S = 1,2,3,4. \tag{6}
$$

Пропорциональность правых частей уравнений (6) параметру μ обоснуем, исходя из соображений, касающихся физических характеристик исследуемых движений капель, для которых после усреднения уравнений (6) по времени получим:

$$
\begin{aligned}
&X_{1k} = \mu X_{2k};\\
&X_{2k} = \mu[2g - \frac{3a\omega^2(h - X_{1k})}{R_{k0}^2(\omega_k^2 - \omega^2)} - \frac{9X_{2k}\eta}{R_{k0}^2\rho_{ж}}];\\
&X_{3k} = \mu\frac{3gn_k}{2R_{k0}}X_{1k}X_{3k};\\
&\dot{X}_{4k} = -\mu\frac{3gn_k}{2R_{k0}}X_{1k}X_{4k}.
\end{aligned}
\tag{7}
$$

Система уравнений (7) допускает следующие стационарные решения:

$$
\begin{aligned}
&X_{2k} = 0; \quad x_{3k} = 0; \quad x_{4k} = 0;\\
&x_{1k} = h - \frac{2gR_{k0}^2(\omega_k^2 - \omega^2)}{3(a\omega^2)^2}.
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Решения (8) позволяют сделать вывод, что для каждого сорта капель в потоке при определенном ускорении по координате существуют неустойчивые уровни (уровни выталкивания) капель, ниже которых капли выбрасываются (выпадают) из потока, т.е. не действуют на частицы пыли. Поэтому запишем решения (8) для каждой группы капель с учетом (4) в виде:

$$X_{1Б} = h - \frac{2}{\sigma^2}\left\{ n_б A + \frac{1}{3g}\left[\frac{2\sigma(3n_Б - 1)}{\rho_{ж} R_{БО}} - R_{БО}^2 \omega^2\right] \right\};$$

$$X_{1M} = h - \frac{2}{\sigma^2}\left\{ n_M A + \frac{1}{3g}\left[\frac{2\sigma(3n_M - 1)}{\rho_{ж} R_{MO}} - R_{MO}^2 \omega^2\right] \right\}, \qquad (9)$$

где обозначены $A = P_0(g\rho_{ж})^{-1} + h; \quad G = a\omega^2 g^{-1};$

h – характеристический параметр по вертикале потока.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Математическая модель процесса импульсно-волнового гидрообеспыливания воздуха (газа), приведенная в аналитических выражениях (1, 2, 4, 8, 9), определяет, что в потоке существуют области, в которых капли выпадают, а поэтому для создания встречных восходящих движений капель необходимо выполнить неравенство:

$$1 - 3n > \frac{\rho_{ж}}{2\sigma}\omega^2 (R_{БО} + R_{MO}) R_{БО} R_{MO}, \qquad (10)$$

которое сводится к неравенству $0 < n < 1/3$.

При этом максимальный радиус капель группы R_M, для которых выполняется условие (10) при $R_{БО} = 100\ R_{MO}$,:

$$\overline{R}_{MO}^3 \le \frac{\sigma}{5050\rho_{ж}\omega^2}.$$

Учитывая, что в потоке капли опускаются и поднимаются, то неравенство (9), будем иметь вид:

$$\omega^2 (R_{БО}^2 - R_{MO}^2) < 3Ag(n_Б - n_M) + \\ + \frac{2\sigma[R_{MO}(3n_Б - 1) + R_{БО}(1 - 3n_M)]}{\rho_{ж} R_{БО} R_{MO}}. \qquad (11)$$

Следовательно, для каждого сорта капель возникают области потока, переменные во времени и координатах, в которых происходит разнонаправленное, т.е. колебательное движение капель и частиц пыли, перпендикулярное к направлению потока. Для повышения эффективности воздействия капель на частицы пыли, этот процесс должен осуществляется в режиме установленных частот пульсаций капель, найденных по (4). Таким образом, разработанная математическая модель дает:

1. Уравнения пульсационного перемещения и взаимодействия компонентов, в которых учитывается концентрация частиц пыли в потоке при установленной частоте, что позволяет определить необходимый расход жидкости.
2. По известному массовому расходу жидкости определяется концентрация капель, для повышения частоты столкновений частиц пыли и капель жидкости.

В дальнейшем, с целью уточнения полученной математической модели, планируется учесть упругие резонансные свойства всего газожидкостного потока, что для гидродинамической установки позволит обеспечить увеличение амплитуды пульсаций, а, соответственно, и качество диспергирования жидкости, а также частоту воздействий капель на частицы пыли.

Список литературы

1. Ищук И.Г. Прогнозирование запыленности рудничной атмосферы и обоснование комплекса эффективных способов и средств обеспыливания очистных забоев угольных шахт: дис. докт. техн. наук: 05.15.11 и 05.26.01 / И.Г. Ищук. – М., 1989. – 421 с.
2. Журавлев В.П. Методы борьбы с угольной пылью / В.П. Журавлев, Е.Ф. Демичева, Л.А. Спирин. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1988. – 144 с.
3. Поздняков Г.А. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях / Г.А.Поздняков, Г.К.Мартынюк. – М.: Наука, 1983. – 126 с.

В.Б. Гого, Ю.Ф.Булгаков, С.В. Підкопаєв. **Математична модель процесу імпульсно-хвильового гідрознепилювання повітря**. *В роботі викладено сутність побудови і аналізу математичної моделі процесу імпульсно-хвильової дії крапель на частинки пилу з метою підвищення ефективності знепилювання повітря.*

математична модель, імпульсно-хвильове гідрознепилювання, повітря, пил, краплі

V. Gogo. U. Bulgacov, S. Podcopaev. **A Mathematical Model of Pulsating-Wave Hydrodynamic Cleaning of Air.** *The paper presents a study of the resonance mode of pulsating motion of liquid drops and dust particles in a hydrodynamic setting with the purpose of rising the efficiency of the process of catching dust.*

mathematical model, pulsating-wave hydrodynamic air cleaning, particles of dust, drops of liquid

Стаття надійшла до редакції 19.10.2010

Рецензент: зав. каф. «Гірничі машини» ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. А.К. Семенченко