

УДК 622.8.7:502

УРАВНЕНИЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Гого В.Б., канд. тех. наук, доц.,

Малеев В.Б., докт. тех. наук, проф., Булыч А.С. магистрант

Донецкий национальный технический университет

Изложены результаты исследования резонансного режима пульсирующего движения капель жидкости и частиц пыли в гидродинамической установке по очистке газов с целью повышения эффективности процесса улавливания пыли.

The results of research of the resonance mode of pulsating motion of drops of liquid and particles of dust in the hydrodynamic setting on cleaning of gases with the purpose of rise of efficiency of process of catching of dust are expounded.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Актуальной проблемой обеспечения безопасных условий труда шахтёров на угольных предприятиях является борьба с угольной пылью. Это связано, прежде всего, с угрозой заболевания пылевой этиологии, а также формированием взрывоопасной среды. Как показывает практика применения систем по борьбе с пылью, наибольший эффект достигается при применении гидроорошения и гидропылеулавливания, в комплексе мероприятий, которые включают снижение пылеобразования, борьбу с распространением пыли и очисткой рудничного воздуха. Для проектирования эффективных гидродинамических систем актуальным вопросом является физико-математическое моделирование процессов движения капель жидкости и улавливания частиц пыли в гидродинамических устройствах очистки воздуха.

Анализ исследований и публикаций. Анализируя теоретические работы и исследования по проблемам гидропылеподавления [1, 2, 3] приходим к выводу, что в моделировании процесса улавливания частиц угольной пыли капельной жидкостью упрощенно отражено взаимодействие капли жидкости и частицы пыли, поэтому в основу практических разработок закладывались результаты экспериментальных исследований. Теоретическая сторона вопроса повышения КПД гидродинамических систем защиты от пыли требует исследования и мо-

делирования механизма взаимодействия частицы пыли и капли жидкости в сложном пульсационном движении в газовом потоке.

Постановка задачи. Частицы пыли и капли жидкости находятся в сложном поступательно-вращательном, колебательном движении. Поставим задачу: математически смоделировать и описать процесс пульсационного движения и взаимодействия капель жидкости и частиц пыли в потоке газа, поступающего в гидродинамическую установку для очистки.

Изложение материала и результаты. Для решения вопроса о пульсационном движении капель жидкости и частиц пыли в газовом потоке при однородности их физических параметров целесообразно предположить, что степень подобия определяется двумя факторами – амплитудой и частотой пульсаций компонентов.

Проведём теоретическое исследование трехфазной среды – газового потока с распыленными каплями жидкости и твердыми частицами пыли, с учетом динамических эффектов в пульсирующей газовой среде при различных соотношениях между собственной частотой пульсаций газа и частотой вынуждающих вибраций. Как объект исследования выбираем динамическое состояние капель относительно неинерциальной системы координат.

Для составления уравнений движения рассматриваемой системы введем упрощающие предположения: радиусы капель жидкости малы по сравнению с расстояниями между ними, а сами эти расстояния малы по сравнению с характерными размерами изменения гидродинамических параметров несущей газовой среды; тепловые процессы в капле 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; жидкость и газ считаются идеальными, а вязкость жидкой фазы учитывается в процессах межфазных взаимодействий. Математическая модель задачи строится из рассмотрения состояния единичной капли, а полученные закономерности ее движения переносятся на совокупность всех капель исследуемой системы.

Уравнения поступательных и пульсационных движений капель запишем на основе представлений о многофазной дисперсной смеси. Мгновенные радиусы капель запишем в виде:

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

где Δ_k – амплитуда пульсаций капель;

R_{k0} – невозмущенный радиус капли.

Система уравнений, описывающая поступательные движения и пульсации капель относительно стенок рабочей полости, с точностью до величины второго порядка малости примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_k}{dt} = 2(V_0 - g) - V_k \left[\frac{9\eta}{R_{k0}^2 \rho_{жс}} \left(1 - \frac{2\Delta_k}{R_{k0}} + \frac{3\Delta_k^2}{R_{k0}^2}\right) + \frac{3}{R_{k0}} \Delta_k \left(1 - \frac{\Delta_k}{R_{k0}}\right) \right], \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2 \Delta_k = \chi_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k, V_k \dots), \end{cases} \quad (2)$$

где 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,

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

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

Уравнения (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_k &= 2(g + \dot{V}_{0z}) - 3\dot{Z}_k \left[\dot{\Delta}_k R_{k0}^{-1} (1 - \Delta_k R_{k0}^{-1}) + 3\eta R_{k0}^{-2} \rho_{жс}^{-1} (1 - 2\Delta_k R_{k0}^{-1}) \right], \\ \ddot{\Delta}_k + \omega_k^2 \Delta_k &= V_{0z} R_{k0}^{-1} (h - Z_k) + \Delta_k R_{k0}^{-2} [\dot{V}(Z_k - h) + 3n_k g Z_k] - 1,5 \dot{\Delta}_k R_{k0}^{-1} + \\ &+ 4,5 n_k (n_k + 1) \Delta_k^2 \rho_{жс}^{-1} R_{k0}^{-3} \times \left\{ P_0 + (4,5)^{-1} \sigma [9n_k (n_k + 1) - 4] n_k (n_k + 1)^{-1} R_{k0}^{-1} \right\} - \\ &- 0,25 \dot{Z}_k^2 R_{k0}^{-1} + \Delta_k^2 \dot{V}_{0z} (h - Z_k) R_{k0}^{-3} - 4\eta \dot{\Delta}_k R_{k0}^{-2} \rho_{жс}^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где P_0 - давление в газовом потоке;

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

ω_k - собственная частота пульсаций капли.

$$\omega_k = \left[\frac{3n_k}{\rho_{жс} R_{k0}^2} (P_0 + \rho_{жс} g h + \frac{3n_k - 1}{3n_k} \cdot \frac{2\sigma}{R_{k0}}) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

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

$$Z_k = X_{1k};$$

$$\dot{Z}_k = x_{2k} + 2\alpha\omega \cos \omega t;$$

$$\Delta = x_{3k} \cos \omega_k t + x_{4k} \sin \omega_k t + \frac{a\omega^2(h - x_{1k})}{R_{k0}(\omega_k^2 - \omega^2)} \sin \omega t; \quad (5)$$

$$\dot{\Delta} = \omega_k(x_{4k} \cos \omega_k t - x_{3k} \sin \omega_k t) + \frac{a\omega^3(h - x_{1k})}{R_{k0}(\omega_k^2 - \omega^2)} \cos \omega t.$$

Приведем дифференциальные уравнения (3) к стандартной форме:

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

Пропорциональность правых частей уравнений (6) параметру μ можно обосновать исходя из соображений, касающихся физических характеристик исследуемых движений капель.

После усреднения уравнений (6) по времени получим:

$$X_{1k} = \mu X_{2k};$$

$$X_{2k} = \mu \left[2g - \frac{3a\omega^2(h - X_{1k})}{R_{k0}^2(\omega_k^2 - \omega^2)} - \frac{9X_{2k}\eta}{R_{k0}^2\rho_{жс}} \right];$$

$$X_{3k} = \mu \frac{3gn_k}{2R_{k0}} X_{1k} X_{3k};$$

$$\dot{X}_{4k} = -\mu \frac{3gn_k}{2R_{k0}} X_{1k} X_{4k}. \quad (7)$$

Система уравнений (7) допускает следующие стационарные решения:

$$X_{2k} = 0; \quad x_{3k} = 0; \quad x_{4k} = 0;$$

$$x_{1k} = h - \frac{2gR_{k0}^2(\omega_k^2 - \omega^2)}{3(a\omega^2)^2}. \quad (8)$$

Решения (8) позволяют заключить, что для каждого сорта капель в потоке при определенном вибрационном ускорении могут существовать по координате неустойчивые стационарные уровни (уровни отталкивания), капель, ниже которых капли выпадают из потока.

Запишем решения. (8) для каждой группы капель с учетом (4):

$$\begin{aligned}
 X_{1B} &= h - \frac{2}{\sigma^2} \left\{ n_B A + \frac{1}{3g} \left[\frac{2\sigma(3n_B - 1)}{\rho_{ж} R_{BO}} - R_{BO}^2 \omega^2 \right] \right\}; \\
 X_{1M} &= h - \frac{2}{\sigma^2} \left\{ n_M A + \frac{1}{3g} \left[\frac{2\sigma(3n_M - 1)}{\rho_{ж} R_{MO}} - R_{MO}^2 \omega^2 \right] \right\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

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

Таким образом, в потоке существуют зоны, в которых капли больших размеров оседают. Для создания зоны встречных движений капель больших и малых необходимо выполнить неравенство:

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

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

Найдем максимальный радиус капли группы R_M , для которых выполняется условие (10) и $R_{BO} = 100 R_{MO}$:

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

Быстротечность процессов сжатия и расширения в потоке позволяет предположить о зависимости показателя политропы от размеров капель. Возможны области потока, где капли меньших размеров опускаются, а больших – движутся противоположно. Используя, как неравенство (9), будем иметь:

$$\begin{aligned}
 \omega^2 (R_{BO}^2 - R_{MO}^2) &< 3Ag(n_B - n_M) + \\
 &+ \frac{2\sigma[R_{MO}(3n_B - 1) + R_{BO}(1 - 3n_M)]}{\rho_{ж} R_{BO} R_{MO}}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Следовательно, для каждого сорта капель существуют зоны (области) потока, переменные во времени и координатах, в которых происходит разнонаправленное движение капель перпендикулярное направлению потока. Для повышения качества диспергирования путем распыления жидкой среды, процесс осуществляется в режиме пульсаций.

Использование упругих резонансных свойств газожидкостного потока в гидродинамической установке позволяет обеспечить увеличение амплитуды пульсаций гидродинамического давления, а соответственно и качество распыления без увеличения энергетических затрат. Такой путь повышения эффективности процесса улавливания частиц пыли каплями жидкости без дополнительных генераторов (источников) пульсационных возмущений в потоке является рациональ-

ным и позволяет управлять гидродинамическими характеристиками с целью снижения потерь энергии. Диспергирование жидкости в процессе резонансного пульсационного перемещения в газовом потоке увеличивает концентрацию капель и частоту их столкновений (слияний) с твёрдыми частицами пыли, что повышает эффективность пылеподавления.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. По известному массовому расходу жидкости определяется концентрация капель при условии определенности их масс, которая обеспечивает наибольшую частоту столкновений частиц пыли и капель жидкости.
2. Уравнения пульсационного перемещения и взаимодействия частиц пыли и капель, в которых учитывается концентрация частиц пыли и капель жидкости в потоке при резонансной частоте, позволяют определить необходимый расход жидкости.
3. Реализация резонансного режима пульсаций позволяет увеличить гидродинамическое давление, что повышает эффективность взаимодействия капель жидкости и частиц пыли, а в конечном итоге – КПД газоочистного устройства.

Результаты исследования являются математической основой для дальнейшей разработки методики расчета эффективных гидродинамических установок для подавления пыли.

Список источников.

- 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. – М., 1989. – 421 с.
- 2 Журавлев В.П., Демичева Е.Ф., Спириин Л.А. Методы борьбы с угольной пылью. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1988. – 144 с.
- 3 Поздняков Г.А., Мартынюк Г.К. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях. – М.: Наука, 1983. – 126 с.

Дата поступления статьи в редакцию: 01.11.06