

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОГNETУШАЩИЙ ПОРОШОК

Колибабчук А.А., Касьянов Н.А.,

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск

Разработана математическая модель вибрационного воздействия на огнетушащий порошок при его транспортировании с воздухом для получения конструктивных размеров бункера установки пожаротушения с вибрационной подготовкой.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, истечение, бункер, математическое моделирование, геометрические параметры, выпускное отверстие.

Анализ состояния вопроса. Технический прогресс в любой отрасли промышленности тесно связан с проблемой обеспечения пожарной безопасности. Он неизбежно влечет за собой увеличение риска возникновения пожара и возможного материального ущерба, угрозы для здоровья и жизни людей. За 2010 г. в Украине зарегистрировано 62207 пожаров, что на 41,3% больше, чем в 2009 г. Экономические потери составили 2,31 млрд. грн., из которых прямые материальные убытки достигли 665,4 млн. грн. В течение 2010 г. в Украине ежедневно в среднем возникало 150 пожаров, что на 50 больше, чем в 2009 г., в результате которых погибало 8 и получали травмы 4 человека, а ежедневный экономический ущерб от пожаров составил 6,33 млн. грн. Поэтому вопросы пожарной безопасности промышленных объектов являются важными для хозяйственного комплекса Украины.

В обеспечении пожарной безопасности промышленных объектов важное место занимают установки порошкового пожаротушения. Несмотря на то, что они обладают высокой эффективностью действия, их применение ограничено, так как существует вероятность отказа в работе, достигающая 30%. Отказы происходят вследствие несовершенства схем снабжения рабочим газом и подготовки порошка к транспортированию для устранения его комкования из-за слеживаемости. А для установок с хранением газа под давлением они вызываются утечкой газа из баллонов или резервуара установки. Использование газа под давлением накладывает особые требования к монтажу, техническому обслуживанию и температурному режиму при эксплуатации установок. Это в определенной мере ограничивает их функциональные возможности и область применения. Существующие схемы подготовки порошка не всегда обеспечивают необходимого качества восстановления его текучести, так как после подготовки в нем содержатся включения газовых пузырьков и комков порошка. Это приводит к нарушению параметров его вытеснения из резервуара и транспортирования по трубопроводу, снижает надежность и эффективность действия установки.

Вопросом разработки и совершенствования средств порошкового пожаротушения посвящено большое количество работ, из которых следует отметить исследования Баратова А. Н., Исавнина Н. В., Пашковского П. С., Севрикова В. В., Булгакова Ю. Ф., Кудинова Ю. В., Грекова С. П.,

Костенко В. К., Антонова А. В. Работы Дунюшкина В. А., Сизикова А. А. направлены на совершенствования отдельных узлов установок. Однако наряду с этим структурные схемы подготовки порошка и снабжения рабочим газом не претерпели существенных изменений.

Постановка задачи исследования. В настоящее время используются новые образцы установок порошкового пожаротушения, которые изготовлены по традиционным схемам снабжения рабочим газом и подготовки порошка к транспортированию. В связи с этим, вопросы обеспечения качественной подготовки порошка и безотказной работы установок остаются не до конца решенными. Поэтому исследования по созданию установок порошкового пожаротушения с более совершенными характеристиками технических схем подготовки и транспортирования огнетушащего порошка являются актуальными, что обусловило выбор темы статьи.

Материалы и результаты исследования. На основании выполненного анализа предложен новый принцип построения установок порошкового пожаротушения, в основу которого положена схема вибрационной подготовки и транспортирования порошка центробежной машиной (рис. 1). Основными узлами установки являются центробежная машина и бункер с огнетушащим порошком. Запорный клапан выпускного отверстия бункера приоткрывается при вращении вала рабочего колеса центробежной машины. Под действием вибрации бункера, которая возбуждается дебалансной массой рабочего колеса, происходит разрушение структурных связей в уплотненном порошке. Приведенный в состояние текучести, он вытекает из бункера на рабочее колесо центробежной машины, в межлопаточных каналах которого смешивается с воздухом и под давлением поступает в распылительный насадок или транспортный трубопровод.

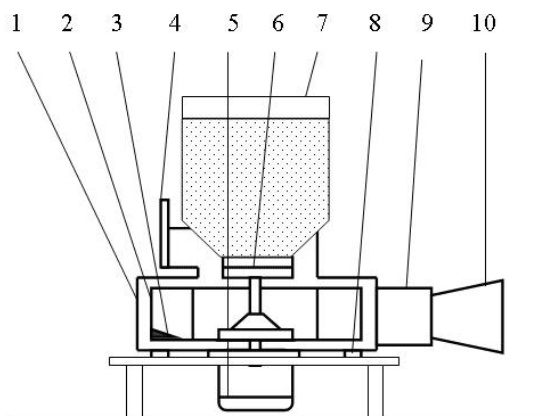


Рисунок 1 – Схема порошковой установки с центробежной машиной:

1 – центробежная машина; 2 – рабочее колесо; 3 – масса дебаланса; 4 – всасывающий патрубок; 5 – электродвигатель; 6 – запорный клапан; 7 – бункер с порошком; 8 – плавающая опора; 9 – нагнетательный патрубок; 10 – распылительный насадок

Известно [1, 2], что мелкофракционные порошковые материалы, к которым относятся и огнетушащие порошки, классифицируются как связные плохо сыпучие материалы. Связность между частицами порошка возникает под действием давления веса вышележащих слоев. Между частицами порошка возникают молекулярные силы сцепления, способствующие упрочнению материала. При уплотнении порошка происходит уменьшение его пористости, воздух из пор частично вытесняется, а объемная масса и количество точек взаимного контакта между частицами порошка увеличивается. Возникшие напряжения приводят к потере подвижности частиц и образованию статического свода над отверстием бункера, что препятствуют истечению порошка. Условием для образования статического свода над отверстием является равновесие сил давления веса и касательных напряжений, воспринимающих вес деформируемого материала. Согласно [3] условие образования свода выражается соотношением

$$d_n \rho g = 4\tau_0 (1 + \sin \varphi), \quad (1)$$

где d_n – предельный диаметр сводообразующего отверстия; ρ – плотность материала; g – ускорение свободного падения, τ_0 – начальное сопротивление сдвигу; φ – угол естественного откоса.

Из (1) следует, что для исключения образования статического свода необходимо, чтобы начальное сопротивление сдвигу было меньше сил давления. Однако для некоторых связных мелкодисперсных материалов это условие не обеспечивает непрерывности истечения, так как возможно возникновение явления зависания материала. При зависании часть материала, расположенного над отверстием истекает, а остальная часть из-за больших сил сцепления между частицами остается неподвижной. При отсутствии образования свода возможны три режима истечения сыпучих материалов [4], из которых наиболее стабильным является гидравлический режим. Для связных мелкодисперсных материалов такой режим истечения без их предварительной подготовки практически невозможен. Поэтому перед подачей уплотненный материал подвергают внешнему силовому воздействию различными способами [5].

Непрерывная подача порошка в очаг горения является одним из показателей надежности и эффективности действия установок при тушении пожаров. Для разрабатываемой установки вопрос обеспечения непрерывности истечения порошка из бункера решается путем восстановления его текучести с использованием вибрационного метода.

Согласно принятой технической модели круговые колебания возбуждаются дебалансной массой, прикрепленной к рабочему колесу центробежной машины. В результате любая точка системы «центробежная машина-бункер» (рис. 2) совершает вибрационные колебания по круговой [6] траектории в горизонтальной плоскости.

Известно, что при круговой вибрации в вертикальной плоскости [7] дисперсный материал в цилиндрических камерах совершает общее и

локальне циркуляційні рухи. Загальне рух матеріалу відбувається в площині, перпендикулярній осі вала вібратора. Локальне руху в шарі загального циркуляційного руху здійснюється внаслідок індивідуального переміщення частинок від зіткнення з вібрируючою поверхнею. Такі рухи виникають при відриві шару матеріалу від вібрируючої поверхні, при цьому матеріал знаходиться в стані вибрикування. Умова відриву шару, без урахування властивостей матеріалу по [7] представляється в вигляді

$$m_2 g < m A \omega^2 \sin \psi, \quad (2)$$

де m_2 – маса матеріалу; m – маса установки; A – амплітуда вібраційних коливань, ω – кутова частота вібраційних коливань, ψ – кут «вибрикування» матеріалу поверхнею стінки.

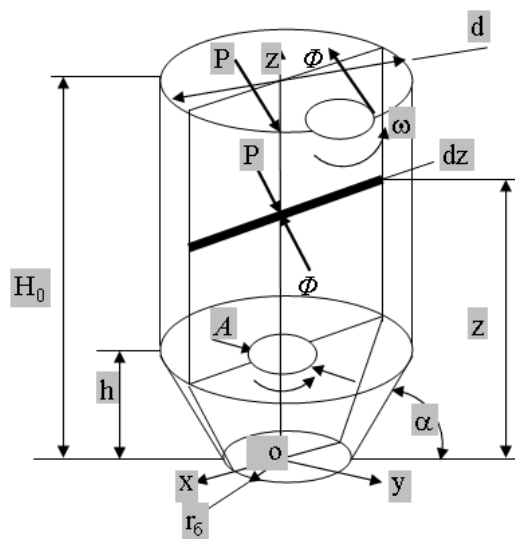


Рисунок 2 – Расчетная схема математической модели процесса вибрационной подготовки порошка

Для разрабатываемой установки условие (2) имеет такой же вид при круговой вибрации бункера в горизонтальной плоскости. Выполнение этого условия является достаточным для разрушения структурных связей между частицами порошка, которое исключает образование свода над отверстием горловины бункера установки.

Вынуждающая сила вибрационных колебаний, передаваемых центробежной машиной бункеру, будет определяться [8, 9] величиной массы дебаланса m_d , ее смещением (эксцентриситетом) относительно оси вращения рабочего колеса δ и угловой скоростью вращения ω последнего

$$F = m_d \delta \omega^2. \quad (3)$$

Для нахождения параметров, входящих в выражение (2), предположим, что на установку наложены такие связи, которые позволяют ей совершать круговые поступательные движения в горизонтальной плоскости. Так как масса дебаланса вращается в горизонтальной плоскости, то в системе неподвижных

горизонтальных координат x и y (рис. 2) колебательное движение установки описывается системой двух дифференциальных уравнений [10]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = m_d\delta\omega^2 \cos \omega t \\ m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = m_d\delta\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (4)$$

где b – коэффициент сопротивления; c – коэффициент жесткости упругих связей.

Для вынужденных установившихся колебаний решение системы дает выражение для определения их амплитуды:

$$A = \frac{m_d\delta\omega^2}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}, \quad (5)$$

где $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – угловая частота собственных колебаний установки, $n = b/2m$ – коэффициент затухания.

Из-за неопределенности параметров ω_0 и n использование формулы (5) не представляется возможным. Из теории колебаний механических систем известно [7, 8], что если $\omega_0 \ll \omega$, то величина подкоренного выражения мало отличается от значения величины ω^4 . Принимая во внимание, что при стационарных вынужденных колебаниях, когда отсутствуют затухающие колебания, коэффициент затухания принимается $n = 0$. Тогда выражение для амплитуды вынужденных колебаний установки принимает вид:

$$A = \frac{m_d\delta}{m}. \quad (6)$$

Если учесть то, что масса установки без порошка равна:

$$m = m_1 + m_d, \quad (7)$$

то уравнение (6) приводится к виду:

$$A = \frac{m_d\delta}{m_1 + m_d}, \quad (8)$$

где m_1 – масса узлов установки.

Для нахождения величины массы дебаланса, закрепленной на рабочем колесе, рассмотрим условия равновесия вибрационных сил инерции и сил давления в слое порошка. Для этого выясним, при каких условиях нарушается равновесие вибрационной силы бункера Φ , действующей на порошок и силы давления порошка P на стенки бункера. Поскольку виброкипение [7] характеризуется отрывом частиц порошка от поверхности, то в этом случае условием нарушения равновесия будет превышение вибрационной силы установки над силой давления порошка, то есть $\Phi > P$.

Вибрационная сила установки равна произведению массы ее узлов m на вибрационное ускорения $A\omega^2$, то есть:

$$\Phi = mA\omega^2. \quad (9)$$

Для нахождения сил давления порошка на стенку бункера установим взаимосвязь между горизонтальными и вертикальными напряжениями в слое порошка. В дисперсных материалах горизонтальные p_r и вертикальные p_v напряжения у стенки бункера связаны между собой зависимостью [11]

$$p_v = \left(\frac{1 - \sin \alpha}{1 + \sin \alpha} \right) p_r, \quad (10)$$

где α – угол естественного откоса для сыпучего материала (угол, образованный конической поверхностью материала с горизонтальной плоскостью).

Так как под воздействием вибрации порошок переходит в состояние виброкипения, то, в силу приобретенной частицами подвижности, угол естественного откоса становится равным нулю и соотношение (10) превращается в равенство горизонтальных p_r и вертикальных сил p_v давления. Поэтому виброкипящий порошок можно рассматривать, как жидкость, а главные напряжения в порошке будут равны силе давления.

Для нахождения сил давления порошка на стенки бункера свяжем их с секущей плоскостью, через ось симметрии oz бункера (рис. 2). Начало отсчета поместим в плоскости выпускного отверстия и направим его вверх. Образованная секущей плоскостью площадь сечения имеет переменную ширину в конической части бункера и постоянную, в цилиндрической части. Выделим в произвольном месте элементарную полоску шириной d и высотой dz с координатой Z . Площадь этой полоски определяется уравнением

$$dS = d dz. \quad (11)$$

Ширина выделенной полоски d в пределах конической части сечения бункера является величиной переменной и определяется выражением

$$d = d_0 + 2z \operatorname{ctg} \alpha, \quad (12)$$

где d_0 – диаметр выпускного отверстия бункера.

Высота конической части бункера равна

$$z_k = \frac{1}{2} (d_u - d_0) \operatorname{tg} \alpha, \quad (13)$$

где d_u – диаметр цилиндрической части бункера.

Элементарная сила давления на выделенную поверхность описывается дифференциальным уравнением

$$dP = \rho g (H_0 - z) d dz. \quad (14)$$

Интеграл дифференциального уравнения (2.55) для сил давления в плоскости сечения конической части бункера с учетом (2.53) имеет вид

$$P_k = \int_0^{z_k} dP = \rho g \int_0^{z_k} (H_0 - z)(d_\sigma + 2z \operatorname{tg} \alpha) dz. \quad (15)$$

После интегрирования (15) и алгебраических преобразований получается выражение:

$$P_k = \frac{1}{2} \rho g (d_u - d_\sigma) \left[H_0 d_u - \frac{1}{12} (d_u - d_\sigma)(d_\sigma + 2d_u) \operatorname{tg} \alpha \right] \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Интеграл дифференциального уравнения (14) для сил давления в плоскости сечения цилиндрической части бункера имеет вид:

$$P_u = \rho g d_u \int_{z_k}^{H_0} (H_0 - z) dz = \frac{1}{2} \rho g d_u (H_0 - z_k)^2, \quad (17)$$

проинтегрировав (17) и выразив z_k через (13), имеем:

$$P_u = \frac{1}{2} \rho g d_u \left(H_0 - \frac{1}{2} (d_u - d_\sigma) \operatorname{tg} \alpha \right)^2. \quad (18)$$

С учетом (9), (16) и (18) условие виброкипения порошка в бункере принимает вид:

$$mA\omega^2 > P_k + P_u. \quad (19)$$

Решая (19) относительно A , получаем выражение для нахождения амплитуды колебаний:

$$A > \frac{P_k + P_u}{m\omega^2}. \quad (20)$$

С учетом ранее найденной амплитуды колебаний (6) неравенство (20) приводится к виду:

$$\frac{m_d \delta}{m_1 + m_d} > \frac{P_k + P_u}{m\omega^2}. \quad (21)$$

Разрешая его относительно массы дебаланса m_d и, учитывая равенство (7), получаем выражение для ее определения:

$$m_d > \frac{P_k + P_u}{\delta \omega^2}. \quad (22)$$

Выводы. В результате выполненного исследования получены выражения, позволяющие из количественных соотношений амплитуды колебаний и дебалансной массы, определять конструктивные параметры установки пожаротушения с вибрационной подготовкой и подачей огнетушащего порошка центробежной машиной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В. М. Черкасский – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Быков С. А. Разработка импульсного огнетушителя для дальнего распыления огнетушащих веществ: Дис. ... канд. техн. наук: 26.06.02. / Быков Сергей Антонович. – Харьков, 2001. – 228 с.
3. Вибрации в технике : справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. М. Челомей – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под. ред. Э. Э. Левендела, 1981. – 509 с.
4. Зенков Р. Л. Машины непрерывного транспорта / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов – М. : Машиностроение, 1987. – 432 с.
5. Алферов К. В. Бункерные установки / К. В. Алферов, Р. Л. Зенков – М. : Машгиз, 1965. – 308 с.
7. Колибабчук А. А. Вибрационное восстановление текучести огнетушащего порошка в установках порошкового тушения с бункерным питателем / А. А. Колибабчук // Вестник ВНУ им. В. Даля. – Луганск, 2004. – № 12. – С. 109-117.
8. Членов В.А. Виброкипящий слой / В. А. Членов, Н. В. Михайлов – М. : Наука, 1972. – 343 с.
9. Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники / И. И. Быховский. – М. : Машиностроение, 1963. – 363 с.
10. Бауман В. А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. И. Быховский – М. : Высшая школа, 1977. – 256 с.
11. Колибабчук О. О. Удосконалення експлуатаційних характеристик установок пожежогасіння / О. О. Колибабчук, М. А. Касьянов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – №6 (124). – Ч. 2. – С. 63-68.
12. Рогинский Г. А. Дозирование сыпучих материалов / Г. А. Рогинский – М. : Химия, 1978. – 173 с.

Колібабчук О.О., Касьянов М.А. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ВОГНЕГАСНИЙ ПОРОШОК

Розроблено математичну модель вібраційного впливу на вогнегасний порошок при його транспортуванні з повітрям для одержання конструктивних розмірів бункеру установки пожежогасіння з вібраційною підготовкою

Ключові слова: вогнегасний порошок, витікання, бункер, математичне моделювання, геометричні параметри, випускний отвір.

Kolibabchuk A.A., Kas'yanov N.A. DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF OSCILLATION INFLUENCE ON FIREEXTINGUISHING POWDER

The mathematical model of oscillation influence is developed on fire extinguishing powder of transportation with the air for obtaining of the constructive sizes of the bunker installation of fire extinguishing with vibrational preparation.

Keywords: fire extinguishing powder, the expiration, bunker, mathematical modeling, geometrical parameters, final aperture.