Мицык А.В.

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

УДК 621.9.048

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРООБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ДАВЛЕНИЯ ГРАНУЛ И ДЕТАЛЕЙ

Одержано теоретичний вираз впливу частоти та амплітуди коливань контейнера, грануляції робочого середовища на величину її тиску на оброблювані поверхні виробів.

The theoretical expression of the effect of frequency and amplitude of vibrations of reservoir, granulation of the working medium on the value of its pressure on to processed surfaces of the product has been obtained.

В основу физической сущности процесса виброобработки положено, что помещенная в контейнер совместно с обрабатываемыми изделиями рабочая среда воздействует на обрабатываемые изделия в результате колебательного движения контейнера [1, 2].

Для описания характера воздействия гранул среды на обрабатываемую поверхность изделия необходимо выявить зависимости давления гранул среды на поверхность изделия от амплитуды и частоты колебаний, а также от размера самой гранулы.

Определим физический смысл величины n, характеризующейся количеством соударений гранул. Она представляет собой отношение длины L пути циркуляционного движения, на котором гранулы среды передают энергию (при этом часть энергии теряется), к длине l свободного пробега гранулы. При оценке коллективного давления гранул на обрабатываемую поверхность за величину L можно принять кратчайшее расстояние от рабочей поверхности контейнера до поверхности изделия. Для вычисления длины свободного пробега гранулы воспользуемся соотношением $l=\dfrac{1}{4\sqrt{2}\pi\nu R^2}$ [3, 4].

Концентрацию гранул среды определим зависимостью $\nu=\dfrac{r}{4\pi R^3/3+F_{\text{ñäâ}}E_n}$, где r - коэффициент укладки гранул, $r=0,66$. Согласно уравнению Ван-дер-Ваальса, зависимость между давлением P, объемом - υ и температурой T^* определяется выражением:

$$\left(P-P_0\right)\left(\upsilon-b\right)=N_A k_B T^*, \qquad (1)$$

где P_0 - внутреннее давление; N_A - число Авогадро (*A. Avogadro*); k_B - постоянная Больцмана (*L.E. Boltzman*).

Для определения концентрации гранул среды необходимо установить отношение $\dfrac{N_A}{\upsilon}=\nu$. Из (1) следует, что $\upsilon=\dfrac{N_A k_B T^*}{P-P_0}+b$, а, следовательно: $\nu=\dfrac{1}{k_B T^*/\left(P-P_0\right)+b/N_A}$. Применительно к виброобработке, когда рассматривается взаимодействие твердых гранул среды, $b=\dfrac{4\pi R^3 N_A}{3r}$. Используя выражение $\left\langle V\right\rangle=\sqrt{3k_B T^*/m}$, установим соответствие: $k_B T^*=\dfrac{m\left\langle V\right\rangle^2}{3}=\dfrac{4\pi R^3\rho\left\langle V\right\rangle^2}{9}$, где ρ - плотность материала гранулы рабочей среды. Из этого следует, что соотношение, определяющее число соударений гранул на длине L пути их движения, имеет вид:

$$\frac{L}{l}=\frac{3\sqrt{2}Lr}{R\left(1+\dfrac{4\pi^2A^2\omega^2\rho r}{3\left(P-P_0\right)}\right)}, \qquad (2)$$

где $\left\langle V\right\rangle = 4\pi^2 A^2\omega^2$. Таким образом, среднеквадратичная скорость гранулы принимается равной скорости движения рабочей поверхности контейнера.

Из выражения (2) концентрацию гранул определим соотношением:

$$\nu = \frac{3r}{4\pi R^3\left(1+CA^2\omega^2\right)}, \qquad (3)$$

где $C = \dfrac{4\pi^2\rho r}{3\left(P-P_0\right)}$. Вычисление константы C с помощью принятой теории не дает точного значения, так как уравнение Ван-дер-Ваальса описывает состояние кинетики гранул при виброобработке только качественно. Согласно Международной системе единиц (СИ) $C \approx 100...300$. Константа C пропорциональна величине отношения плотности материала гранул к давлению, создаваемому ими при циркуляционном движении, и не зависит от плотности материала гранулы. Выражение потери кинетической энергии $\left\langle \Delta E_L\right\rangle$ гранул среды на длине L пути их циркуляционного движения можно записать в виде:

$$\left\langle \Delta E_L\right\rangle = \left\langle E_0\right\rangle\left(1-\varepsilon\right)^{\frac{3\sqrt{2}Lr}{R\left(1+CA^2\omega^2\right)}}. \qquad (4)$$

При виброобработке величина давления, создаваемая гранулами среды в контейнере, пропорциональна произведению концентрации гранул на их среднюю кинетическую энергию. При изучении процессов, сопровождающих виброобработку, рассматриваемое давление пропорционально силе взаимодействия гранул среды и изделий при их соударении.

Эта сила прямо пропорциональна изменению скорости гранул в направлении, перпендикулярном плоскости обрабатываемой поверхности изделия, и обратно пропорциональна времени их соударения. Время соударения является функцией физико-механических свойств материала гранулы, ее массы и не зависит от ее скорости. Таким образом, величины сил соударения, а следовательно, и давления пропорциональны скорости циркуляционного движения гранул:

$$\left\langle P_{imp}\right\rangle = \left\langle P_{imp_0}\right\rangle\left(1-\varepsilon\right)^{\frac{3\sqrt{2}Lr}{2R\left(1+CA^2\omega^2\right)}}, \qquad (5)$$

где P_{imp} - давление гранул в любой точке объема контейнера; P_{imp_0} - давление гранул в любой точке у рабочей поверхности контейнера.

Выражения (4) и (5) показывают влияние амплитуды и частоты колебаний контейнера, размера гранулы среды, расстояния от рабочей поверхности контейнера до обрабатываемой поверхности изделия на диссипацию энергии рабочей среды.

Механизм распространения импульса от рабочей поверхности контейнера вглубь среды имеет свои особенности [1]. Гранулы среды теряют энергию при соударениях друг с другом и с обрабатываемой поверхностью изделия, что объясняется наличием трения. Отличия величин импульсов, передаваемых гранулами у рабочих поверхностей контейнера и на удалении от них, восполняются эффектами переноса импульса, который пропорционален произведению концентрации гранул и средней скорости потоков среды. Исходя из этого, выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$\left\langle P_{imp}\right\rangle = \frac{C_p rA\omega}{\left(1+CA^2\omega^2\right)}\left(1-\varepsilon\right)^{\frac{3\sqrt{2}Lr}{2R\left(1+CA^2\omega^2\right)}}. \qquad (6)$$

В выражении (6) учтен процесс распространения импульса в рабочей среде и диссипация кинетической энергии гранул при их соударениях как между собой, так и с обрабатываемым изделием.

Современные конструкции вибростанков для отделочно-зачистной обработки оснащены контейнерами, рабочие поверхности которых футерованы износостойкими кислото- и щелочестойкими материалами, например, резиновыми пластинами повышенной твердости, полиуретаном, а также пластмассой [5].

В процессе обработки гранулы колеблющейся среды активно контактируют с рабочими поверхностями контейнера, вследствие чего проявляются упругие свойства их футеровки. Смоделировать этот процесс можно, приняв, что резина, взаимодействуя с гранулой среды, ведет себя аналогично пружине с жесткостью j. Футеровка стенки колеблющегося контейнера воздействует на помещенную в него рабочую среду с силой $F = j_f\Delta x$ (рис. 1), где j_f - коэффициент жесткости резины, Δx_f - величина сжатия резины. Одновременно стенка колеблющегося контейнера действует на резиновую облицовку с другой стороны. Колебания стенки подчиняются закону $x = A\sin 2\pi\omega t$, где A, ω, соответственно, амплитуда и частота колебаний контейнера.

Величина сжатия резины определяется как $\Delta x_f = x_f - A\sin 2\pi\omega t$. Тогда уравнение движения гранулы среды можно записать в виде:

$$m\ddot{x} = -kx + Ak\sin 2\pi\omega t\,. \tag{7}$$

Общее решение уравнения (7) имеет вид $x_o = B\sin\omega_0 t + d_f + R$, где $\omega_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ - частота собственных колебаний системы «футеровка - гранула», m - масса гранулы среды, d_f - толщина резиновой облицовки стенки контейнера, R - радиус гранулы среды. Частное решение, учитывающее воздействие вынуждающей силы инерционного填 вибровозбудителя вибростанка, имеет вид - $x_{\div} = \frac{A\sin 2\pi\omega t}{1-\omega^2/\omega_0^2}$. Полное решение уравнения (7) с учетом начального условия $\ddot{x}(0) = V_0$ является суммой общего и частного решений:

$$x = \frac{A\sin 2\pi\omega t}{1-\omega^2/\omega_0^2} + \left(\frac{V_0}{2\pi\omega t} - A\frac{\omega}{\omega_0}\cdot\frac{1}{1-\omega^2/\omega_0^2}\right)\cdot\sin 2\pi\omega_0 t + d_f\,. \tag{8}$$

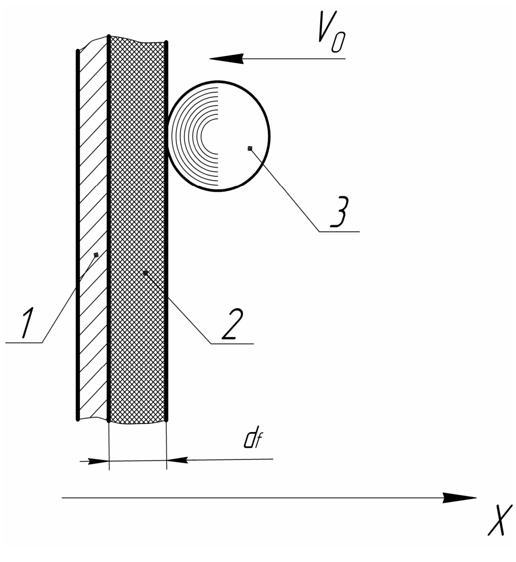

Рис. 1. Схема взаимодействия рабочей поверхности контейнера с гранулой рабочей среды: 1 – металлическая стенка контейнера; 2 – резиновая облицовка стенки контейнера; 3 – гранула рабочей среды

Для определения зависимости давления гранулы среды на обрабатываемую поверхность изделия от размера гранулы установим скорость V ее движения в циркуляционных потоках среды. Она будет следующей:

$$V = \ddot{x} = \frac{2\pi A\omega\cos 2\pi\omega t}{1-\omega^2/\omega_0^2} + \left(V_0 - A\omega\frac{2\pi}{1-\omega^2/\omega_0^2}\right)\cos 2\pi\omega_0 t\,, \tag{9}$$

где ω, ω_0 - частота вынужденных и собственных колебаний контейнера.

В решении (9) интерес представляет часть времени периода колебаний, в течение которого гранула совершает совместное движение со стенкой контейнера и под ее воздействием набирает скорость. Далее гранула отрывается от стенки, и начинается их раздельное движение, которое во внимание не принимается. Результаты расчетов согласно выражению (9) для различных соотношений частот ω/ω_0 представлены графически (рис. 2).

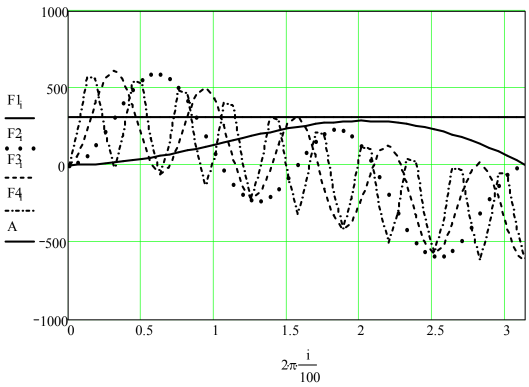

Рис. 2. Скорость движения гранулы среды в течение периода колебаний

Для кривых: $F1$ $\omega/\omega_0 = 1000$; $F2$ $\omega/\omega_0 = 0{,}2$; $F3$ $\omega/\omega_0 = 0{,}1$; $F4$ $\omega/\omega_0 = 0{,}05$. По мере увеличения жесткости резиновой облицовки контейнера скорость гранулы в момент отскока первоначально возрастает, а затем снижается. Максимум скорости достигается при соотношении $\omega/\omega_0 \approx 0{,}1$.

При работе вибростанка происходит периодическое воздействие стенок контейнера на контактирующие с ними гранулы рабочей среды. Время диссипации энергии гранулы определяется числом ее соударений, при которых она теряет большую часть своей энергии, и средней скоростью движения среды в контейнере. Как следует из графиков (рис. 3), 90 % потери энергии происходит после 34…40 соударений. При длине свободного пробега гранулы, составляющей $1/3$ ее радиуса (~0,004 м), и при скорости движения гранулы, превышающей 0,5 м/с, время диссипации энергии превышает 0,3…0,4 с, что на порядок превосходит период колебаний контейнера, равный 0,04 с при частоте колебаний 25 Гц и 0,02 с при частоте 50 Гц.

Следовательно, при возрастании частоты колебаний контейнера происходит накопление энергии гранул до некоторого значения, когда в движение приходит все содержимое контейнера, а энергия, подводимая к нему в единицу времени, станет равной мощности, затрачиваемой на обработку изделия, потери энергии на трение и нагрев. Это оправдывает применение законов механического резонанса колебательной системы к данному случаю.

Величина средней скорости движения гранулы в установившемся режиме может быть оценена выражением (9). Коэффициент $k(\omega) = \dfrac{1}{\left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)}$, связанный с явлением резонанса, в обоих слагаемых определяет нелинейный рост скорости гранулы среды при линейном возрастании частоты колебаний.

В случае, когда $\omega_0 >> \omega$, скорость V гранулы при соударении со стенкой, происходящем в начальном периоде колебаний системы «футеровка – гранула», станет равной, $V \approx \dfrac{2\pi A\omega}{\left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)}$ не зависимо от своей скорости до соударения. Перемещение гранулы среды в течение времени соударения, как видно из решения (8) уравнения (7) движения гранулы, будет значительно меньше амплитуды колебаний контейнера, то есть $x \approx \dfrac{A\omega\pi}{2\omega_0\left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)}$.

Как указывалось выше, энергия, а значит и скорость гранулы, будет возрастать по мере увеличения частоты в течение нескольких периодов колебаний. Следовательно, импульс гранулы будет пропорционален величине $k^2(\omega) = \left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)^{-2}$. Таким образом, в выражении (6), должен быть учтен коэффициент $k(\omega)$, что приводит к следующей зависимости:

$$\left\langle P_{imp} \right\rangle = \frac{P_0 r A\omega}{\left(1+CA^2\omega^2\right)\left(1-\omega^2/\omega_0^2\right)^2}\left(1-\varepsilon\right)^{\frac{3\sqrt{2}Lr}{2R\left(1+CA^2\omega^2\right)}}. \qquad (10)$$

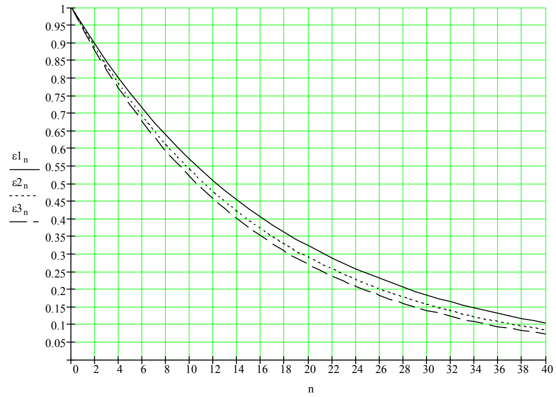

Рис. 3. Зависимость величины ε потери энергии от числа n соударений гранул

Используя формулу $m = \dfrac{4}{3}\pi R^3 \rho$ (ρ - плотность материала гранулы) для определения массы гранулы и выражение (10), можно записать:

$$\left\langle P_{imp} \right\rangle = \frac{P_0 r A\omega}{\left(1+CA^2\omega^2\right)\left(1-\dfrac{\omega^2 R^3}{\omega_0^2 R_0^3}\right)^2}\left(1-\varepsilon\right)^{\frac{3\sqrt{2}Lr}{2R\left(1+CA^2\omega^2\right)}}, \qquad (11)$$

где $R_0 = \left(3\pi k/\rho\omega_0^2\right)^{-\frac{1}{3}}$ некоторый эффективный радиус.

Полученное теоретическим путем выражение (11) с учетом влияния силы трения при соударении гранул рабочей среды, а также с учетом упругого взаимодействия системы «футеровка – гранула» в колеблющемся контейнере вибростанка в достаточной степени определяет влияние таких параметров технологического процесса виброобработки, как частота и амплитуда колебаний контейнера, а также размер гранул рабочей среды, на величину давления, оказываемого гранулами на обрабатываемые поверхности изделия.

Литература

1. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / [Карташов И. Н., Шаинский М. Е., Власов В. А. и др.] – К.: Высшая школа, 1975. – 188 с.