

ВЫБОР АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ НЕОБХОДИМОГО КРИТЕРИЯ РАБОТЫ

А. В. Сартаков

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Предложена методика расчёта амплитудно-частотных характеристик вибрационных измельчителей с позиций теории вибрационных колебаний и теории удара. Получены уравнения для определения скоростей движения мелющих тел в загрузке мельницы.

Ключевые слова: Измельчение, виброизмельчители, внутримельничная загрузка, шаровые слои.

Вибрационные измельчители широко используются для тонкого и сверхтонкого измельчения строительных материалов с различными свойствами благодаря возможности настройки их рабочих режимов. Однако их работа должна чётко сочетаться с необходимыми условиями (критериями) обработки.

Одним из таких критериев является кинематическое обоснование процесса измельчения, которое связано с расчётом критических скоростей, необходимых для измельчения частиц с учётом свойств материала.

В [1-3] она рассчитывается согласно теории Герца:

Для случая соударения частицы с мелющим телом

$$v_{кр}^I = \left[\frac{3 \cdot g^{\frac{3}{5}} \cdot (\delta_1 + \delta_2)^{\frac{2}{5}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2}{2^{\frac{4}{5}} \cdot 5^{\frac{3}{5}} \cdot \pi^{\frac{1}{5}} \cdot \rho^{\frac{3}{5}}} \cdot \left(1 + \frac{R^3 \cdot \rho}{r^3 \cdot \rho_0}\right)^{\frac{3}{5}} \cdot \left(1 + \frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{5}} P_{T.нр} \right]^{\frac{5}{6}},$$

(для случая соударения 2-х мелющих тел о защемлённую частицу)

$$v_{кр}^{II} = \left[\frac{3 \cdot 2^{\frac{9}{2}} \cdot g^{\frac{3}{5}} \cdot (\delta_1 + \delta_2)^{\frac{2}{5}} \cdot \pi^{\frac{4}{5}}}{5^{\frac{8}{5}} \cdot \rho^{\frac{3}{5}}} \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(1 + \frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{5}} P_{T.нр} \right]^{\frac{5}{6}},$$

где $P_{T.нр}$ – предельное напряжение (выносное, упругое, пластическое, технический предел прочности),

$$\delta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 \cdot \pi}, \quad \delta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 \cdot \pi},$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона мелющего тела, измельчаемой частицы; E_1, E_2 – модули Юнга; R, r – радиусы мелющего тела и измельчаемой частицы; ρ_1, ρ_0 – удельные веса мелющего тела и измельчаемой частицы; g – ускорение свободного падения.

Реальная скорость измельчения находится в диапазоне ($v_{кр}^I, v_{кр}^{II}$).

В [4] была получена зависимость определения скорости разрушения, которая имеет вид

$$V_p = \frac{K_m \rho^* \cdot S_i \cdot T \cdot \ell_i \cdot e_i}{0,42 \cdot N_t \cdot t / T},$$

где S_i – удельная поверхность обрабатываемого материала; N_t – теоретическая потребляемая мощность для разрушения идеально твердого тела по Гриффитсу; t – время измельчения; K_m – молярная концентрация вещества; ρ^* – удельная плотность дислокаций; ℓ_i – средний линейный размер разрушаемых частиц; e – степень измельчения; T – температура среды.

Указанная зависимость позволяет определить скорость разрушения материала, исходя из более реальных условий, так как здесь учитываются многие характеристики, полно раскрывающие процесс измельчения.

Формирование и образование трещин (ρ^*), дисперсно-механические свойства вещества (S_i, l_i), химические (K_m) и тепловые (T) свойства, что в конечном счете позволит рассчитать скорость более точно.

Расчёт скоростей движения в самом измельчительном аппарате представляет определённую сложность из-за хаотичности, многократности столкновения друг с другом мелющих тел.

В связи с этим была предложена математическая модель движения мелющих тел в вибрационной мельнице. В основу модели было заложено изучение двух систем движения:

- 1) внешней системы (движение аппарата);
- 2) внутренней системы (движение в корпусе аппарата).

Для типового виброизмельчителя была составлена система дифференциальных уравнений вибрационных колебаний, решение которой имеет вид

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{m_0 r w^2}{(m_1 + m_0) w^2} \cos(wt - \varphi_x); \\ y &= \frac{m_0 r w^2}{c - (m_1 + m_0) w^2} \sin(wt - \varphi_y), \end{aligned} \right\},$$

где m_0 – масса дебаланса; r – эксцентриситет массы относительно оси вращения; ω – угловая скорость дебаланса; m_1 – масса колеблющейся системы.

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= 0, \varphi_y = 0, \text{при } \sqrt{\frac{c}{m_1 + m_0}} > w; \\ \varphi_y &= \pi, \text{при } \sqrt{\frac{c}{m_1 - m_0}} < w, \end{aligned} \right\},$$

$$c = 8 \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{3 \cdot d^2 \cdot E}{[2 \cdot (2 + \eta) \cdot H^2 + 3 \cdot D^2]},$$

где d – диаметр прутка пружины; E – модуль упругости; D – средний диаметр наковки пружины; μ – коэффициент Пуассона; H – высота пружины [5].

Окончательно скорость движения вибрационного аппарата можно записать

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \dot{x} = -\frac{m_0 r w}{(m_1 + m_0)} \sin(wt - \varphi_x); \\ V_y &= \dot{y} = \frac{m_0 r w^3}{c - (m_1 + m_0) w^2} \cos(wt - \varphi_y), \end{aligned} \right\}.$$

Далее рассматривается внутренняя система (движения мелющих тел в корпусе аппарата).

Несмотря на то, что, на движение слоя будут влиять характеристики взаимодействия его отдельно взятых шаров, допускается, что скорость всего слоя постоянна и зависима от характеристик удара стенки корпуса виброизмельчителя. Очередной слой мелющих тел будет передавать скорость колебаний следующему неподвижному слою с меньшей скоростью, таким образом, по мере удаления мелющих шаров от стенки барабана, энергия колебаний от слоя к слою будет затухать.

Рассмотрим перемещение наружного слоя шаров в вибрирующем корпусе (рисунок 1). Его движение будет осуществляться за счет взаимодействия с вибрирующими стенками аппарата. В данном случае ограничимся его рассмотрением в одной плоскости движения (XY), т.е. в плоскости вибрации. Тело, находясь в этой плоскости под действием колебательных импульсов и сил тяжести, будет совершать циклические круговые колебания вдоль рассматриваемой плоскости, многократно ударяясь и сталкиваясь с вибрирующей стенкой аппарата.

При этом движение шара будет характеризоваться 3-мя степенями свободы, т.е.:

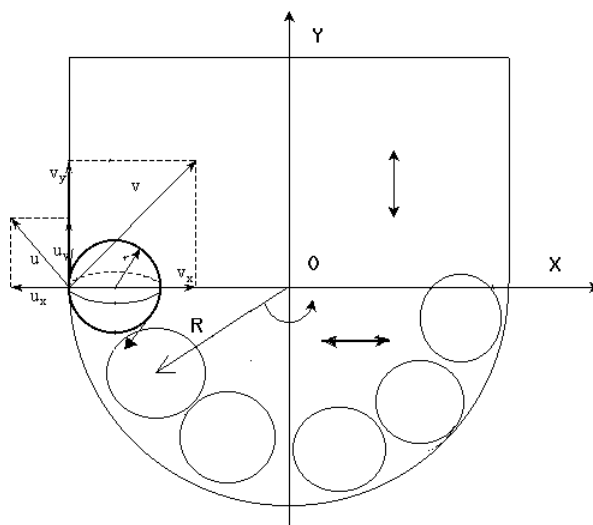


Рисунок 1 – Взаимодействие слоя мелющих тел с вибрирующей плоскостью

ВЫБОР АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ НЕОБХОДИМОГО КРИТЕРИЯ РАБОТЫ

- 1) Движение вдоль оси X;
- 2) Движение вдоль оси Y;
- 3) Вращательное движение относительно плоскости XY.

Соударение шаров с вибрирующей плоскостью для поступательного и вращательного движений запишется через теорему сохранения импульсов

$$\left. \begin{aligned} m_1 u_1 + m_2 u_2 &= m_1 v_1 + m_2 v_2; \\ I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 &= I_1 \omega_1' + I_2 \omega_2', \end{aligned} \right\}$$

где m_1, m_2 – массы шарового слоя и вибрирующей плоскости; I_1, I_2 – моменты инерции соударяемых тел; $u_1, u_2, \omega_1, \omega_2$ – доударные скорости при поступательном и вращательном движениях; $v_1, v_2, \omega_1', \omega_2'$ – послеударные скорости при поступательном и вращательном движениях.

Система уравнений недостаточно описывает скорости при ударе, т.к. здесь не отражается характер удара.

Используя гипотезы Ньютона и гипотезу сухого трения, можно записать

$$\left. \begin{aligned} v_{1x} &= \frac{(m_1 - f \cdot m_2) \cdot u_{1x} + m_2 \cdot (1 + f) \cdot u_{2x}}{m_1 + m_2}; \\ v_{2x} &= \frac{m_1 \cdot (1 + f) \cdot u_{1x} + (m_2 - f \cdot m_1) \cdot u_{2x}}{m_1 + m_2}; \\ v_{1y} &= \frac{(m_1 - R \cdot m_2) \cdot u_{1y} + m_2 \cdot (1 + R) \cdot u_{2y}}{m_1 + m_2}; \\ v_{2y} &= \frac{m_1 \cdot (1 + R) \cdot u_{1y} + (m_2 - R \cdot m_1) \cdot u_{2y}}{m_1 + m_2}; \\ \omega_1' &= \frac{(I_1 - f \cdot I_2) \cdot \frac{u_{1x}}{\rho_{ш}} + I_2 \cdot (1 + f) \cdot \frac{u_{2x}}{\rho_{ш}}}{I_1 + I_2}; \\ \omega_2' &= \frac{I_1 \cdot (1 + f \cdot \frac{u_{1x}}{\rho_{ш}}) + (I_2 - f \cdot I_1) \cdot \frac{u_{2x}}{\rho_{ш}}}{I_1 + I_2} \end{aligned} \right\},$$

где R – коэффициент восстановления; f – коэффициент сухого трения; $\rho_{ш}$ – радиус слоя шаровой загрузки.

В то же время, учитывая условия вибрационного перемещения, можно записать общее уравнение для движения шаров в колебательной плоскости

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{m_1(1+f)}{m_1+m_2} \cdot \left(-\frac{m_0 r w}{(m_1+m_0)} \cdot \sin(wt - \varphi_x) \right) + \\ &+ \frac{(m_2 - f \cdot m_1) \cdot u_{2x}}{m_1 + m_2}; \\ v_y &= \frac{m_1 \cdot (1+R)}{m_1 + m_2} \cdot \\ &\cdot \left(-\frac{m_0 \cdot r \cdot w^3}{c - (m_1 + m_0) \cdot w^2} \cos(w \cdot t - \varphi_x) \right) + \\ &+ \frac{(m_2 - R \cdot m_1) \cdot u_{2y}}{m_1 + m_2}; \\ \omega_1' &= \frac{I_1 \cdot (1+f)}{m_1 + m_2} \cdot \\ &\cdot \left(-\frac{m_0 \cdot r \cdot w}{\rho_{ш} \cdot (m_1 + m_0)} \cdot \sin(w \cdot t - \varphi_x) \right) + \\ &+ \frac{(I_2 - f \cdot I_1) \cdot \frac{u_{2x}}{\rho_{ш}}}{m_1 + m_2} \end{aligned} \right\},$$

где m_1, m_2 – массы виброплоскости и шарового слоя; U_1, U_2 – начальные скорости движения шарового слоя.

Вышеуказанная система через амплитуду колебаний корпуса мельницы выразится

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{m_1(1+f)}{m_1+m_2} \cdot (-A_x w \cdot \sin(wt - \varphi_x)) + \\ &+ \frac{(m_2 - f \cdot m_1) \cdot u_{2x}}{m_1 + m_2}; \\ v_{1y} &= \frac{m_1(1+R)}{m_1 + m_2} \cdot (A_y w \cdot \cos(wt - \varphi_y)) + \\ &+ \frac{(m_2 - R \cdot m_1) \cdot u_{2y}}{m_1 + m_2}; \\ \omega_1' &= \frac{I_1 \cdot (1+f)}{m_1 + m_2} \cdot \left(-\frac{A_x}{\rho_{ш}} \cdot \sin(wt - \varphi_x) \right) + \\ &+ \frac{(I_2 - f I_1) \cdot \frac{u_{2x}}{\rho_{ш}}}{m_1 + m_2} \end{aligned} \right\},$$

где A_x, A_y – амплитуды колебаний вдоль осей вибрирующей плоскости.

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \frac{m_0 r w^2}{(m_1 + m_0) w^2}; \\ A_y &= \frac{m_0 r w^2}{c - (m_1 + m_0) w^2} \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, были получены уравнения движения слоя шаров в плоскости вибрации, учитывающие амплитудно-частотные характеристики вибрирующего органа, условия удара, массу и размеры мельющих тел (шаров).

Аналогично эти зависимости будут прослеживаться при единичном столкновении 2-х шаровых слоёв, т.е. согласно условиям удара, можно записать систему и для этого случая

$$\left. \begin{aligned} v_{1x} &= \frac{(m_1 - f m_2)}{m_1 + m_2} \cdot (-A_{x1} w \cdot \sin(wt - \varphi_x)) + \\ &+ \frac{m_1(1+f)}{m_1 + m_2} \cdot (-A_{x2} w \cdot \sin(wt - \varphi_x)); \\ v_{1y} &= \frac{(m_1 - R m_2)}{m_1 + m_2} \cdot (A_{y1} w \cdot \cos(wt - \varphi_y)) + \\ &+ \frac{m_2(1+R)}{m_1 + m_2} \cdot (A_{y2} w \cdot \cos(wt - \varphi_y)); \\ v_{2x} &= \frac{m_1(1+f)}{m_1 + m_2} \cdot (-A_{x2} w \cdot \sin(wt - \varphi_x)) + \\ &+ \frac{(m_2 - f m_1)}{m_1 + m_2} \cdot (-A_{x1} w \cdot \sin(wt - \varphi_x)); \\ v_{2y} &= \frac{m_1(1+R)}{m_1 + m_2} \cdot (A_{y1} w \cdot \cos(wt - \varphi_y)) + \\ &+ \frac{(m_2 - R m_1)}{m_1 + m_2} \cdot (A_{y2} w \cdot \cos(wt - \varphi_y)); \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} w_1' &= \frac{(I_1 - f \cdot I_2) \cdot \frac{(-A_{x1} w \cdot \sin(wt - \varphi_x))}{\rho_{u1}}}{I_1 + I_2} + \\ &+ \frac{I_2 \cdot (1+f) \cdot \frac{(-A_{x2} w) \cdot \sin(wt - \varphi_x)}{\rho_{u2}}}{I_1 + I_2}; \\ w_2' &= \frac{I_1 \cdot (1+f) \cdot \frac{(-A_{x1} w \cdot \sin(wt - \varphi_x))}{\rho_{u1}}}{I_1 + I_2} + \\ &+ \frac{\left(I_2 - f I_1 \cdot \frac{(-A_{x2} w) \cdot \sin(wt - \varphi_x)}{\rho_{u2}} \right)}{I_1 + I_2} \end{aligned} \right\}$$

где $A_{x1}, A_{x2}, A_{y1}, A_{y2}$ – амплитуды колебаний 1-го и 2-го соударяемых шаровых слоёв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников, П. Ф. Методы расчета параметров усталостного виброизмельчения / П. Ф. Овчинников // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. – 1989, Вып. 20. – С. 77-81.
2. Овчинников, П. Ф. Расчет зон изменения параметров вибрации при тонком измельчении / П. Ф. Овчинников, Н. Д. Орлова, Х. И. Гаврильченко // Теор. Основы хим. Технологии. – 1987. – Т. 21. – № 3. – С. 418-422.
3. Овчинников, П. Ф. Виброреология / П. Ф. Овчинников. – Киев. : Наука думка, 1983. – 270с.
4. Веригин, Ю. А. Теоретические основы процессов активации тонких сред при их измельчении и смешении / Ю. А. Веригин // «Вибротехнология-91»: Всесоюз. Научн. Шк. По смешению материалов и сред, 22-29 сентября 1991, г. Одесса: Конспекты лекций, ч.3. – 1991. – С. 15-22.

Сартаков А.В. – к.т.н., доцент кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: sartakov_1974@mail.ru.