



Надутый В. П.

Лапшин Е. С.

Хмеленко И. П.

*Институт
геотехнической
механики
им. Н. С. Полякова
НАН Украины*

УДК 622.74:621.928.235

ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОУДАРНОГО ГРОХОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА БИНАРНОЙ ЛОГИТ РЕГРЕССИИ

Результати чисельних експериментів по вивченню впливу конструктивних і динамічних параметрів грохота на віброударний режим описані за допомогою логіт регресійної моделі.

Results of numerical experiments on study of effect of constructive and dynamic parameters of the screen on a vibroimpact condition are presented by means of logit regression sample pieces.

В связи с ухудшением сырьевой базы и резким удорожанием энергоносителей возрос интерес к совершенствованию вибрационных грохотов. Особенно это касается грохотов, предназначенных для тонкой классификации влажного сырья. Все большее применение получают виброударные режимы, которые позволяют увеличить эффективность грохочения за счет повышения ускорения и расширения спектра частот возбуждения сыпучего сырья.

В ИГТМ НАН Украины ведутся экспериментальные и теоретические исследования, направленные на создание виброударных грохотов. В работах [1–4] получены аналитические и численные решения задачи о виброударном движении сита. Несмотря на конструктивную простоту грохотов этого типа реализация виброударного режима возможна только при определенных сочетаниях конструктивных и динамических параметров. Разработанные математические модели позволяют численно экспериментировать, однако поиск параметров, при которых реализуется устойчивый виброударный режим, требует большого объема вычислений, поскольку их количество в зависимости от схемы находится в пределах от 8 до 10. Поэтому цель работы – обоснование динамических параметров, которые обеспечивают виброударное движение сита.

На рис. 1,а изображено поперечное сечение грохота. К бортовинам 1 короба закреплено сито 2, а под ним – ленты-струны 3. Короб установлен на упругих связях 4. На сите

находится грохотимое сырье 5. При колебаниях короба (вибровозбудитель условно не показан) сито и ленты-струны ударяются между собой, что интенсифицирует сегрегацию и просеивание, а также улучшает самоочистку сита – это обеспечивает увеличение производительности и эффективности классификации.

В работах [3, 4] показана целесообразность перехода от системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами (рис.1,б). Погонную массу сита будем моделировать сосредоточенной массой 6, а сито вместе с присоединенной массой грохотимого сырья – массой 7. Масса 6 соединена с подвижной рамой 8 пружиной 9 и демпфером 10. Масса же 7 так же соединена с рамой, но посредством пружины 11 и демпфера 12. Поскольку нас интересует виброударный режим движения масс, то будем считать: подвижная рама перемещается по тому же закону, что и короб грохота.

Замену распределенной массы и жесткости сосредоточенными выполним на основе методики, которую широко применял академик Ю. А. Шиманский [5]. Суть ее состоит в следующем. Сосредоточенная масса принимается такой, чтобы ее кинетическая энергия была равна кинетической энергии системы с распределенной массой при заданной форме колебаний. При выборе сосредоточенной жесткости следует обеспечить равенство соответствующих потенциальных энергий.

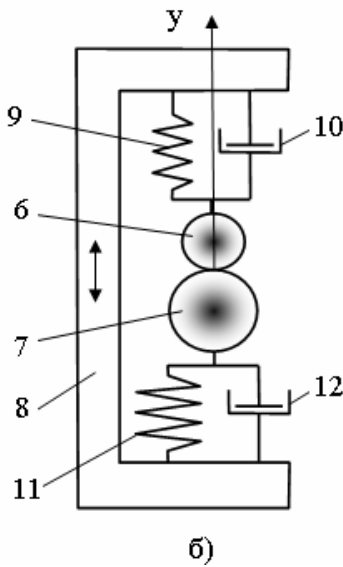
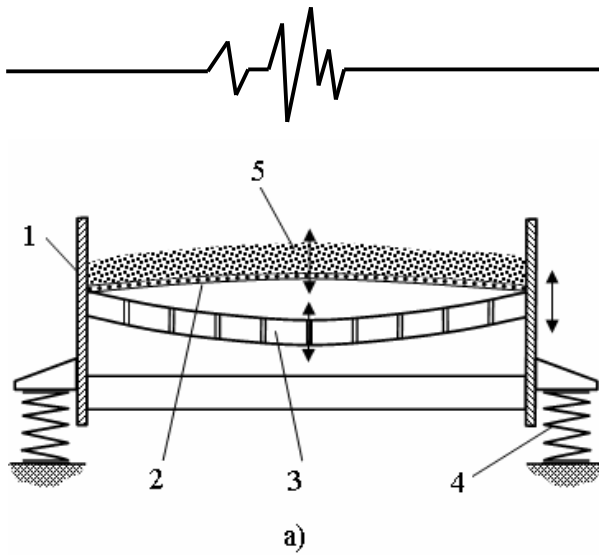


Рис. 1. Расчетная схема грохота

а) – поперечное сечение грохота;

б) – модель с сосредоточенными параметрами;

1 – бортовина; 2 – сито; 3 – ленты-струны; 4 – упругие связи; 5 – грохотимое сырье; 6 и 7 – сосредоточенные массы; 8 – подвижная рама; 9 и 11 – пружины; 10 и 12 – демпферы; двойными стрелками показаны перемещения

Для вычисления сосредоточенных масс и жесткостей воспользуемся формулами [3, 4]:

$$m_1 = \frac{3}{8}(m_c + m)b_c;$$

$$k_1 = \frac{\pi^4 E h}{2b_c^3(1 - \mu_n^2)} \left[\frac{h^2}{3} + \frac{(rW)}{8} \right];$$

$$m_2 = \frac{m_l N_l}{2};$$

$$k_2 = \frac{\pi^2 P N_l}{2b_c},$$

где m_c и m – массы сита и грохотимого сырья, приходящиеся на единицу площади; E – модуль упругости; h – толщина сита; r – коэффициент распора; W – амплитуда в точке приведения; μ_n – коэффициент Пуассона; m_l – масса ленты-струны; N_l – количество лент-струн на единицу длины сита; P – натяжение ленты-струны; b_c – ширина сита.

Начало оси y поместим в положение статического равновесия системы (при отсутствии силы тяжести). Положение массы m_1 вычисляется по формуле [6]:

$$y_0^* = -\frac{S}{1 + \chi} \quad (1)$$

где S – зазор ($S > 0$) или натяг ($S < 0$); $\chi = k_1 / k_2$; k_1 и k_2 – жесткости.

С учетом (1) движения масс m_1 и m_2 между соударениями описываются уравнениями:

$$\ddot{y}_1^* + \omega_1^2 y_1^* + \mu_1 \dot{y}_1^* = \frac{S\omega_1^2}{1 + \chi} - g + A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi); \quad (2)$$

$$\ddot{y}_2^* + \omega_2^2 y_2^* + \mu_2 \dot{y}_2^* = -\frac{S\omega_2^2}{1 + \chi} \chi - g + A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi); \quad (3)$$

где $\omega_1 = k_1 / m_1$ и $\omega_2 = k_2 / m_2$ – собственные частоты; μ_1 и μ_2 – коэффициенты вязкого трения; g – ускорение свободного падения; A и ω – амплитуда и частота колебаний короба; φ – фазовый сдвиг колебаний короба по отношению к моменту соударения масс.

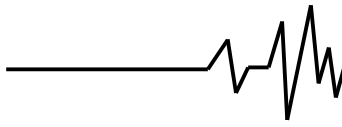
Перейдем к безразмерным величинам для чего введем следующие обозначения:

$$y_1 = y_1^* / A;$$

$$y_2 = y_2^* / A;$$

$$\sigma = S / A;$$

$$\tau = \omega t.$$



Тогда перемещения, скорости и ускорения запишутся в таком виде:

$$y_1^* = Ay_1; \dot{y}_1^* = A\omega\dot{y}_1; \ddot{y}_1^* = A\omega^2\ddot{y}_1; \quad (4)$$

$$y_2^* = Ay_2; \dot{y}_2^* = A\omega\dot{y}_2; \ddot{y}_2^* = A\omega^2\ddot{y}_2. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (2) и (5) в (3), получим:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + \xi_1^2 y_1 + 2\frac{\delta_1}{\omega} \dot{y}_1 &= \\ &= \frac{\sigma}{1+\chi} \xi_1^2 - \frac{1}{\Gamma} + \sin(\tau + \varphi); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 + \xi_2^2 y_2 + 2\frac{\delta_2}{\omega} \dot{y}_2 &= \\ &= \frac{\sigma}{1+\chi} \chi \xi_2^2 - \frac{1}{\Gamma} + \sin(\tau + \varphi), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\xi_1 = \omega_1 / \omega$, $\xi_2 = \omega_2 / \omega$; $\delta_1 = \mu_1 / 2m_1$; $\delta_2 = \mu_2 / 2m_2$ – коэффициенты демпфирования и $\Gamma = A\omega^2 / g$ – коэффициент режима.

Скорости до и после удара связаны уравнениями [6]:

$$v_1 = \frac{m^* - R}{1 + m^*} u_1 + \frac{1 + R}{1 + m^*} u_2; \quad (8)$$

$$v_2 = m^* \frac{1 + R}{1 + m^*} u_1 + \frac{1 - m^* R}{1 + m^*} u_2, \quad (9)$$

где $m^* = m_1 / m_2$; R – коэффициент восстановления скорости при ударе.

Дифференциальные уравнения (6) и (7) решались численно. Применялся метод поэтапного интегрирования. Задавались произвольные начальные значения фазы $\varphi(0)$, координат, $y_1(0)$ и $y_2(0)$ скоростей, $v_1(0)$ и $v_2(0)$ двух масс. Затем методом Рунге-Кутты четвертого и пятого порядка решалась задача Коши. При пересечении траекторий производилась остановка счета, определялись координаты и скорости масс (скорости до удара). По формулам (8) и (9) вычислялись скорости после удара. Полученные значения перемещений и скоростей служили начальными значениями для последующего этапа движения масс. Повторяя многократно подобные вычисления, строились траектории масс. Разработанный алгоритм реализован в

математической программе «Виброударный грохот».

Таким образом, виброударное движение сита с грохотимым сырьем зависит от амплитуды A и частоты ω вибровозбуждения, собственных частот ω_1 и ω_2 , массы m_1 и m_2 , коэффициента демпфирования δ_1 и δ_2 , коэффициента восстановления скорости R , а также зазора S . Совокупность этих параметров обозначим X . В зависимости от X возможны режимы: виброударный с различной кратностью, движение с длительным контактом масс, а также возможен режим, когда нарушаются геометрические условия (пересекаются траектории масс m_1 и m_2).

Практический интерес представляет виброударный режим с периодом, равным периоду вибровозбуждения [7]. Такой режим обозначим цифрой 1. Остальные режимы – 0. Имеет место задача: найти вектор X , при котором наступает событие 1. Учитывая, что наиболее просто реализовать конструкцию с нулевым зазором ($S = 0$), то у вектора X восемь составляющих.

Было проведено 300 численных экспериментов при различных значениях параметров:

$$A = 2 \dots 20 \text{ мм}, \quad \omega = 50 \dots 150 \text{ 1/с},$$

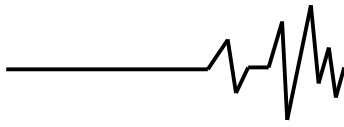
$$\omega_1 = 15 \dots 120 \text{ 1/с}, \quad \omega_2 = 50 \dots 190 \text{ 1/с},$$

$$m_1 = 1 \dots 55 \text{ кг}, \quad m_2 = 15 \dots 25 \text{ кг},$$

$$\delta_1 = 5 \dots 100 \text{ 1/с}, \quad \delta_2 = 5 \dots 7 \text{ 1/с}, \quad R = 0, 2 \dots 1,$$

Изобразить восьмимерную область не представляется возможным, а табличное представление результатов чрезвычайно громоздко, поэтому для обобщения результатов применен метод бинарной логит регрессии.

Бинарные модели применяют, если зависимая переменная (отклик) бинарная по своей природе, т. е. может принимать только два значения. Представляет интерес поиск зависимости между несколькими непрерывными переменными и одной зависимой от них бинарной переменной. Так как смоделировать бинарную функцию от непрерывных аргументов проблематично, то задачу регрессии решают в два этапа. Первый, вместо предсказания бинарной переменной



предсказывают непрерывную переменную на отрезке $[0, 1]$. Это достигается применением логит регрессионного уравнения

$$Y' = \frac{e^p}{1 + e^p}, \quad (10)$$

$$p = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n, \quad (11)$$

где b_0 , b_1 и b_n – подлежащие определению коэффициенты; X_1, X_2, \dots, X_n – непрерывные переменные. В нашем случае – это составляющие вектора X , причем $n = 8$.

Второй этап. Из непрерывной на отрезке $[0, 1]$ переменной Y' получают бинарную переменную Y при помощи правила

$$Y = 0, \text{ если } Y' \in [0; 0,5]; \quad (12)$$

$$Y = 1, \text{ если } Y' \in (0,5; 1].$$

В результате обработки численных экспериментов определено, что

$$\begin{aligned} p = & -23,2901 + 0,1225459A + \\ & + 0,02170117\omega - 0,01158313m_1 + \\ & + 1,24394m_2 - 0,0703771\omega_1 + \\ & + 0,03447531\omega_2 - 0,05299259\delta_1 - \\ & - 0,00255608\delta_2 + 3,356291R. \end{aligned} \quad (13)$$

Обозначив коэффициенты перед A и ω символами b_A и b_ω , а остальные слагаемые – C , представим выражение (13) в таком виде

$$p = b_A A + b_\omega \omega + C. \quad (14)$$

Подставляя (14) и $Y' = 0,5$ в (10) получим показательное уравнение, из которого определим амплитуду, соответствующую правой границе отрезка в выражении (12)

$$A_0 = -\frac{1}{b_A}(b_\omega \omega + C).$$

Из (10-14) следует, что если задать $A > A_0$, то имеем $Y = 1$, следовательно, реализуется виброударный режим.

Вывод

Выбор конструктивных и динамических параметров грохота, при которых реализуется виброударный режим, рационально производить на основе обобщения численных экспериментов с помощью бинарного логит регрессионного уравнения (10–14).

Прогнозное применение модели – оптимизация конструктивных и динамических параметров грохота, разработка системы автоматического управления процессом классификации.

Литература

1. Надутый В.П. Определение динамических параметров грохота с виброударным возбуждением просеивающей поверхности [Текст] / В. П. Надутый, Е.С. Лапшин, В.П. Краснопер // Науч.- техн. журнал НГА Украины «Науковий вісник» – Вып. №3. – Днепропетровск. 1998. – с.73–75.
2. Надутый В.П. Особенности конструкции и обоснование расчетной схемы грохота с виброударным режимом возбуждения сита [Текст] / В. П. Надутый, Е.С. Лапшин, В.П. Краснопер // Тезисы докладов Междунар. Конференции по динамике и прочности машин. – Тбилиси, 1999. – с. 72–73.
3. Надутый В.П. Математическое моделирование виброударного движения сита грохота [Текст] / В. П. Надутый, Е.С. Лапшин, И.П. Хмеленко // Всеукр. науч.-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях» – Вінниця. – Вип.1 (53) – 2009. – с. 36–39.
4. Надутый В.П. Анализ виброударного движения просеивающей поверхности грохота [Текст] / В. П. Надутый, Е.С. Лапшин, И.П. Хмеленко // Всеукр. науч.-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях» – Вінниця. – Вип.2 (54) – 2009. – с. 69–72.
5. Шиманский Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций [Текст] / Ю.А Шиманский. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 444 с.
6. Кобринский А.Е. Виброударные системы (Динамика и устойчивость) [Текст] / А.Е. Кобринский, А.А Кобринский. – М.: 1973. Наука, – 592 с.
7. Надутый В. П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья [Текст] / В. П. Надутый, Е. С. Лапшин. – К.: Наук. думка, 2005. – 180 с.