

Надутый В. П.

Лапшин Е. С.

Шевченко А. И.

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

УДК 622. 742:621. 926:621.3. 06

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОУДАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРОСЕИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРОХОЧЕНИЯ

Запропоновано математичну модель, що описує рух просіваючої поверхні грохота при збудженні двома ударниками з урахуванням дисипації енергії у зв'язках, що деформуються.

The mathematical model describing movement of the sifting surface of a screen at excitation by two drummers with the account of energy in deformable communications is offered.

Совершенствование технологии переработки и обогащения горной массы требует повышения эффективности разделения по крупности и обезвоживания при мелком и особенно тонком грохочении. Наиболее трудоемким и имеющим высокие энергетические затраты является процесс удаления влаги из продуктов, крупность которых менее 200 микрон, что связано с доминирующей ролью сил поверхностного натяжения. Анализ научно-технической информации позволил выявить мировую тенденцию при создании грохотов для влажного сырья: увеличение ускорения просеивающей поверхности до значений, в сотни и тысячи раз превосходящих ускорение свободного падения [1]. Для этих целей, как правило, используют удар.

В ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины более десяти лет ведутся экспериментальные и теоретические исследования, направленные на создание виброударных грохотов [1–5]. В одной из последней разработок предложено просеивающую поверхность возбуждать «двойными» ударами [1]. Вначале наносится первый удар, который способствует отрыву сырья от просеивающей поверхности и его разрыхлению, затем на этапе полета наносится второй удар, который сообщает дополнительное ускорение просеивающей

поверхности, что обеспечивает ее очистку от застрявших в отверстиях частиц и разрыву менисков жидкости. Важно отметить, что при нанесении второго удара грохотимое сырье не препятствует удалению частиц и жидкости. Такие грохоты имеют простую конструкцию, однако реализация виброударного режима возможна только при определенных сочетаниях конструктивных и динамических параметров. Экспериментальное определение параметров чрезвычайно трудоемко. С учетом современного состояния вычислительной техники, целесообразно применение численных экспериментов. Для этого необходима математическая модель грохота.

В работе [1] получена модель, описывающая движение просеивающей поверхности грохота при возбуждении двумя ударниками. В ней предполагалось отсутствие потерь энергии в деформируемых связях. Такой подход допустим, если связи изготовлены из металла. При использовании резины необходим учет диссипации, которая существенно влияет на движение просеивающей поверхности. В этой связи цель работы – разработать математическую модель, описывающую виброударное движение просеивающей поверхности с учетом диссипации энергии.

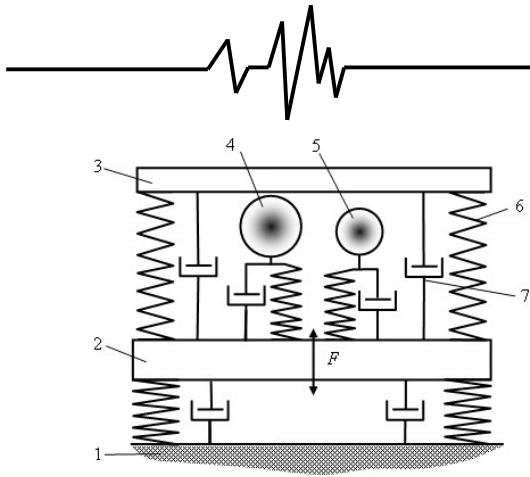


Рис. 1. Расчетная схема грохота:
1 – основание; 2 – короб; 3 – просеивающая поверхность; 4 и 5 – ударники
6 – пружина; 7 – демпфер

На рис. 1 приведена расчетная схема. Грохот, установленный на основании 1, состоит из короба 2, просеивающей поверхности 3, ударников 4 и 5, а также деформируемых связей. Упругие и диссипативные свойства связей и просеивающей поверхности учитывались на основе модели Кельвина-Фохта, состоящей из соединенной параллельно пружины 6 и вязкого элемента 7 (демпфера). Вибровозбудитель, закрепленный на коробе, условно не показан. Будем считать, что к коробу приложена сила F , изменяющаяся во времени по синусоиде. Под действием силы F короб 2 совершает колебания, которые через пружины 7 и демпферы 8 передаются просеивающей поверхности 3 и ударникам 5, 6. Последние, взаимодействуя с просеивающей поверхностью, сообщают ей дополнительные импульсы. Диссипацию энергии при ударе учтем коэффициентом восстановления скорости. Влияние грохотимого сырья моделируется присоединенной массой, которая добавляется к массе просеивающей поверхности.

Напряжение и деформации согласно гипотезе Кельвина-Фохта связаны зависимостью [6]

$$\sigma = E\varepsilon + \mu E\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

где E – модуль упругости; ε – относительная деформация связей; μ – коэффициент внутреннего сопротивления. Здесь и далее точка над символом означает дифференцирование по времени.

При использовании принципа Даламбера с учетом (1), получена система уравнений, описывающая вертикальные перемещения короба, просеивающей поверхности и ударников

$$\begin{aligned} m_k \ddot{x}_k + c_k x_k + c_s (x_k - x_s) + c_{u1} (x_{u1} - x_k) + c_{u2} (x_{u2} - x_k) + \\ + \mu_k c_k \dot{x}_k + \mu_s c_s (\dot{x}_k - \dot{x}_s) + \mu_{u1} c_{u1} (\dot{x}_{u1} - \dot{x}_k) + \\ + \mu_{u2} c_{u2} (\dot{x}_{u2} - \dot{x}_k) = F \sin(2\pi f t); \\ m_s \ddot{x}_s + c_s (x_s - x_k) + \mu_s c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_k) = 0; \\ m_{u2} \ddot{x}_{u2} + c_{u2} (x_{u2} - x_k) + \mu_{u2} c_{u2} (\dot{x}_{u2} - \dot{x}_k) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса; x – вертикальное перемещение; c – жесткость; F – амплитуда силы; f – частота; t – время; индексы k, s и u, i обозначают, что величины относятся, соответственно, к коробу, просеивающей поверхности и ударнику i ($i = 1, 2$).

Начальные условия ($t = 0$):

$$x_k = x_{0,k}, \quad x_s = x_{0,s}, \quad x_{u,i} = x_{0,u,i}, \quad (3)$$

$$\dot{x}_k = v_{0,k}, \quad \dot{x}_s = v_{0,s}, \quad \dot{x}_{u,i} = v_{0,u,i} \quad (4)$$

где дополнительным индексом 0 отмечены начальные значения перемещения x и скорости v .

Ударники в неизвестные моменты времени контактируют с просеивающей поверхностью ($x_s = x_{u,1}$ или $x_s = x_{u,2}$), поэтому решения системы должны удовлетворять дополнительным условиям, описывающим связь между скоростями до и после удара [7, 8]:

$$v_{s,i} = \frac{u_s (m_s - R_i m_{u,i}) + u_{u,i} m_{u,i} (1 + R_i)}{m_s + m_{u,i}}, \quad (5)$$

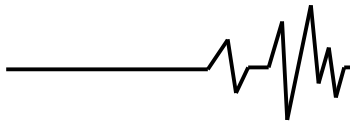
$$v_{u,i} = \frac{u_s m_s (1 + R_i) + u_{u,i} (m_{u,i} - R_i m_s)}{m_s + m_{u,i}}, \quad (6)$$

где v и u – скорости после и до удара; индексы s, i означают, что величина относится к просеивающей поверхности после взаимодействия с ударником i ; R_i – коэффициент восстановления скорости.

Решение должно также удовлетворять условию $x_s \geq x_{u,i}$, которое означает, что ударники не могут пройти через просеивающую поверхность.

Несмотря на простоту системы уравнений (2), их решение с учетом условий (3)–(6) – не тривиальная задача.

Для исследования виброударных систем применяют приспособывание решений [7], описывающих смежные интервалы движений, разделенные моментом удара, а также широко



используют различные методы линеаризации, анализ которых подробно выполнен в монографии [8]. В нашем случае решать задачу путем припасовывания из-за большой размерности системы нерационально. Кроме того, нас интересуют режимы движения, отличающиеся от периода вибровозбуждения. Линеаризация же не позволяет выявлять особенности траекторий движений. Поэтому применялся метод поэтапного интегрирования [1–5]. Для начальных условий (3), (4) методом Рунге-Кутты решалась задача Коши. При пересечении траекторий просеивающей поверхности и i -го ударника производилась остановка счета, определялись скорости до удара. Затем по формулам (5) и (6) вычислялись скорости после удара. Полученные значения перемещений и скоростей служили начальными значениями для последующего этапа движения масс. Повторяя многократно подобные вычисления, строились траектории движения просеивающей поверхности и ударников.

На основе приведенного алгоритма разработана программа для ПК «Грохот с ударниками», которая позволяет путем численных экспериментов производить выбор параметров грохота.

Для иллюстрации влияния коэффициента внутреннего сопротивления на движение просеивающей поверхности рассмотрим модельный пример. Массы короба, сита, ударника 1 и 2 соответственно равны 20 кг, 1 кг, 0,4 кг и 0,4 кг, а жесткости – 350000 Н/м, 48360 Н/м, 8800 Н/м и 5400 Н/м. Коэффициент восстановления скорости 0,9. Амплитуда возмущающей силы 100 Н, а частота 20 Гц.

На рис. 2 представлены фрагменты траекторий на интервале времени 0,35–0,45 с, когда закончился переходной процесс, обусловленный начальными условиями. Контакт первого ударника с просеивающей поверхностью обозначен буквой А, а второго ударника – Б.

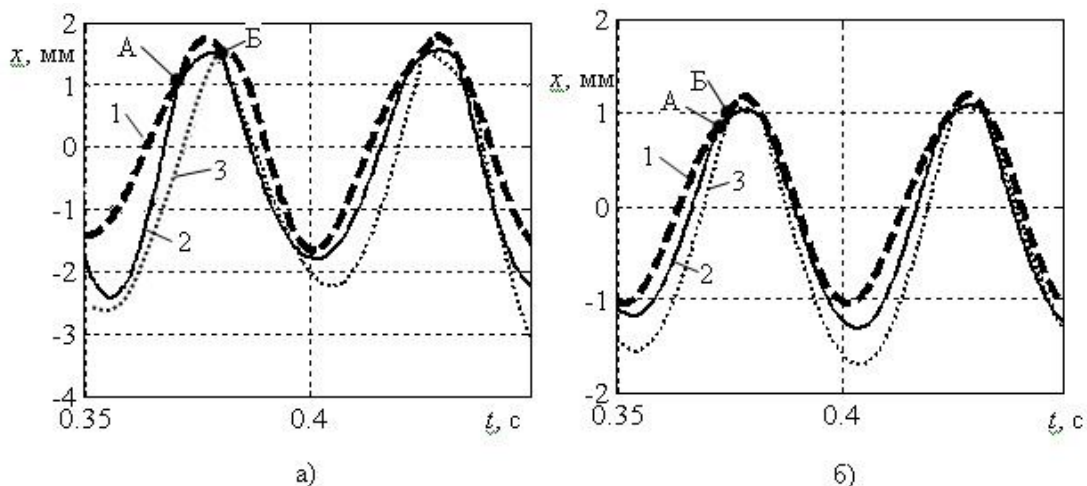


Рис. 2. Перемещения просеивающей поверхности и ударников:

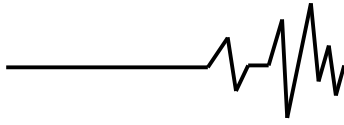
а) – при $\mu = 0,002$; б) – при $\mu = 0,003$;

1 – просеивающая поверхность; 2 – ударник 1; 3 – ударник 2

Просеивающая поверхность совершает колебания с периодом, равным периоду возбуждения $1/f = 1/20 = 0,05$ с. При $\mu = 0,002$ (средне наполненная резина [6]) размах колебаний просеивающей поверхности равен 3,39 мм. Время между ударами, равное расстоянию между точками А и Б вдоль оси времени, составляет 0,0098 с. С увеличением μ до 0,003 размах уменьшился более чем в 1,5 раза, а время между ударами сократилось до 0,0013 с.

Аналогичным образом можно проанализировать влияние любого из определяющих параметров.

Экспериментальные исследования показали [1], что реализация режима колебаний просеивающей поверхности с дополнительными ударами, по сравнению с одиночными ударами, повышает эффективность грохочения сырья в зависимости от его физико-механических свойств от 5 % до 15 %.



Итак, разработана математическая модель (1)–(5), описывающая движение просеивающей поверхности грохота при возбуждении двумя ударниками с учетом диссипации энергии в деформируемых связях. На ее основе планируются исследования по определению рациональных конструктивных и динамических параметров грохота для классификации различного сырья.

Литература

1. Надутый В.П. Математическое моделирование грохота с ударным возбуждением просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : Укр. міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2011. – Вип.45. – С. 320–324.

2. Надутый В.П. Определение динамических параметров грохота с виброударным возбуждением просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, В.П. Краснопер // Науковий вісник : Наук.-техн. журнал / НГА України. – Дніпропетровськ, 1998. – Вип. № 3. – С. 73–75.

3. Надутый В.П. Особенности конструкции и обоснование расчетной схемы

грохота с виброударным режимом возбуждения сита / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, В.П. Краснопер // Тез. докл. Междунар. конф. по динамике и прочности машин. – Тбилиси, 1999. – С. 72–73.

4. Надутый В.П. Математическое моделирование виброударного движения сита грохота / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, И.П. Хмеленко // Вібрації в техніці та технологіях : Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2009. – Вип. 1(53). – С. 36–39.

5. Надутый, В. П. Анализ виброударного движения просеивающей поверхности грохота [Текст] / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, И.П. Хмеленко // Вібрації в техніці та технологіях : Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2009. – Вип. 2(54). – С. 69–72.

6. Потураев В.П. Резиновые и резинометаллические детали машин / В.Н. Потураев. – М. : Машиностроение, 1966. – 300 с.

7. Кобринский А.Е. Виброударные системы (Динамика и устойчивость) / А.Е. Кобринский, А.А. Кобринский. – М. : Наука, 1973. – 592 с.

8. Бабицкий В.И. Теории виброударных систем (приближенные методы) / В.И. Бабицкий. – М. : Наука, 1978. – 352 с.