

УДК 677.021

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ЧАСТИЦ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ПРИ ОЧИСТКЕ В СВОБОДНОМ СОСТОЯНИИ\*

*А.Р. КОРАБЕЛЬНИКОВ, Х.И. ИБРОГИМОВ, Р.В. КОРАБЕЛЬНИКОВ, Д.А. ЛЕБЕДЕВ*

(Костромской государственной технологической университет)

Известно, что очистка волокнистого материала может осуществляться двумя способами: очистка при воздействии на материал в свободном состоянии и при воздействии на волокнистые частицы в зажатом состоянии.

Рассмотрим процесс взаимодействия рабочего органа с волокнистой частицей в свободном состоянии в виде хлопковой летучки.

На рис.1-а показана схема взаимодействия колка 1 с частицей (летучкой) хлопка 2, а на 1-б – частицы сора 1 и хлопка 2. Частица хлопка обладает массой  $m_1$  и жесткостью  $C_1$ , а сора  $m_c$  и  $C_2$ .

Составим динамическую модель процесса взаимодействия колка с частицей (рис. 2, где изображено: 1 – колок; 2 – частица хлопка (летучка);  $C_1$  – жесткость час-

тицы;  $Z_1$  – координата движения колка;  $Z_2$  – координата движения частицы (летучки);  $m_l$  – масса частицы (летучки)).

При составлении модели были приняты следующие допущения:

- коэффициент жесткости частицы (летучки) на сжатие принимается постоянным с линейной характеристикой;
- масса частицы сосредоточена в точке  $S$ ;
- так как взаимодействие рассматриваем в течение короткого времени, то движение примем прямолинейным, а нагружение системы будем рассматривать в течение полупериода колебаний;
- демпфирующими свойствами частицы пренебрегаем;
- масса колкового барабана принимается значительно больше массы летучки и колок считается весьма жестким.

\*Работа выполнена при поддержке гранта Федерального агентства по образованию Российской Федерации в рамках реализации целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" (2009 - 2010 гг.) по разделу 2.1.2.

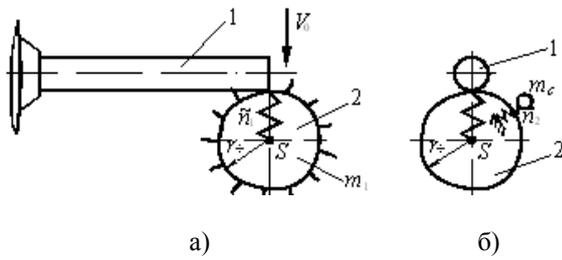


Рис. 1

Дифференциальным уравнением движения частицы при взаимодействии с колком будет

$$m_1 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = (z_1 - z_2) C_1. \quad (1)$$

Так как колко жесткий, считаем, что  $z_1 = V_0 t$ . Тогда уравнение (1) после деления на  $m_1$  примет вид:

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} + \frac{C_1}{m_1} z_2 = \frac{C_1 V_0 t}{m_1}. \quad (2)$$

Обозначим  $\omega_0^2 = \frac{C_1}{m_1}$  и  $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1}{m_1}}$  – круговая частота собственных колебаний частицы.

Тогда получим:

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} + \omega_0^2 z_2 = \frac{C_1 V_0 t}{m_1}. \quad (3)$$

Общим решением дифференциального уравнения (3) будет:

$$z_2 = A \sin \omega_0 t + B \cos \omega_0 t + V_0 t, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – произвольные постоянные интегрирования.

Из начальных условий при

$$t = 0, \quad z_2 = 0, \quad \frac{dz_2}{dt} = V_{ч0}$$

найдем

$$B = 0, \quad A = \frac{V_{ч0} - V_0}{\omega_0},$$

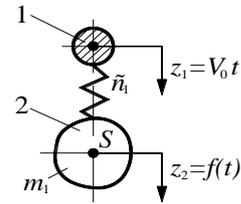


Рис. 2

где  $V_{ч0}$  – начальная скорость частицы (летучки).

В результате получим:

$$z_2 = V_0 t + \frac{V_{ч0} - V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (5)$$

Первое слагаемое представляет собой прямую линию под углом  $\alpha = \arctg V_0$  к оси абсцисс, а второе слагаемое есть синусоида с амплитудой колебаний:

$$A = \frac{V_{ч0} - V_0}{\omega_0}. \quad (6)$$

Если начальная скорость частицы (летучки) равна нулю:  $V_{ч0} = 0$ , то будем иметь:

$$A = -\frac{V_0}{\omega_0}. \quad (7)$$

Выражение для закона движения частицы будет иметь вид:

$$z_2 = V_0 t - \frac{V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (8)$$

Вторая производная от (8) даст нам ускорение частицы при ударе о нее колком:

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} = V_0 \omega_0 \sin \omega_0 t. \quad (9)$$

Таким же ускорением будут обладать сорные примеси, движущиеся с частицей. Можно записать условие отделения сорных примесей от частицы:

$$m_c \frac{d^2 z_2}{dt^2} \geq Q_{C_z}, \quad (10)$$

где  $Q_{C_z}$  – составляющая силы закрепления частицы сора на поверхности частицы в направлении оси  $OZ$ ;  $m_c$  – масса сорных частиц.

Максимальное значение ускорения будет при  $\omega_0 t = \frac{\pi}{2}$ :

$$\left( \frac{d^2 z_2}{dt^2} \right)_{\max} = V_0 \omega_0. \quad (11)$$

Тогда условия, при которых сор будет отделяться запишется так:

$$m_c V_0 \omega_0 \geq Q_{C_z}. \quad (12)$$

Уравнение (12) описывает основную закономерность отделения сорных примесей от частицы волокна при ударе по ней колком. Как следует из выражения (12), здесь существенную роль играет скорость колка и круговая частота собственных колебаний летучки. Если величина  $\omega_0$  для летучки хлопка не подлежит изменению и, тем самым, управлению, то управлять процессом, скорее всего, можно путем изменения скорости колкового барабана  $V_0$ . Величиной  $\omega_0$  для частиц волокна можно управлять путем изменения плотности частиц в зависимости от разрыхленности волокнистого потока.

Рассмотрим далее динамический процесс поведения сора, имеющего упругую связь с волокнистой частицей.

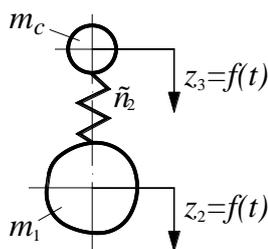


Рис. 3

На рис. 3 показана вторая динамическая модель, где  $m_c$  – масса сорной частицы;  $C_2$  – коэффициент жесткости упругой связи сорной частицы с летучкой в направлении оси  $OZ$ ;  $m_1$  и  $z_2$  – масса волокнистой частицы и координата ее движения;  $z_3$  – координата движения сорной частицы.

Составим дифференциальное уравнение движения сорной частицы:

$$m_c \frac{d^2 z_3}{dt^2} = (z_2 - z_3) C_2. \quad (13)$$

С учетом выражения (6) после некоторых преобразований, получим:

$$m_c \frac{d^2 z_3}{dt^2} + C_2 z_3 = C_2 \left( V_0 t - \frac{V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right),$$

или

$$\frac{d^2 z_3}{dt^2} + p_0^2 z_3 = p_0^2 \left( V_0 t - \frac{V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right), \quad (14)$$

где  $p_0 = \sqrt{\frac{C_2}{m_c}}$  – круговая частота собственных колебаний частицы сора.

Перепишем (14) в следующем виде:

$$m_c \frac{d^2 z_3}{dt^2} + p_0^2 z_3 = p_0^2 V_0 t - \frac{p_0^2 V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (15)$$

Общее решение уравнения (15) состоит из следующих частей:

$$z_3 = z_3^{\bullet} + z_3^{\bullet\bullet}, \quad (16)$$

где  $z_3^{\bullet}$  – общее решение однородного уравнения без правой части;  $z_3^{\bullet\bullet}$  – частное решение уравнения (15).

Общее решение дифференциального уравнения без правой части описывает собственные колебания частицы сора с упругой связью:

$$z_3^* = A \sin p_0 t + B \cos p_0 t. \quad (17)$$

Эти колебания быстро затухают и мы не принимаем их во внимание. Интересным является частное решение уравнения (15).

Если правая часть линейного дифференциального уравнения представляет собой сумму, например, двух слагаемых (как в нашем случае), то частное решение будет являться результатом суммирования парциальных частных решений [6], то есть

$$z_3^{**} = z_1^{**} + z_2^{**}. \quad (18)$$

В таком случае очевидно, что

$$z_1^{**} = \frac{p_0^2 V_0 t}{p_0^2} = V_0 t \quad (19)$$

есть наклонная линия, характеризующая центр колебаний, а второе парциальное частное решение ищем в виде

$$z_2^{**} = D_z \sin \omega_0 t, \quad (20)$$

где

$$D_z = \frac{p_0^2 V_0}{p_0^2 - \omega_0^2} \quad (21)$$

есть амплитуда вынужденных колебаний.

Перепишем (21) в следующем виде:

$$D_z = \frac{V_0}{\omega_0 \left(1 - \frac{\omega_0^2}{p_0^2}\right)} = \frac{V_0}{\omega_0} k_d, \quad (22)$$

где

$$k_d = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_0^2}{p_0^2}\right)}, \quad (23)$$

как и в случае при очистке волокна [4], динамический коэффициент.

В случае приближения значений частот собственных колебаний волокнистой частицы  $\omega_0$  к значению частоты собственных колебаний частицы сора  $p_0$  динамический

коэффициент значительно возрастает, что приведет к увеличению амплитуды вынужденных колебаний и соответственно к улучшению выделения сорных примесей. Это условие можно выразить следующим образом:

$$P_c = D_z C_2 = \frac{V_0}{\omega_0} k_d C_2 \geq Q_{Cz}, \quad (24)$$

где  $D_z C_2$  – сила, создаваемая в упругой связи сорной частицы при ее деформации и ударе колком.

Для практических расчетов ударного взаимодействия колка с частицей в виде летучки можно пользоваться следующими соотношениями, вытекающими из работ [1]...[5]. Так, воздействие колка на летучку можно считать ударным импульсом мгновенных сил. Колебания частицы хлопка при этом могут быть описаны следующим уравнением:

$$z = \frac{S_0}{m_i \omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (25)$$

где  $S_0$  – импульс мгновенных сил;  $m_i$  – масса летучки;  $\omega_0$  – круговая частота собственных колебаний летучки.

Импульс мгновенных сил при массе рабочего органа, значительно превышающей массу частицы, может быть определен для случая неупругого удара по формуле

$$S_0 = m_i V_0, \quad (26)$$

где  $V_0$  – скорость колка.

Амплитуда колебаний частицы хлопка при ударе будет:

$$z_{\max} = \frac{V_0}{\omega_0} \quad (27)$$

– это выражение идентично (8) и (22).

Ударная сила также может быть определена из выражения

$$P_{уд} = \frac{m_i V_0}{\tau}, \quad (28)$$

где  $\tau$  – время удара (время нарастания ударной нагрузки по осциллограмме).

Вторая производная от (25) дает нам ускорение, которое воздействует на сорные частицы, находящиеся на летучке при ударе:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{S_0 \omega_0^2}{m_i \omega_0} \sin \omega_0 t = -\omega_0 V_0 \sin \omega_0 t, \quad (29)$$

$$a_{\max} = \left( \frac{d^2z}{dt^2} \right)_{\max} = -\omega_0 V_0. \quad (30)$$

Максимальная сила инерции сорной частицы будет:

$$P_C^i = a_{\max} m_{C_i} = -\omega_0 V_0 m_{C_i}, \quad (31)$$

условие ее отделения запишется так:

$$P_C^i \geq Q_{C_i}. \quad (32)$$

Для расчетов коэффициентов жесткости летучек при ударе можно пользоваться выражениями из [1] и [2] для линейной

модели, когда  $n=1$  (показатель степени нелинейности сжатия летучки при ударе для общего случая  $P = cz^n$ ):

$$c = \frac{P_{\max}^2}{m_i V_0^2}, \quad (33)$$

для нелинейной модели ( $n \neq 1$ ):

$$c = \frac{2^n P_{\max}^{n+1}}{(n+1)^n (m_i V_0^2)^n}, \quad (34)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное значение силы удара колком по летучке;  $n$  – показатель нелинейности (для одиночных летучек по данным [1], [2]  $n=1,166$ ;  $c=82,5$ , для двойных летучек  $n=1,204$ ;  $c=182,5$ ).

Для расчетов можно использовать данные исследования удара колка о летучку при помощи трубчатого (высокочастотного) датчика [1]. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры удара	Скорость удара $V_0$ , м/с					
	одной летучкой			двумя летучками		
	8,2	10,5	12,8	8,2	10,5	12,8
Сила удара $P_{уд}$ , Н	0,598	0,780	0,966	0,801	1,05	1,31
Время нарастания нагрузки $t_{нар}$ , с	0,0022	0,0023	0,0023	0,0023	0,0025	0,0026
Общее время удара $t_{уд}$ , с	0,026	0,03	0,037	0,041	0,049	0,051

## ВЫВОДЫ

Таким образом, более углубленно рассмотрен механизм взаимодействия волокнистой частицы с рабочим органом очистительных машин, условия отделения сорных частиц от летучки хлопка, что делает определенный шаг вперед в развитии теории очистки волокнистых материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бурнашев Р.З.* Теоретические основы технологии очистки хлопка-сырца: Дис.... докт. техн. наук. – Ташкент, 1983.

2. *Махкамов Р.Г.* Повышение технологической надежности хлопкоочистительных машин, работающих в ударном режиме. – Ташкент. Изд-во "Фан", 1989.

3. *Корабельников Р.В., Корабельников А.Р.* Теория и практика совершенствования очистителей волокна. Монография. – Кострома, 2001.

4. *Корабельников А.Р.* Развитие теории и технологии получения короткоштапельного льняного волокна: Монография. – Кострома, КГТУ, 2005.

5. *Корабельников Р.В., Ширяев А.В., Корабельников А.Р.* // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №3. С.19...23.

6. *Обморшев А.Н.* Введение в теорию колебаний. – М.: Изд-во Наука, 1965.

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин и проектирования текстильных машин. Поступила 06.02.09.