

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 631.363.2.636

И.Я. Федоренко,  
У.К. Сабиев

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ В ЛОТКОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ДОЗАТОРАХ

**Ключевые слова:** вибрация, дозирование, эффект, коэффициент трения, дозатор, плоскость, лоток, угол наклона, движение, тело.

При воздействии вибрации на нелинейные механические системы возникают своеобразные явления, которые можно использовать в различных областях техники и технологии для получения полезных эффектов. В сельскохозяйственной технологии такие эффекты успешно применяются в процессах вибрационного дозирования и транспортирования, но сопровождаются сложными явлениями при взаимодействии грузонесущего органа с обрабатываемой средой.

Многими исследователями отмечается эффект эффективного («кажущегося») изменения сил и коэффициентов трения при вибрациях, которое может быть в принципе объяснено с помощью общих законов механики без привлечения гипотез о физическом изменении трущихся поверхностей [1].

Во время транспортирования под действием вибрации в самом подаваемом материале проявляются именно такие закономерности, и материал приобретает свойство «текучести». Вследствие этого неравномерность вибрационного дозирования материала существенно снижается, что обусловлено самим принципом вибрационного воздействия. Это обстоятельство

послужило основой создания вибрационных питателей и дозаторов кормов, отвечающих зоотехническим и технологическим требованиям.

Такое же явление эффективного снижения трения происходят в зоне контакта материала с вибрирующим лотком. Поэтому рассмотрим указанное явление на примере взаимодействия плоской частицы с поверхностью при вибрациях.

Однако сначала напомним механизм взаимодействия частицы с наклонной поверхностью посредством сухого трения при отсутствии вибраций.

Условимся использовать в качестве исходной модель сухого трения Кулона:

$$F = -F_0 \operatorname{sign}(v), \text{ при } v \neq 0; \quad (1)$$

$$-F_0 \leq F \leq F_0, \text{ при } v = 0,$$

где  $v$  – скорость относительного поступательного перемещения частицы и лотка;

$F_0$  – сила трения трогания.

Сила  $F_0$  в обычных обозначениях определяется по формуле:

$$F_0 = N \cdot f_n, \quad (2)$$

где  $N$  – сила прижатия частицы к лотку;

$f_n$  – коэффициент трения покоя (как видно, модель Кулона предполагает равенство значений угла трения покоя и движения).

Из курса теоретической механики известны два основных режима поведения

частицы на наклонной шероховатой поверхности:

1) покой при  $\alpha < \varphi$ , где  $\varphi$  – угол трения ( $\varphi = \arctg f_n$ );

2) равноускоренное движение при  $\alpha > \varphi$ .

Последний режим иногда используют для определения коэффициента трения движения  $f_n$ . Действительно, если акселерометром зарегистрировано ускорение  $j$  спускаемого тела (частицы), то указанный коэффициент определяется по формуле:

$$f_0 = \operatorname{tg} \alpha - \frac{j}{g \cos \alpha}.$$

Если обозначить соотношение ускорений  $j/(g \cos \alpha) = w$ , то эту формулу можно представить в более лаконичном виде:

$$f_0 = \operatorname{tg} \alpha - w. \quad (3)$$

При вибрациях тела или поверхности направленное в среднем движение возможно и в случае  $\alpha < \varphi$ . Для объяснения этого явления И.И. Блехман и Г.Ю. Джанелидзе ввели понятие «эффективный коэффициент трения при вибрациях» [1].

Ход их рассуждений был таков. Пусть абсолютно твердое тело прижато к шероховатой плоскости силой  $N$  и на него действует сила  $S$ , направленная вдоль плоскости (рис. 1а). Пусть на тело действует также продольная гармоническая сила  $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ .

Тогда, для того чтобы тело начало двигаться вдоль плоскости, необходима не

сила  $S = S_0 = f_n N$ , как при отсутствии силы  $\Phi$ , а лишь сила  $S = f_n N - \Phi_0$ .

Поэтому наблюдателю, «не видящему» быстрой силы  $\Phi$ , будет казаться, что коэффициент трения покоя по отношению к медленной силе  $S$  уменьшился, приняв значение

$$f_n^* = \frac{S}{N} = f_n - \frac{\Phi_0}{N}. \quad (4)$$

Если ввести параметр  $w = \frac{\Phi_0}{N}$ , характеризующий относительную интенсивность вибраций и называемый параметром (коэффициентом) перегрузки, то формула (4) запишется в виде

$$f_n^* = f_n - w. \quad (5)$$

Формула (5) остается справедливой в случае, когда сила  $\Phi$  отсутствует, но плоскость совершает гармонические колебания в своей плоскости (рис. 1б). При этом параметр перегрузки следует вычислять по формуле:

$$w = \frac{mA\omega^2}{N}. \quad (6)$$

Формулы (4) и (5) имеют смысл до тех пор, пока эффективные коэффициенты трения при вибрациях положительны, т.е. при  $w < 1$ .

Применим этот подход для определения эффективного коэффициента трения частицы, находящейся на наклонной к горизонту вибрирующей плоскости (рис. 2).

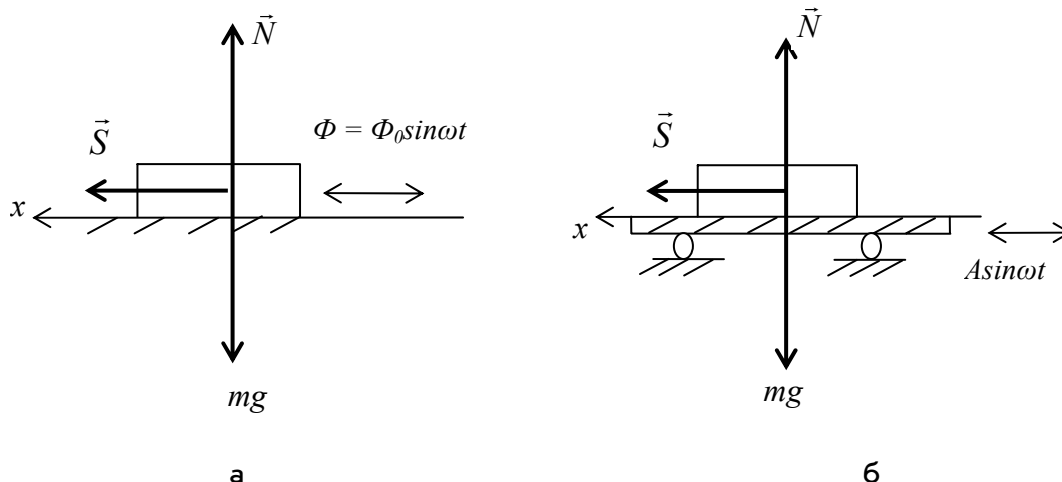


Рис. 1. Частица на горизонтальной плоскости при действии вибрации: а – действие осциллирующей силы; б – действие вибраций плоскости

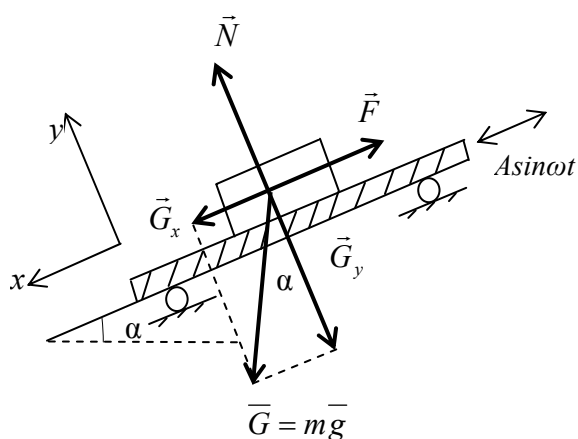


Рис. 2. Частица на вибрирующей наклонной поверхности

Представленная схема является простейшей расчетной моделью вибрационного дозатора. Следуя изложенной выше логике, рассчитаем эффективный коэффициент трения покоя. Минимальная сила  $S$ , необходимая для начала сползания частицы вниз по поверхности, определится из выражения

$$S = mg f_n \cos \alpha - mg \sin \alpha - mA\omega^2. \quad (7)$$

Соотношение этой силы и силы  $N = mg \cos \alpha$  как раз и даёт значение эффективного коэффициента трения:

$$f_n^* = f_n - \operatorname{tg} \alpha - \frac{A\omega^2}{g \cos \alpha}. \quad (8)$$

Поскольку  $A\omega^2 / (g \cos \alpha) = w$ , то данное выражение можно представить в виде формулы (5), а именно:

$$f_n^* = f_n - \operatorname{tg} \alpha - w. \quad (9)$$

Здесь и далее полученные выражения имеют смысл лишь при  $f_n^* \geq 0$ .

Как видим, получился неожиданный результат: эффективный коэффициент трения при вибрациях оказался зависимым не только от параметров вибрации, но и угла наклона плоскости к горизонту. Более того, если вибрация отсутствует ( $W = 0$ ), то эффективный коэффициент трения для этого случая определится из выражения

$$f_n^* = f_n - \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

Результат этого понятен: сила  $S = mg f_n \cos \alpha - mg \sin \alpha$  включает второй член  $mg \sin \alpha$ , который не имеет отношения к трению, однако при расчете коэффициента трения был включен в соответствующую формулу.

Полученный результат может быть интерпретирован по-другому. Для наблюдателя, не видящего наклон плоскости (при малых углах наклона это действительно можно не заметить) и, следовательно, не замечающего появление силы  $G_x$ , кажется, что коэффициент трения уменьшился. А более проницательный наблюдатель даже может ему подсказать это «уменьшение», рассчитывая его по формуле (10).

В последнем предложении «уменьшение» коэффициента трения мы взяли в кавычки, подчеркивая тем самым, что реальный коэффициент трения не изменился.

Тем не менее в условиях наклона лотка и воздействия вибрации появляются силы, нейтрализующие сухое трение, ослабляющие его действие, в результате чего динамическое поведение системы в корне меняется.

Формально это и отражается через введение эффективных коэффициентов трения покоя  $f_n^*$ .

Обращение  $f_n^*$  в ноль означает, что характер трения качественно меняется, поскольку начинается проскальзывание частицы относительно плоскости. Теперь речь может идти только о коэффициентах трения движения  $f_d$ . Многочисленные исследования [1, 2] показывают, что наиболее общим выражением для определения эффективного коэффициента трения движения при вибрациях будет

$$f_d^* = f_d \cdot \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V}{A\omega}, \quad (11)$$

где  $V = \text{const}$  – скорость направленного в среднем движения частицы под воздействием вибрации.

Как видно, здесь появилась зависимость эффективного коэффициента трения от скорости, что является признаком вязкого трения. Действительно, опыты показывают, что при соответствующей вибрации  $A\omega^2 > g \cos \alpha$  (т.е.  $w > 1$ ) частица начинает сползать с лотка при малейшем его наклоне.

При особенностях данной динамической схемы (рис. 2) имеет место еще одно соотношение [2]:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_d} = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V}{a\omega}. \quad (12)$$

Из сопоставления формул (11) и (12) получаем опять неожиданный результат:

$$f_d^* = \operatorname{tg} \alpha. \quad (13)$$

Его парадоксальность заключается в том, что эффективный коэффициент трения движения  $f_{\delta}^*$  не зависит от параметров вибрации, а зависит всецело от угла наклона лотка  $\alpha$  (рис. 3).

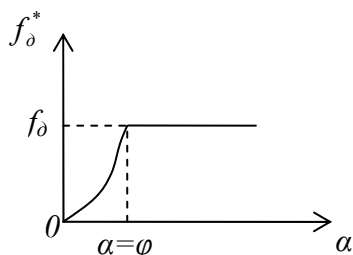


Рис. 3. Зависимость  $f_{\delta}^*$  от угла  $\alpha$

Объясняется это следующим. При увеличении, к примеру, параметров вибрации  $A$  и  $\omega$  увеличивается средняя скорость  $V$  сползания частицы. А в результате соотношение  $Sh = V / (A\omega)$  остается постоянным [2]. Параметр  $Sh$  является, таким образом, адиабатическим инвариантом.

При этом, как видно из формулы (11), величина  $f_{\delta}^*$  действительно остается постоянной. Изменить значение  $f_{\delta}^*$  можно только посредством вариации угла  $\alpha$  наклона лотка (рис. 2). Величина  $f_{\delta}$  монотонно изменяется от  $\alpha = 0$  до  $\alpha = \varphi$ . Имеем, таким образом, вязкую характеристику  $f_{\delta}^*$  по отношению к углу наклона лотка  $\alpha$ . При  $\alpha \geq \varphi$  движение частицы возможно и без вибрации, которая не играет для этого режима какой-либо особой роли. Поэтому эффективный коэф-

фициент трения  $f_{\delta}^*$  превращается в обычный коэффициент трения  $f_{\delta}$ .

Подобные механизмы преобразования сухого трения при вибрациях имеют место не только в зоне взаимодействия материала с лотком (внешнее трение), но и при взаимодействии частиц материала друг с другом (внутреннее трение) [3].

#### Выводы

1. Эффективное уменьшение коэффициента трения возможно не только при вибрациях, но и при действии других факторов, в частности наклоне лотка в дозаторах сыпучих кормов.

2. Вибрирующий лоток дает уникальные возможности управления динамикой частиц не только посредством изменения параметров вибрации, но и наклона лотка. Особенно важно это для дозаторов кормов, для плавного регулирования их подачи, а также повышения эффективности самого процесса дозирования [3].

#### Библиографический список

1. Блехман И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. — М.: Физматлит, 1994. — 400 с.
2. Федоренко И.Я. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков. — Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. — 166 с.
3. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. совет В.Н. Челомей (председ.). — М.: Машиностроение, 1981.



УДК 631:362.7

**В.И. Курдюмов,  
А.А. Павлушин,  
К.В. Шлёнкин**

## РЕЗУЛЬТАТЫ СУШКИ ЗЕРНА РЖИ В УСТАНОВКЕ КОНТАКТНОГО ТИПА

**Ключевые слова:** тепловая обработка зерна, термическое обеззараживание, установка контактного типа, энергосбережение, нагревательные элементы, теоретические исследования, шнековый транспортирующий рабочий орган, тем-

пература поверхности кожуха, режимные параметры, пропускная способность.

Сушка зерна с использованием научно обоснованных режимов повышает его