

Автор ер.  
Ц-15

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

*ЧАЙКОВСКИЙ Б. И.*

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ  
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ПОСЛОЙНОГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
доктор технических наук,  
профессор А. Н. СЕМЕНОВ

Госсовет 1964

Кишинев—Одесса — 1964

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ЧАЙКОВСКИЙ Б. И.

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ  
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ПОСЛОЙНОГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОНАХТ 14.05.12  
Исследование нектор



v000673

Научный руководитель —  
доктор технических наук,  
профессор А. Н. СЕМЕНОВ

v000673 ✓

Одесский технологический  
институт  
имени М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

Кишинев—Одесса — 1964

Автор. | v 000643  
ЧАЙКОВСКИЙ Б. И.  
ОТ. ЗАКОНОМЕРН.  
8/4

72

Диссертационная работа выполнена в аспирантуре кафедры сельскохозяйственных машин Кишиневского сельскохозяйственного института имени М. В. Фрунзе в период 1959--1963 гг.

Объем работы 164 стр., 59 рис., 20 таблиц, библиография 101 название.

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам автореферат диссертации ассистента кафедры сельхозмашин Кишиневского сельскохозяйственного института им. М. В. Фрунзе инженера Чайковского Б. И., выполненной на тему: «Исследование некоторых закономерностей послынного трения твердых тел», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита диссертации намечается на сентябрь 1964 г.

Ваши отзывы и замечания в 2 экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, А-39, ул. Свердлова, 112, Одесский технологический институт.

Ученый секретарь Совета, доцент (Яковенко В. А.)

*В. Занозин*

## ВВЕДЕНИЕ

Программа Коммунистической партии Советского Союза, принятая XXII съездом КПСС, относит к наиболее важным задачам отечественной науки развитие теоретических исследований в области математики, физики, химии, биологии, так как высокий уровень этих ведущих отраслей естествознания является необходимым условием подъема и эффективности технических, сельскохозяйственных и других наук, технического прогресса в народном хозяйстве.

С техническим прогрессом машиностроения тесно связана проблема трения. Трение — одно из самых распространенных явлений природы. Оно сопровождает любые движения тел и оказывает свое влияние на характер этих движений.

Несмотря на многочисленные исследования и существенные результаты, полученные при изучении закономерностей трения, проблема трения не может считаться полностью решенной; здесь еще немало неясных вопросов, требующих детальных исследований. К числу их относится и явление послынного сухого трения твердых тел. Этот вид трения оказывает существенное влияние на количественную и качественную стороны технологических процессов ряда сельскохозяйственных и других машин. Однако исследований в этом направлении почти не имеется.

Задача настоящей работы — исследование некоторых закономерностей, обуславливающих передачу движения через трение.

В содержание работы входят следующие вопросы:

- 1) исследование изменения сил послынного трения при передаче движения;
- 2) определение величины коэффициентов послынного трения и анализ их изменения;
- 3) выявление закономерностей перемещения и распределения скоростей тел (слоев) при послынном движении;

4) применение выведенных закономерностей к технологическому расчету рабочих органов некоторых машин.

Автор исходил из основных положений современной науки о сухом трении твердых тел.

## ГЛАВА I

### ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Закономерности трения давно привлекают к себе внимание исследователей. Леонардо да Винчи (1508 г.) впервые установил, что сила трения пропорциональна нормальной нагрузке и не зависит от площади опорной поверхности. В XVIII веке ряд ученых — Амонтон и Деллагир (1699—1700 гг.), Антуан Паран (1704 г.), Лейбниц (1706 г.), Леупольд и де Камюс (1724 г.) — заложили основы теории трения. Закон Амонтона:

$$F = fN \quad (1)$$

( $F$  — сила трения,  $f$  — коэффициент трения,  $N$  — нормальная нагрузка) до настоящего времени является одним из основных законов механики.

В России Г. Б. Бюльфингер (1727 г.), М. В. Ломоносов (1752 г.), Л. Эйлер (1750—1765 гг.) развивали и продолжали труды основателей учения о трении.

В 1779 году французский физик Кулон выполнил большую серию опытов по изучению трения скольжения. Обобщив эти эксперименты, Кулон выразил силу трения в виде двучлена:

$$F = A + \frac{N}{\mu}, \quad (2)$$

где  $\mu$  он назвал коэффициентом трения.

Закон Кулона в современном выражении имеет вид:

$$F = A + fN. \quad (3)$$

Первый член зависит от степени сцепленности поверхностей, второй — от величины давления на них.

Формула Кулона была основательно забыта и спустя почти 150 лет вновь «открыта» немецким ученым Саксом (1924 г.), англичанином Морроу (1931 г.) и теоретически обоснована Б. В. Дерягиным (1934 г.).

Приближенность и неточность широко применяемого в

технике закона Амонтона, невозможность объяснить с его помощью многие явления трения, вызвали ряд новых исследований, в подавляющем большинстве которых отвергается сложившаяся в конце XVIII века механическая теория трения.

Многочисленные попытки проникнуть в физическую сущность природы трения привели к появлению молекулярных теорий. Основные из них: теория Томлинсона, теория Дерягина и молекулярно-механическая теория Крагельского.

За рубежом распространение имеет теория трения Боудена и Тейбора, согласно которой трение обусловлено преодолением мостиков сварки, образующихся между соприкасающимися телами. Однако этой теорией нельзя объяснить механизм трения неметаллических тел.

И. В. Крагельский выводит обобщенный закон сухого трения, выражаемый формулой:

$$F = \alpha S_{\phi} + \beta N, \quad (4)$$

где  $F$  — сила трения;

$S_{\phi}$  — фактическая площадь контакта трущихся тел;

$N$  — нормальное давление;

$\alpha$  и  $\beta$  — константы, связанные с физическими и механическими характеристиками трущейся пары.

И. В. Крагельский, по выражению проф. А. К. Зайцева, «...впервые перекинул мост от элементарных законов трения к закономерностям трения реальных шероховатых поверхностей».

Г. И. Елифанов рассматривает трение, как процесс сдвигобразования, протекающий в тонких поверхностных слоях трущихся тел.

В работах В. В. Гортинского отмечается различие коэффициентов сопротивления (коэффициентов трения) относительно сдвигу слоев сыпучего тела, расположенных на различных расстояниях от поверхности сита отсева.

Многочисленные исследования трения скольжения позволили установить определенные зависимости сил и коэффициентов трения от различных внешних факторов (нормального давления, шероховатости, площади контакта, температуры трущихся тел, наличия пленок окислов, влажности, продолжительности неподвижного контакта, скорости относительного перемещения).

Наиболее изучены закономерности трения металлов. Наименее разработаны вопросы «сухого» трения (трения тел без смазки), несмотря на то, что именно этот вид трения был объектом изучения первых исследователей.

Совершенно недостаточное развитие получили исследования закономерностей трения материалов растительного происхождения. Обоснование параметров рабочих органов сельскохозяйственных и других машин при их технологическом расчете требует выявления и изучения закономерностей сухого трения твердых тел. При этом большой интерес представляет исследование малоизученного явления — послыстного трения, закономерностей передачи движения через трение.

## ГЛАВА II

### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

В этой главе рассмотрена плоская задача динамики сыпучей среды применительно к технологическим процессам сельскохозяйственных машин.

Для случая установившегося движения получены следующие пять уравнений:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho \left( \frac{\partial U_x}{\partial x} U_x + \frac{\partial U_x}{\partial y} U_y \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho \left( \frac{\partial U_y}{\partial x} U_x + \frac{\partial U_y}{\partial y} U_y \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{2 U_x U_y \mp (U_x^2 - U_y^2) \operatorname{ctg} \varphi}{(U_x^2 - U_y^2) \pm 2 U_x U_y \operatorname{ctg} \varphi} = \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (8)$$

$$\frac{((\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau_{xy}^2)}{(\sigma_x + \sigma_y)^2} = \sin^2 \varphi \quad (9)$$

В этих уравнениях:

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  — компоненты тензора напряжений;

$\rho$  — плотность сыпучей среды;

$U_x$  и  $U_y$  — проекции скорости частицы сыпучей среды на оси неподвижной декартовой системы координат  $xOy$ ;

$\varphi$  — угол внутреннего трения.

Уравнения (5) и (6) представляют собой дифференциальные уравнения плоского движения произвольной сплошной среды.

Выражение (7) является условием несжимаемости среды.

Алгебраическое равенство (8) определяет траектории движения отдельных слоев сыпучей среды в зависимости от состояния ее напряженности.

Соотношение (9) выражает условие предельного состояния любого слоя сыпучей среды.

Показано, что при передаче движения через трение затухание движения, при прочих равных условиях, зависит от двух показателей: коэффициента трения сыпучей среды и массы (веса) ее зерен.

На основании теории размерностей получено дифференциальное уравнение, связывающее между собой величину удельного давления  $p$  с глубиной  $h$  расположения соответствующего слоя сыпучей среды:

$$h^2 p'' - 2hp' - Ap = C \cdot \frac{h^2 p'^2}{p} \quad (10)$$

При решении этого нелинейного дифференциального уравнения второго порядка получено:

$$p = D_1 h^k (h^\lambda - D)^\gamma, \quad (11)$$

где  $D_1, k, \lambda, D, \gamma$  — константы.

Минимальное значение функции  $p$  таково:

$$p_{\min} = D_1 \left( \frac{DK}{K+\lambda\gamma} \right)^{\frac{k}{\lambda}} \cdot \left( \frac{DK}{K+\lambda\gamma} - D \right)^\gamma \quad (12)$$

При этом толщина (глубина) «активного слоя» выражается равенством:

$$h_{\max} = \left( \frac{DK}{K+\lambda\gamma} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (13)$$

Положения, рассмотренные в данной главе, имеют общий характер. Они применимы для каждого частного случая. Но решение приведенных уравнений представляет значительные трудности и поэтому для выявления причин передачи движения через трение и установления определенных закономерностей этого явления были проведены специальные экспериментальные исследования.

## ГЛАВА III

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сложность изучаемого явления и отсутствие рекогносцировочных материалов потребовала применения специальной методики, позволяющей вести экспериментальные исследования в два этапа — на первом этапе, имеющем характер рекогносцировки, использовался динамометрический метод, на втором, основном, этапе — осциллографический. Динамометрические замеры позволили наметить направление исследований и установить главнейшие закономерности явления, осциллографические измерения — произвести проверку динамометрических данных, их уточнение, углубление и окончательное выяснение характерных особенностей передачи движения через трение.

Конечные цели исследования требовали применения в экспериментах только материалов растительного происхождения. Подопытными материалами являлись: коленкор, дерматин, плексиглас, картон, пшеница, просо. Выбор этих материалов давал возможность выяснить влияние физической природы твердых тел на закономерности их послойного трения.

Эксперименты проводились на специальной установке с использованием осциллографа Н-700 Кишиневского завода.

Обработка опытных данных осуществлялась методом наименьших квадратов.

При динамометрических замерах повторность опытов была 12—20-кратной. Повторность каждого опыта при осциллографировании 6-кратная.

Всего было проведено свыше 2300 опытов и сделано около 8000 измерений.

## ГЛАВА IV

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСЛОЙНОГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В этой главе установлены основные причины передачи движения через трение и выведены определенные закономерности.

Решающим фактором, влияющим на процесс послойного сухого трения твердых тел, является нормальное сжимающее давление. Сжимающей нагрузке принадлежит ведущая роль

в формировании фактической площади контакта трущихся тел, на которой развиваются силы трения.

В системе плоских однородных тел, наложенных одно на другое, когда дополнительная сжимающая нагрузка достигает некоторого значения  $Q = Q_1$ , начинает двигаться нижележащее второе тело (внешний импульс приложен к верхнему телу), при этом силы трения  $F_0 = F_1$ . Момент начала движения второго тела является первой переходной точкой. При  $Q = Q_1$  между коэффициентами трения первой (верхней) пары контактирующих тел  $f_0$  и второй пары  $f_1$  справедливо соотношение:

$$f_1 = (0,77 \div 0,79) f_0. \quad (14)$$

Физический смысл этого соотношения состоит в том, что при упруго-пластических деформациях происходит некоторое изменение физико-механических свойств материалов растительного происхождения в сторону их упрочнения.

В работе показано, что

$$\frac{f_1}{f_0} = \alpha \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (15)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности;

$K_1$  и  $K_2$  — модули упругости первой и второй пары контактирующих тел.

При  $Q = Q_2$  начинается движение третье тело (или третий слой), причем  $F_0 = F_1 = F_2$  (вторая переходная точка). Среднее значение отношения  $\frac{f_2}{f_1}$  составляет при этом 0,88.

При значении  $Q = Q_3$  начинается движение четвертое тело (третья переходная точка):

$$F_0 = F_1 = F_2 = F_3, \quad f_3 \approx 0,94 f_2.$$

На рис. 1 приведен график изменения коэффициентов послойного трения пшеницы и проса. По оси абсцисс отложена дополнительная сжимающая нагрузка. Из графика видно, что с увеличением давления коэффициент трения  $f_0$  первой пары контактирующих слоев несколько уменьшается, а затем становится практически постоянным. Коэффициенты трения  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  с ростом нагрузки возрастают (с момента начала движения тел — монотонно), стремясь в пределе к некоторому постоянному значению.

Снижение удельного давления, являющееся следствием диссипации сжимающей силы, в условиях упругого контакта трущихся тел, уменьшает  $S_{\phi}$  — площадь фактического кон-

такта и создает большой разрыв в значениях  $f_0$  и  $f_1$  в области малых нагрузок. Влияние собственного веса тел, увеличивающего удельное давление и, следовательно  $S_{\phi}$  уменьшает этот разрыв между значениями коэффициентов трения  $f_1$  и  $f_2$ ,  $f_2$  и  $f_3$ .

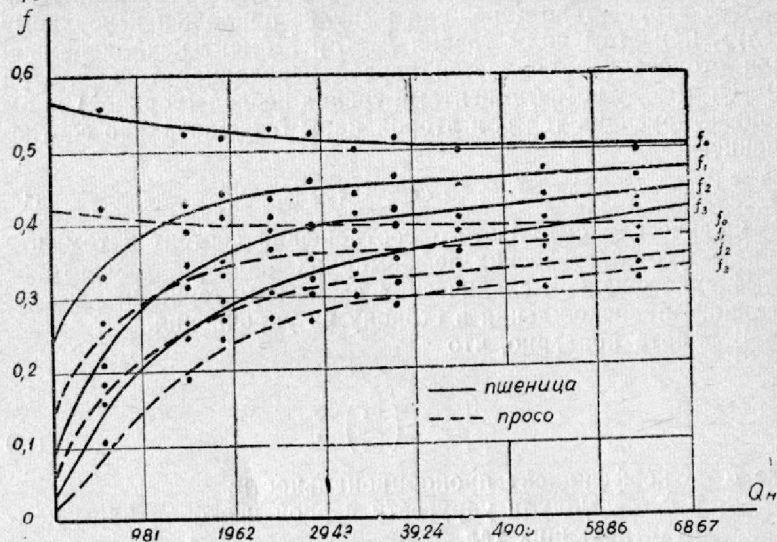


Рис. 1. График изменения коэффициентов послыного трения пшеницы и проса.

Снижение значения  $f_0$  происходит до определенного предела, то есть до установления почти постоянного соотношения между давлением и площадью истинного контакта.

В области высоких давлений наблюдается преодоление упругих свойств тел сжимающей нагрузкой, как следствие этого — выравнивание площади фактического контакта между разными слоями и сближение значений коэффициентов трения  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ .

Разницы (почти одинаковые) между парами их величин объясняются только влиянием собственного веса тел. Непрерывное возрастание  $N$  ведет к тому, что роль первого члена формулы  $f = \frac{\alpha S_{\phi}}{N} + \beta$  становится незначительной и коэффициент трения приближается к постоянной величине. В условиях, когда собственный вес тел незначителен, а  $N \rightarrow \infty$ , коэффициенты трения  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  стремятся в пределе к значению  $f_0$ .

Результаты экспериментов позволили вывести общую закономерность изменения коэффициента послыного сухого трения твердых тел:

$$\hat{f}_n = \hat{f}_{n-1} \cdot \eta_n, \quad (16)$$

где  $\eta_n$  — показатель изменения коэффициента послыного трения:

$$\eta_n = \alpha \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{2}{3 \cdot 2^{n-1}}} \approx 0,78^{\frac{1}{2^{n-1}}} \quad (17)$$

( $\alpha$  — коэффициент пропорциональности,  
 $n$  — порядковый номер слоя).

Для пользования уравнениями (16) и (17) следует иметь в виду, что коэффициент трения между первым и вторым слоем обозначается  $f_0$ , между 2 и 3 слоем —  $f_1$ , между 3 и 4 слоем —  $f_2$  и т. д. Нумерация слоев (тел) начинается с нулевого, а не с первого слоя, т. е. первым считается слой, приводимый в движение через трение, а не импульсом, полученным извне.

Уравнение закономерности (17) позволяет получить числовое значение  $\eta_n$ , при котором может начать движение  $n$ -ое

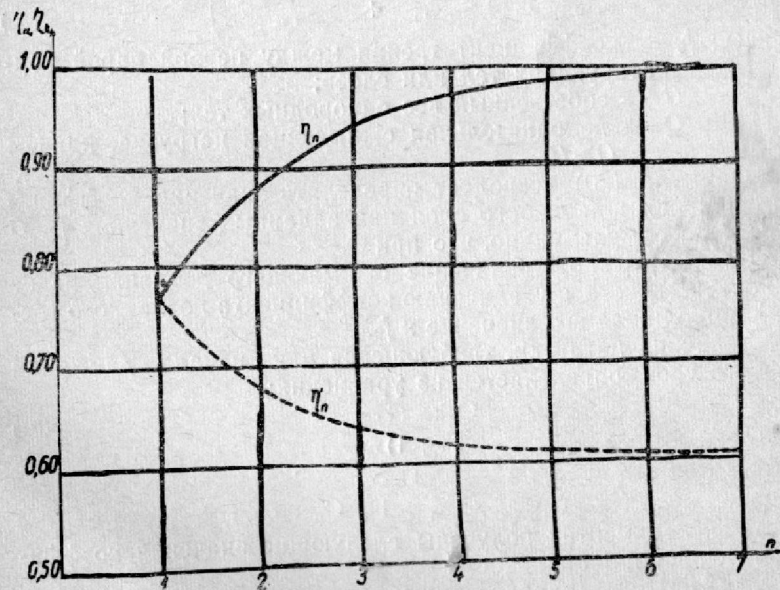


Рис. 2. Показатели уменьшения коэффициентов послыного трения.

тело. График этой закономерности — сложная показательная кривая (рис. 2). Функция имеет только положительные значения, монотонно возрастая от 0,78 до 1. При  $n \rightarrow \infty$ ,  $\eta_n \rightarrow 1$ .

Величина коэффициента послойного трения  $f_n$  любого слоя связана со значением  $f_0$  между первой парой контактирующих слоев выражением:

$$f_n = f_0 \eta'_n, \quad (18)$$

$$\eta'_n = 0,78 \frac{2^n - 1}{2^{n-1}}. \quad (19)$$

Значение функции  $\eta'_n$  (в отличие от  $\eta_n$ ) монотонно убывает (рис. 2) от 0,78 до 0,608.

При  $n = 1$ ,  $\eta'_1 = \eta_1 = 0,78$ ;

при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\eta'_n \rightarrow 0,608$ .

Уменьшение  $\eta'_n$  (а следовательно и  $f_n$ ) кладет предел передачи движения через трение нижележащим слоям.

Установлена также общая зависимость значения коэффициента послойного сухого трения от сжимающей нагрузки и собственного веса тел:

$$f_n = f_0 \left( 1 - \frac{nG}{Q} + \frac{n(n+1)G^2}{Q^2} \right). \quad (20)$$

Здесь:  $f_0$  — коэффициент трения между первой парой контактирующих тел или слоев;

$G$  — собственный вес однородных тел;

$Q$  — дополнительная сжимающая нагрузка, причем  $Q > G$ .

Формула (20) позволяет определить значение коэффициента трения для любого слоя при заданных значениях  $f_0$ ,  $G$  и  $Q$ . Из формулы видно, что при  $Q \rightarrow \infty$ ,  $f_n \rightarrow f_0$ .

Следовательно, увеличение сжимающего давления ведет в конечном счете к увеличению коэффициента послойного трения, приближая его значение к  $f_0$ .

Величина нагрузки, требующейся для начала движения любого слоя, определяется из уравнения:

$$Q_n = G \cdot \tau_n, \quad (21)$$

где

$$\tau_n = \frac{(n+1)\eta_n - n}{1 - \eta_n}.$$

При  $n \rightarrow \infty$ , ( $\eta_n \rightarrow 1$ ),  $Q_n \rightarrow \infty$ .

В экспериментах получены следующие значения коэффициента пропорциональности  $\tau_n$ :

$\tau_1 = 2,541 \dots$  (начало движения второго тела),

$\tau_2 = 5,334 \dots$  (то же — третьего тела),

$\tau_3 = 12,67 \dots$  (то же — четвертого тела).

Если к верхнему слою приложена некоторая сила  $P$ , направленная под углом  $\alpha$  к перемещению слоев, то величина этой силы, необходимой для приведения в движение второго слоя (при  $Q=0$ ), выражается соотношением:

$$P = \frac{\tau_1 G}{\sin \alpha}. \quad (22)$$

Увеличение угла приложения силы  $P$  влечет за собой увеличение передвижения нижележащих слоев, но до определенного предела; при

$$f_0 (P \sin \alpha + G) \geq P \cos \alpha \quad (23)$$

движение прекращается.

Угол  $\alpha$  в момент прекращения движения определяется из уравнения:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{P^2 (1 + f_0^2) - f_0^2 G^2} - f_0^2 G}{P (1 + f_0^2)}. \quad (24)$$

Как видно из формулы (21), теоретически в движение может прийти любое количество тел (слоев), если обеспечена необходимая сжимающая нагрузка  $Q$ . Однако практически имеется предел числа движущихся слоев.

Расчет по этой формуле показывает, что для приведения в движение шестого (по счету сверху) тела весом 0,4 кг потребуется нагрузка  $\sim 24$  кг, что практически граничит с невозможностью передачи движения через трение.

При большой нагрузке, в условиях значительного увеличения диссипации энергии, при недостаточной упругости трущихся шероховатых поверхностей (неидеальном контакте), площадь фактического контакта увеличивается непропорционально давлению; рост нормального давления опережает рост силы трения, что ведет к снижению коэффициента трения (то же у А. К. Зайцева). Уменьшение коэффициента трения нижележащих слоев кладет предел движению их.

## ГЛАВА V

### ПОСЛОЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Причиной послойного движения твердых сухих тел (слоев) является различие коэффициентов трения между отдельными слоями.

Непременное условие начала движения любого слоя —

возникающая между ним и последующим слоем сила трения должна достигнуть максимального возможного значения.

Теоретически показано, а экспериментами подтверждено, что усредненные пути перемещения тел при их послойном движении уменьшаются по геометрической прогрессии:

$$x_n = x_0 e^{-c_0 n}, \quad (25)$$

где  $x_0$  — перемещение верхнего (первого) слоя, получающего импульс движения извне;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$c_0$  — некоторый безразмерный коэффициент;

$n$  — порядковый номер слоя, причем для верхнего (первого) слоя  $n=0$ .

Равенство (25), как формулу убывающей геометрической прогрессии, можно представить в виде:

$$x_n = x_0 q^n, \quad (26)$$

где  $q < 1$  (знаменатель прогрессии).

Связь между величинами  $c_0$  [формула (25)] и  $q$  такова:

$$-c_0 = \ln q. \quad (27)$$

Формула распределения скоростей при установившемся движении имеет вид:

$$V_n = V_0 q^n, \quad (28)$$

где  $V_0$  — скорость верхнего слоя, получающего импульс движения извне.

Величины  $c_0$  и  $q$ , входящие в выражения (25) и (26), зависят от рода трущихся тел.

Средние значения  $c_0$  и  $q$  для некоторых исследованных материалов приведены в таблице 1:

Таблица 1

Материал	Абсолютные перемещения		Относительные перемещения	
	$q$	$c_0$	$q$	$c_0$
Плексиглас . . . . .	0,376	0,98	0,447	0,81
Просо . . . . .	0,320	1,14	0,368	0,99
Картон . . . . .	0,269	1,31	0,301	1,20
Пшеница . . . . .	0,236	1,44	0,258	1,35

Между величинами  $q$ , характеризующими степень затухания движения при послойном трении твердых тел, и коэффициентами трения  $f_0$  имеется определенная закономерность.

Анализ экспериментальных данных и соответствующие расчеты позволили установить следующее: отношение коэффициента трения  $f_0$  между первой парой контактирующих тел к величине  $c_0$  для всех исследованных материалов является примерно одинаковым, то есть:

$$\frac{f_0}{c_0} = C. \quad (29)$$

Ниже приводятся результаты вычислений значения  $C$  для абсолютных перемещений тел:

Плексиглас — 0,38—0,39

Просо — 0,36—0,38

Картон — 0,39—0,40

Пшеница — 0,35—0,38.

Таким образом, для растительных материалов  $C = \text{const} \approx 0,38$ .

Формула (29), учитывая соотношение (27), может быть представлена в виде:

$$-\frac{f_0}{\ln q} = C, \quad (30)$$

откуда:

$$q = e^{-\frac{f_0}{C}}. \quad (31)$$

Если известно значение коэффициента трения  $f_0$ , то по формуле (31) определяется величина  $q$ , характеризующая степень затухания движения при послойном «сухом» трении твердых тел (слоев).

Практически в послойном движении, вызываемом трением, участвует не более 4—6 слоев.

## ГЛАВА VI

### ПРИМЕНЕНИЕ ВЫВЕДЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НЕКОТОРЫХ МАШИН

Результаты экспериментального исследования и теоретического анализа послойного трения твердых тел могут найти применение в сельскохозяйственном машиностроении и муко-

мольно-элеваторном производстве, в строительном и горном деле — во всех тех случаях, где имеют место расчеты, связанные с механикой сыпучих тел.

В качестве практических примеров в главе приводится анализ и технологический расчет рабочего процесса высевяющих аппаратов зерновых сеялок, а также движения зернового материала на решетках.

### Высевающие аппараты

В работе катушечного высевяющего аппарата имеют место три вида движения зернового потока: свободное, принудительное и движение «активного слоя» зерна.

Общий высев зерна является суммой высева за счет принудительного перемещения и за счет движения «активного слоя» — результата передачи движения через трение от импульса катушки.

Объем семян за 1 оборот катушки, перемещаемый за счет послынного движения их (с учетом изменения длины дуги каждого слоя перемещаемого зерна), определяется выражением:

$$V_{\text{акт}} = b l \pi d_k \left[ 1 + q + q^2 + \frac{2 b q}{d_k} (1 + 2q) \right], \quad (32)$$

где  $b$  — средний поперечный размер зерна;

$l$  — величина открытия катушки;

$d_k$  — наружный диаметр катушки;

$q$  — показатель, характеризующий затухание движения (для пшеницы, в среднем,  $q=0,236$ ).

Вычисленное удельное значение высева за счет послынного движения зернового потока (в процентах к общему высеву) равно 46,91%. Это указывает на значительную роль послынного движения зерна в общем высеве семян ребристой катушкой.

По экспериментальным данным проф. А. Н. Семенова, удельный высев за счет движения «активного слоя» составляет 48,98%.

Разница между теоретически вычисленным и экспериментальным значением равна 2,07%.

На основании закономерностей послынного трения рассчитана минимальная высота прохода  $h_{\text{min}}$  между катушкой высевяющего аппарата и дном коробки:

$$h_{\text{min}} \geq 4 \sqrt{BC}, \quad (33)$$

где  $\sqrt{BC}$  — средний поперечный размер семян.

Если желательно уменьшить величину высева зерна за счет «активного слоя», то необходимо выполнение условия:

$$f' > \eta'_3 f_0, \quad (34)$$

где  $f'$  — коэффициент внешнего трения зерна о дно коробки;  $\eta'_3 \approx 0,645$  (показатель уменьшения коэффициента полойного трения);

$f_0$  — коэффициент внутреннего трения первой пары контактирующих слоев.

Условие (34) легко соблюсти, если поверхность дна коробки высевяющего аппарата изготовлять шероховатой.

### Технологический процесс работы решет

Процесс работы решета складывается из перемещения зернового слоя по его поверхности и просеивания зерен через рабочие отверстия решета, что обеспечивается его колебательным движением.

В работе решета имеет место передача движения через трение в слое зерна. Увлекая нижний слой зерна действием трения, движущееся решето сообщает ему скорость не более своей максимальной скорости. Силы трения передают движение вышележащим слоям зерна.

Для анализа просеивания зерна наибольший интерес представляет его относительное движение по решету. Выражение для средней скорости движения нижнего слоя зерна имеет вид:

$$V_{\text{cp}} = \frac{A}{t_2 - t_1} \left[ r (\cos \omega t_1 - \cos \omega t_2) + r \omega \sin \omega t_1 (t_1 - t_2) + \frac{B}{2} (t_2 - t_1)^2 \right], \quad (35)$$

где  $r$  — радиус кривошипа;

$\omega$  — его угловая скорость;

$A = \cos \alpha + \text{tg } \varphi \sin \alpha$

( $\alpha$  — угол наклона решета к горизонту,

$\varphi$  — угол трения зерна о поверхность решета);

$B = g \text{tg } (\varphi - \alpha)$

( $g$  — ускорение свободного падения);

$t_1$  и  $t_2$  — моменты времени:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arccos \left[ \frac{g \text{tg } (\alpha - \varphi)}{\omega^2 r} \right], \quad t_2 = t_1 + \frac{r \omega (1 + \sin \omega t_1)}{B}.$$

V000673

Взаимозависимость между относительным движением слоев зернового материала, размерами зерна и отверстий решета выражается уравнением:

$$1 \geq \sqrt{BC} + V_r^{cp} \sqrt{\frac{2\sqrt{BC}}{g}}, \quad (36)$$

где  $l$  — длина отверстия;

$\sqrt{BC}$  — средний поперечный размер зерна;

$V_r^{cp}$  — средняя скорость движения двух слоев, расположенных ближе к поверхности решета:

$$V_r^{cp} = \frac{V_{cp}(1+q)}{2}.$$

Анализ послыонного движения зернового материала по решету позволяет произвести ориентировочный расчет оптимальной суммарной толщины слоя зерна:

$$H_0 = 17 \sqrt{BC} \quad (37)$$

Если исходная зерновая смесь, поступающая на решето, содержит большое количество сходовой фракции зерна, то толщина зернового слоя должна быть меньше  $H_0$ , так как при этом эффективность влияния послыонного движения на процесс просеивания снижается; увеличение производительности в этом случае должно быть осуществлено за счет повышения скоростного режима решета.

## ВЫВОДЫ

Широко распространенное явление послыонного сухого трения твердых тел, оказывающее существенное влияние на количественную и качественную стороны технологических процессов многих машин, до последнего времени почти не было объектом научных исследований. Теоретические изыскания, динамометрические и осциллографические эксперименты, проведенные нами в целях выявления некоторых закономерностей послыонного сухого трения твердых тел при передаче движения через трение, позволили прийти к следующим выводам:

1. Послыонное сухое трение, как и трение одной пары несмазанных поверхностей, является следствием возникновения молекулярно-механической связи в местах контакта трущихся тел, имеющей упруго-пластический характер.

2. Исходя из уравнения предельного равновесия (устанавливающего связь между удельной силой трения, нормальным удельным давлением и коэффициентом внутреннего трения) и используя теорию размерностей, получена степенная зависимость удельного давления  $p$  от глубины расположения слоев  $h$  в сыпучей среде:

$$P = D_1 h^k (h^\lambda - D)^\gamma$$

( $D_1, k, \lambda, D, \gamma$  — константы).

3. Передача движения через трение наблюдается при наличии некоторой сжимающей нагрузки  $Q$  (при горизонтальном внешнем импульсе) или тогда, когда внешняя сила  $P$  приложена под определенным углом к направлению перемещения слоев.

4. Значение коэффициента трения между разными слоями одинаковых по физико-механическим свойствам тел не является постоянным. При передаче силы через трение наблюдается уменьшение коэффициента трения между второй парой тел по сравнению с коэффициентом трения между первой парой; это уменьшение закономерно и происходит в определенных пределах.

5. Значение показателя изменения коэффициента послыонного трения ( $\eta$ ) между второй парой тел:

$$\eta = 0,77 \div 0,79.$$

Физическое значение этого показателя заключается в том, что он пропорционален отношению модулей упругости контактирующих тел, взятому в степени  $\frac{2}{3}$ :

$$\eta = \alpha \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности.

6. Величина показателя изменения коэффициента трения между последующими слоями следует возрастающей геометрической прогрессии и подчиняется закономерности:

$$\eta_n = \alpha \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{2}{3 \cdot 2^{n-1}}} \approx 0,78 \frac{1}{2^{n-1}}$$

( $n$  — порядковый номер слоя).

График этой зависимости — показательная кривая.

При  $n \rightarrow \infty, \eta_n \rightarrow 1$ .

7. Числовое значение коэффициента трения каждого последующего слоя в момент начала движения определяется в зависимости от значения  $f$  предыдущего слоя:

$$f_n = f_{n-1} \gamma_n.$$

8. Значение коэффициента трения любого слоя в зависимости от значения  $f_0$  между первой парой контактирующих слоев находится из выражения:

$$f_n = f_0 \gamma'_n,$$

где

$$\gamma'_n = 0,78 \frac{2^n - 1}{2^{n-1}}.$$

При  $n \rightarrow \infty$ ,  $\gamma'_n \rightarrow 0,608$ .

9. Зависимость величины коэффициента послойного сухого трения от сжимающей нагрузки  $Q$  и собственного веса тел  $G$  устанавливается уравнением:

$$f_n = f_0 \left( 1 - \frac{nG}{Q} + \frac{n(n+1)G^2}{Q^2} \right).$$

При  $Q \rightarrow \infty$ ,  $f_n \rightarrow f_0$ .

10. Количество слоев (тел), приводимых в движение через трение, зависит от сжимающей нагрузки. Величина нагрузки, требующейся для движения любого тела, такова:

$$Q_n = G \frac{(n+1)\gamma_n - n}{1 - \gamma_n}.$$

При  $n \rightarrow \infty$ , ( $\gamma_n \rightarrow 1$ ),  $Q_n \rightarrow \infty$ .

11. Если внешняя сила  $P$  приложена под углом  $\alpha$  к направлению перемещения слоев, то ее величина (при  $Q=0$ ) вычисляется по формуле:

$$P = \frac{\tau_n G}{\sin \alpha},$$

где  $\tau_n$  — коэффициент пропорциональности.

12. Передача движения силами сухого трения в слое сыпучей среды характеризуется резким его затуханием. Величина  $q$ , характеризующая степень затухания движения при послойном сухом трении твердых тел, обратно пропорциональна коэффициенту внутреннего трения  $f_0$  (т. е. зависит от рода трущихся тел):

$$q = e^{-\frac{f_0}{c}},$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов;

$C$  — константа (для материалов растительного происхождения  $C \approx 0,38$ ).

13. Распределение скоростей при послойном движении твердых тел устанавливается зависимостью:

$$V_n = V_0 q^n$$

( $V_0$  — скорость движения слоя, получающего импульс движения извне).

График этой закономерности — экспоненциальная кривая. В движении, вызываемом трением, практически участвует не более 4—6 слоев.

14. Приложение полученных закономерностей к технологическим процессам высевальных аппаратов и плоских решет позволяет:

а) рассчитать весовое количество семян, высеваемых за счет «активного слоя»;

б) определить минимальную высоту прохода между катушкой высевального аппарата и дном коробки;

в) установить условие для уменьшения величины высева зерна за счет «активного слоя»;

г) установить более рациональный скоростной режим работы решет, с учетом послойного движения зернового материала;

д) вычислить оптимальную толщину зернового слоя на решетке.

\* \* \*

Основные положения диссертации доложены на VIII и IX Всесоюзных памяти академика В. П. Горячкина конференциях по земледельческой механике (ВАСХНИЛ, Москва) в мае 1962 г. и в июне 1963 г., на III научной конференции молодых ученых Молдавии (АН МССР, Кишинев) в октябре 1962 г. и на научной конференции профессорско-преподавательского состава Кишиневского сельскохозяйственного института в декабре 1963 г.

*Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:*

1. Из истории учения о трении твердых тел, Труды Кишиневского сельскохозяйственного института, том 23, Кишинев, 1961. (Соавтор А. Н. Семенов).
  2. Осциллографирование при исследовании технологических процессов сельскохозяйственных машин. Труды Кишиневского сельскохозяйственного института, том 23, Кишинев, 1961. (Соавтор А. Н. Семенов).
  3. Закономерности послынного трения твердых тел. Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по земледельческой механике, М., 1963.
  4. О закономерностях послынного сухого трения твердых тел. Труды третьей конференции молодых ученых Молдавии, вып. 1, Кишинев, 1964.
  5. Об уравнениях движения сыпучей среды. Труды Кишиневского сельскохозяйственного института, том 33, вып. 1, Кишинев, 1964.
  6. О некоторых закономерностях послынного сухого трения твердых тел. Труды Кишиневского сельскохозяйственного института, том 33, вып. 1, 1964.
  7. Послынное движение твердых тел. Труды Кишиневского сельскохозяйственного института, том 33, вып. 1, 1964.
-