

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий



Кафедра деталей машин  
и основ инженерного проектирования

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ**

Методические указания  
к лабораторной работе  
для студентов  
специальности 170600

Санкт-Петербург 2003

УДК 547.1(075)

**Бойцов Ю.А.** Исследование внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов: Метод. указания к лабораторной работе для студентов спец. 170600. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 10 с.

Приведены методические указания к лабораторной работе по исследованию внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов.

Рецензент

Доктор техн. наук, проф. С.А. Громцев

Одобрены к изданию советом факультета техники пищевых производств

© Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2003

## Цель работы

Исследование внутреннего трения сыпучих грузов, а также их трения о конструкционные материалы. Это требуется при проектировании и эксплуатации транспортирующих и погрузочно-разгрузочных машин и устройств.

## Основные положения и расчетные зависимости

Трибологические свойства сыпучих грузов лежат в основе выбора, проектирования и эксплуатации погрузочно-разгрузочного и транспортирующего оборудования пищевых предприятий и складов. Об этих свойствах принято судить по величине угла естественного откоса  $\varphi_0$  и соответствующего ему коэффициента внутреннего трения  $f_0$ , а также по величине коэффициента внешнего трения покоя  $f$  и движения  $f'$ .

Угол естественного откоса  $\varphi_0$  – это угол, образованный горизонтальной плоскостью и плоскостью естественного откоса сыпучего груза или угол между плоскостью основания и образующей конуса, получающегося при свободном падении сыпучего груза на горизонтальную плоскость (рис. 1). Этот угол характеризует сыпучесть материала, т. е. способность скользить или скатываться по наклонной поверхности. Наименьшим углом естественного откоса обладают грузы, состоящие из тел с гладкой поверхностью (горох, просо, соя, яблоки, чистый картофель, свекла и др.). При отклонении от шарообразной формы сыпучесть уменьшается (сахар, поваренная соль, овес, морковь и др.). Угол естественного откоса необходимо знать при проектировании складов, бункеров, транспортирующих и погрузочно-разгрузочных устройств, так как соотношения размеров основания и высоты массива груза на несущем элементе зависят от величины этого угла. Тангенс угла  $\varphi_0$  есть *коэффициент внутреннего трения сыпучего груза*  $f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0$ .

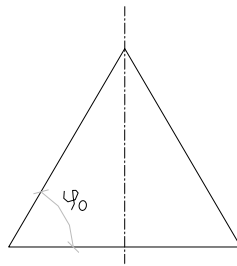


Рис. 1

*Коэффициент внешнего трения  $f$*  сыпучего груза о поверхности из различных конструкционных материалов (сталь, дерево, резина, пластмасса, бетон и т. п.) также необходимо знать при проектировании и эксплуатации транспортирующих устройств и различного вспомогательного оборудования (бункеров, воронок, плужковых сбрасывателей и т. п.). Угол, при достижении которого наклонной поверхностью груз начинает скользить по ней, называется *углом внешнего трения  $\varphi$*  и связан с коэффициентом  $f$  зависимостью

$$f = \operatorname{tg} \varphi.$$

Различают коэффициенты внешнего трения в состоянии покоя и движения. Коэффициент внешнего трения груза в движении меньше, чем в состоянии покоя на 10...30 %, а иногда выходит за эти пределы. Это связано с возникновением вибраций в движущихся грузах и элементах машин, а также с рядом факторов, характеризующих физико-химическое состояние трущихся поверхностей.

*Коэффициент внешнего трения покоя  $f'$*  численно равен тангенсу предельного угла наклона поверхности, при котором находящийся на ней груз приходит в движение. При этом составляющая силы тяжести, параллельная наклонной плоскости, становится равной силе трения для состояния покоя груза (рис. 2).

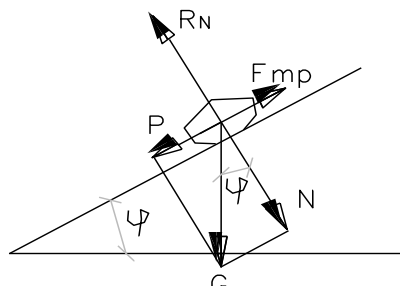


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что  $P = G \cdot \sin \varphi$ ,  $N = G \cdot \cos \varphi$ .

Поскольку сила трения  $F$  пропорциональна силе нормального давления  $N$ , получаем

$$F = f' \cdot N = f' \cdot G \cdot \cos \varphi; \quad G \cdot \sin \varphi = f' \cdot G \cdot \cos \varphi; \quad f' = \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Определить угол  $\varphi$  на практике можно, медленно наклоняя плоскость и фиксируя ее положение в момент начала движения груза. Определить подобным образом коэффициент внешнего трения движения невозможно.

Коэффициент внешнего трения движения  $f''$  определяется, исходя из следующих соображений. Предположим, что частица груза весом  $m g$  движется по наклонной плоскости, длина которой равна  $l$  (рис. 3).

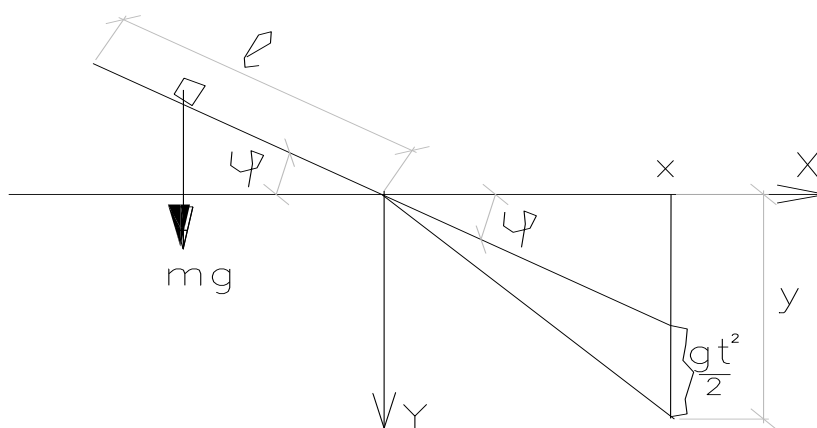


Рис. 3

Пренебрегая сопротивлением воздуха и считая, что коэффициент трения  $f''$  постоянен в период движения и происходит только скольжение груза по плоскости без перемещения частиц между слоями груза, можем написать уравнение, констатирующее равенство приращения кинетической энергии частицы работе, смещающей силы на пути  $l$

$$\frac{m \cdot V_1^2}{2} - \frac{m \cdot V_0^2}{2} = (m \cdot g \cdot \sin \varphi - m \cdot g \cdot f' \cdot \cos \varphi) \cdot l, \quad (2)$$

где  $V_0$  – начальная, а  $V_1$  – конечная скорость движения частицы по плоскости.

Решая уравнение (2) относительно  $V_1$ , получим

$$V_1 = \sqrt{(2g \cdot l \cdot (\sin \varphi - f'' \cdot \cos \varphi) + V_0^2)} \quad (3)$$

Рассмотрим движение частицы после схода с наклонной плоскости, считая, что она находится в условиях свободного падения, т. е. пренебрегаем сопротивлением воздуха. Тогда начальная скорость частицы  $V_1$  направлена под углом  $\varphi$  к горизонтали, а через  $t$  секунды координаты частицы будут равны

$$x = V_1 \cdot t \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

$$y = V_1 \cdot t \cdot \sin \varphi + \frac{g \cdot t^2}{2} \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (5) значение времени  $t$  из уравнения (4), имеем

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{g \cdot x^2}{2V_1^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (6)$$

Подставляя в (6) значение  $V_1$  из (3) и решая уравнение относительно  $f''$ , находим

$$f'' = \operatorname{tg} \varphi - \frac{x^2}{4l \cdot (y - x \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot \cos^3 \varphi} \quad (7)$$

При помощи подстановки координат частиц, свободно падающих после схода с наклонной плоскости, в уравнение (7) можно рассчитать коэффициент трения движения этих частиц по наклонной плоскости.

## Лабораторные установки и порядок выполнения работы

1. Угол естественного откоса определяют с помощью прибора, изображенного на рис. 4. Прибор представляет собой емкость в форме параллелепипеда 1, разделенную подвешенной перегородкой 2 на

две части – *a* и *б*. В часть *б* насыпают сыпучий груз. Винтом 3 перемещают перегородку 2, открывая поперечное щелевое отверстие 4 в днище, через которое высыпается часть груза.

Угол, образованный между поверхностью ската и горизонтальной плоскостью после того, как материал перестает сыпаться и есть угол естественного откоса. Его определяют угломером (транспортиром) через прозрачный экран. Емкость должна быть достаточно широкой (ширина ящика минимум в 2 раза больше его высоты) для уменьшения влияния на угол естественного откоса трения материала о боковые стенки ящика.

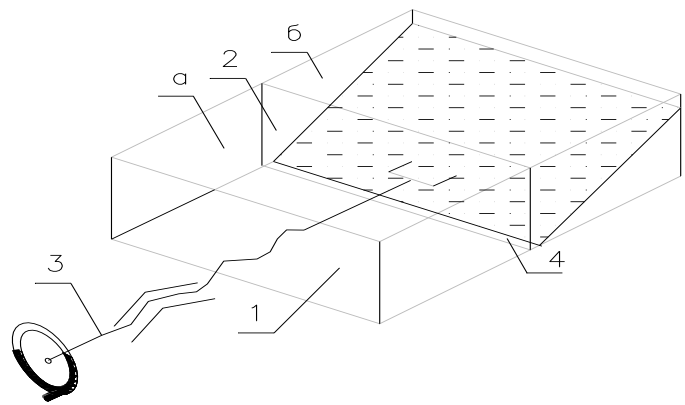


Рис. 4

2. Коэффициент внешнего трения покоя  $f'$  определяют при помощи приспособления, изображенного на рис. 5.

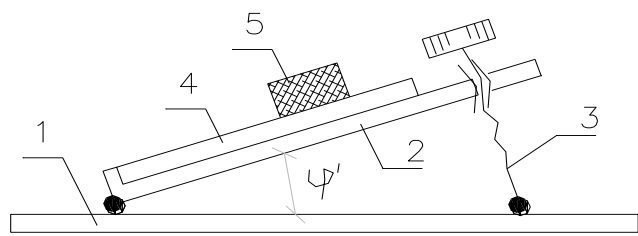


Рис. 5

К горизонтальной доске 1 шарнирно крепится планка 2, наклон которой относительно доски 1 изменяется винтом 3. На планку 2 устанавливается пластина 4 из испытываемого конструкционного материала. На пластине 4 крепится полая прямоугольная рамка 5, куда засыпается исследуемый сыпучий груз. После засыпки груза рамку 5 слегка приподнимают так, чтобы ее края не касались пластины 4, а сыпучий материал чуть-чуть показался из-под ее нижних граней. Медленно наклоняют планку 2 и пластину 4 винтом 3. Угол, при котором начнется движение рамки с грузом по пластине 4, и есть угол внешнего трения груза (сыпучего материала) о поверхность пластины. Результаты экспериментов заносят в табл. 1.

Таблица 1

№ пп	Сыпучий груз	Материал пластины	$\varphi'$	$f' = \operatorname{tg} \varphi'$
1				
2				

3. Коэффициент внешнего трения движения  $f''$  определяют при помощи установки, схема которой показана на рис. 6.

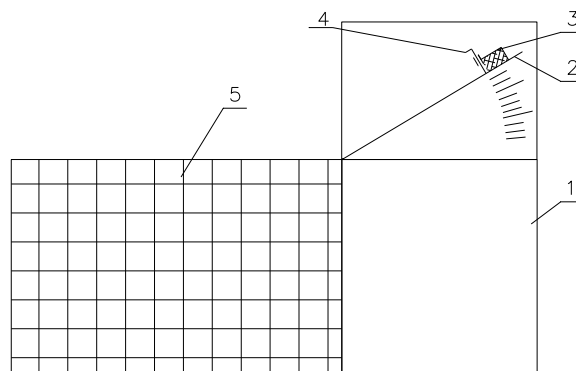


Рис. 6

Установка состоит из «Г»-образного ящика 1, в правом верхнем секторе которого установлена наклонная плоскость 2 из испытываемого конструкционного материала, на который закреплен загрузочный бункер 3 с подъемной задвижкой 4. Лицевая сторона левого нижнего сектора 5 должна быть в виде прозрачного экрана с координатной сеткой.



Для определения коэффициента внешнего трения нужно зафиксировать наклонную плоскость под некоторым углом  $\varphi$  к горизонтальной плоскости, засыпать груз в бункер 3 и открыть задвижку 4. Зафиксировав координаты  $x, y$  нескольких (обычно пяти) точек траектории движения струйки сыпучего груза в свободном полете, подставляют их в формулу (7) и определяют частные значения для каждой точки. Затем определяют среднее значение  $f''_{\text{ср}}$  для данного опыта. Результаты заносят в табл. 2.

Таблица 2

№ пп	Сыпучий груз	Материал плоскости	Угол наклона $\varphi'$	Координаты точек траектории										Коэффи- циент внутрен- него тре- ния дви- жения, $f''_{\text{ср}}$
				1		2		3		4		5		
				$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	
1														
2														

### Оформление работы

Отчет по работе должен содержать:

Цель работы.

Схемы экспериментальных установок с указанием составных частей и измерительных средств.

Основные теоретические зависимости.

Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

Выводы по результатам проделанной работы.

### Список литературы

1. **Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н.** Машины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1987. – 431 с.

2. **Зуев Ф.Г., Лотков Н.А., Полукин А.И.** Подъемно-транспортные машины зерноперерабатывающих предприятий. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.

3. **Спиваковский А.О., Дьячков В.К.** Транспортирующие машины. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

Бойцов Юрий Александрович

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ**

Методические указания  
к лабораторной работе  
для студентов  
специальности 170600

*Редактор*

Л.Г. Лебедева

*Корректор*

Н.И. Михайлова

---

Подписано в печать 23.09.2003. Формат 60×84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,7. Печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,5  
Тираж 100 экз. Заказ № С 47

---

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9  
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9