

ИЗМЕРЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО И КИНЕМАТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Дурнев, В. Ф. Першин

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. М. Червяков

Ключевые слова и фразы: внешнее трение; коэффициент трения движения; коэффициент трения покоя; сыпучий материал.

Аннотация: В соответствии с европейским стандартом на сдвиговом тестере Дженике определен и затем рассчитан статический коэффициент трения сыпучих материалов. Разработано устройство, которое позволяет измерять не только статические, но и кинематические силы трения.

Под сыпучим материалом подразумевается дисперсная система, состоящая из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте [1]. Физико-механические свойства сыпучего материала, определяющие его динамическое поведение и структурообразование, изучены в [2], но пока нет единого мнения, какие из свойств надо регламентировать и учитывать при описании движения сыпучего материала. Различают характеристики первого порядка (фундаментальные), такие как размер и форма частиц, и характеристики второго порядка, такие как углы и коэффициенты внешнего и внутреннего трения. Наиболее сильное влияние на движение сыпучего материала относительно рабочих поверхностей машины или аппарата, в которых осуществляются хранение, транспортировка или переработка сыпучего материала, оказывает коэффициент внешнего трения [3]. В настоящее время коэффициенты внешнего трения определяются в соответствии с европейским стандартом [4].

Для определения коэффициента внешнего трения используется тестер Дженике [3 – 5], схема которого показана на рис. 1. Испытания проводят следующим образом. Зернистый материал, для которого необходимо определить коэффициент внешнего трения, засыпают в секции 1, 2 и выравнивают по краю верхней секции. Далее на материал через прижимную плиту 4 передают усилие для его уплотнения, равное последующей на-

Дурнев Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин»; Першин Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», e-mail: pershin.home@mail.ru; ТамбГТУ, г. Тамбов.

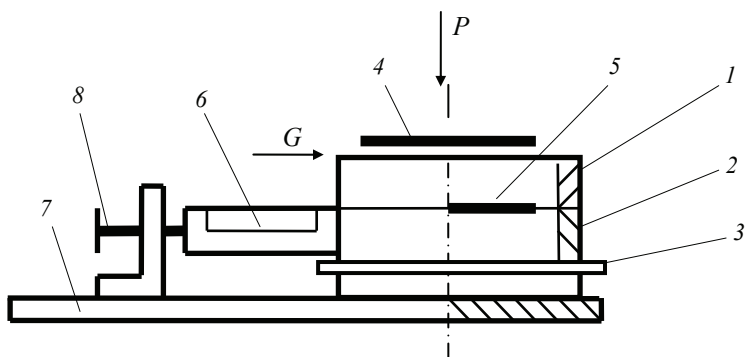


Рис. 1. Схема сдвигового тестера Дженике

грузке, и 10 – 15 раз поворачивают прижимную плиту вокруг вертикальной оси на угол $30...45^\circ$, добиваясь однородного уплотнения материала в секциях. После этого верхнюю секцию 1 снимают (сдвигают) вместе с материалом до верхнего уровня секции 2, которая установлена на пластине 3, выполненной из материала, относительно которого определяется коэффициент внешнего трения.

На сыпучий материал укладывают опорную плиту 5, на которую устанавливают гири с определенным весом. В результате действия вертикальной нагрузки P в зернистом материале возникают определенные нормальные напряжения σ_p . Кроме этого, в плоскости, на границе между секциями 1 и 2 возникают нормальные напряжения σ_m от веса сыпучего материала, находящегося в секции 1 и веса плиты 4. Нормальная сила, действующая на границе секций 1 и 2, определяется по формуле

$$N = P + M = A(\sigma_p + \sigma_m), \quad (1)$$

где A – площадь поперечного сечения секции 2, m^2 ; M – вес материала, находящегося в секции, г.

Посредством винтового привода 8 на секцию 2 передают сдвигающее усилие, величину которого фиксируют динамометром 6. В результате действия горизонтальной нагрузки G в зернистом материале, в зоне его соприкосновения с пластиной 3 возникают касательные напряжения. Величину усилия G увеличивают до тех пор, пока секция 2 не сдвинется относительно секции 1. Коэффициент внутреннего трения рассчитывают по формуле

$$f = G/N. \quad (2)$$

Следует отметить, что процедуры уплотнения материала и сдвига колец достаточно сложные. При их выполнении субъективный фактор играет весьма существенную роль. Так, например, экспериментальные данные по коэффициентам внешнего трения для одного и того же сыпучего материала, полученные в 13 разных лабораториях, отличались на 5 – 10 % [3]. Кроме этого, в литературных источниках [3, 4] отсутствует информация о том, учитывается вес материала, находящегося в секции 1, или нет. Считаем, что данный вопрос имеет принципиальный характер, поскольку при малых значениях силы P ошибка в определении нормальных напря-

жений, действующих в плоскости предполагаемого сдвига, может достигать 100 %.

В классической механике внешнее трение подразделяют на трение покоя (статическое) и кинематическое. Трение покоя возникает между неподвижными твердыми телами, когда какое-либо из них пытаются сдвинуть с места относительно другого тела. Кинематическое трение существует между взаимно соприкасающимися движущимися относительно друг друга твердыми телами. Так как сыпучий материал представляет собой совокупность контактирующих между собой твердых тел (частиц), есть все основания предполагать, что для сыпучих материалов следует различать статическое и кинематическое внешнее трение. Следовательно, необходимо разработать устройство для экспериментального определения этих коэффициентов. Поскольку традиционный прибор Дженике не позволяет определить кинематический коэффициент трения, проведена модернизация данного прибора (рис. 2). В отличие от прибора Дженике, пластина 3 расположена не на неподвижном основании, а на тележке 6, которая нитью 7 связана с лебедкой 8. Секция 2 нитью 9 через пружину 10 и блок 11 связана с гирей 12, установленной на весах 13.

Подготовка к проведению испытаний такая же, что и описанная выше для традиционного сдвигового прибора Дженике. После подготовки материала тележку 6 устанавливали таким образом, чтобы нить 9 была натянута. Включали лебедку 8 и с помощью видеокамеры фиксировали показания весов 13. Значения сдвигающей силы рассчитывали как разность между весом гири 12 и текущим показанием весов. На рисунке 3 показаны характерные изменения сдвигающей силы G во времени. Как видно из графиков, сдвигающая сила сначала увеличивается, практически линейно, а после достижения некоторого максимального значения существенно уменьшается и впоследствии остается практически постоянной. Увеличение сдвигающей силы происходит за счет того, что нить 7, наматываясь на барабан лебедки 8, пытается сдвинуть тележку 6 влево, но этому пре-

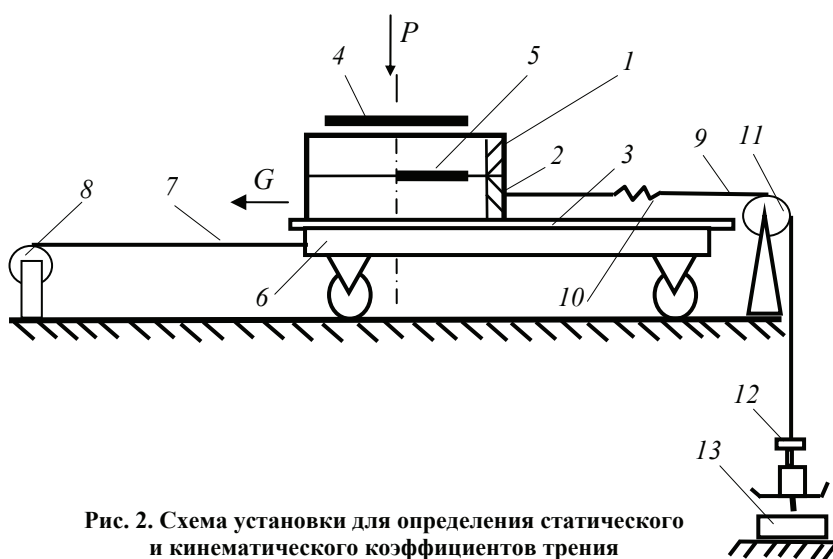


Рис. 2. Схема установки для определения статического и кинематического коэффициентов трения

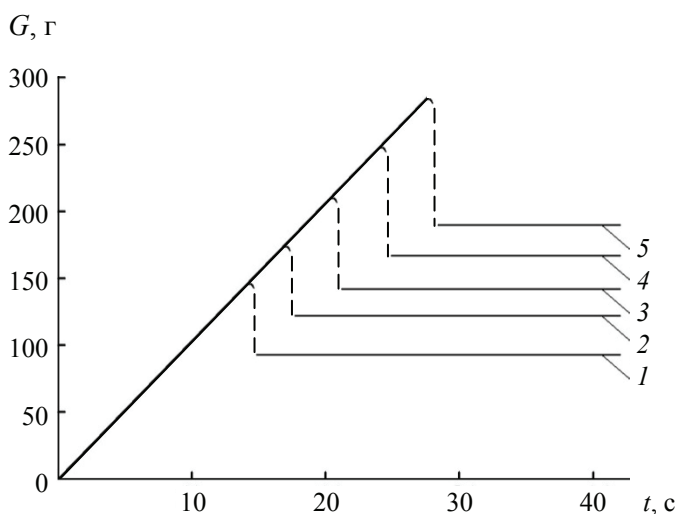


Рис. 3. Изменения усредненных значений сдвигающих сил во времени при различных значениях нормальной силы N , г:
 1 – 203; 2 – 253; 3 – 303; 4 – 353; 5 – 403

пятствует сила трения, возникающая между сыпучим материалом, находящимся в секции 2 и пластиной 3, поскольку секция 2 связана с гирей 12. Тележка 6, перемещаясь влево, растягивает пружину 10, и далее это усилие, численно равное сдвигающей силе, передается на гирию 12. При этом текущие показания весов уменьшаются. Следует особо отметить, что секция 2 неподвижна относительно пластины 3, то есть секция перемещается вместе с тележкой. Между частицами материала и поверхностью пластины имеет место статическое трение. При определенном значении сдвигающей силы (на рис. 3 это максимальное значение) секция 2 начинает скользить по пластине 3. Между частицами материала и поверхностью пластины начинает действовать кинематическое трение и, поскольку коэффициент кинематического трения меньше, чем статического, сдвигающая сила уменьшается. Испытания проводили при значениях P : 100, 150, 200, 250, 300 г. При этом вес материала M , находящегося в секции, составлял 103 г. В качестве сыпучих материалов использовали гранулированный полиэтилен с диаметром частиц 3,5 мм, речной песок, порошок меди и муку. Материал пластины 3 – оцинкованная жесьть.

С каждым значением нормальной силы N проводилось по 10 опытов с последующей статистической обработкой результатов. Наклонная прямая на рис. 3 это изменение статических сдвигающих сил G_c , а горизонтальные прямые – кинематических сдвигающих сил G_k . Переход от статических сил к кинематическим зафиксировать не удалось. По всей видимости, это объясняется тем, что переход от состояния покоя к состоянию движения происходит мгновенно и зависимости, показанные на рис. 3, имеют разрывы. Следует отметить, что и в классической механике твердых тел мы не обнаруживаем сведения о характере перехода от покоя к движению и изменения сдвигающих сил при этом переходе.

**Значения напряжений и коэффициентов трения
гранулированного полиэтилена**

$N, Н$	$G_c, Н$	$G_k, Н$	$\sigma, Па$	$\tau_c, Па$	$\tau_k, Па$	μ_c	μ_k
1,99	1,43	0,91	310,84	223,56	142,41	0,72	0,46
2,48	1,71	1,20	387,41	266,44	186,81	0,69	0,48
2,97	2,08	1,39	463,97	324,63	217,44	0,70	0,47
3,46	2,35	1,64	540,53	367,50	255,72	0,68	0,47
3,95	2,84	1,78	617,09	444,06	278,69	0,72	0,45

По результатам испытаний рассчитывали численные значения статических и кинематических нормальных и касательных напряжений по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_k = P/A; \\ \tau_c &= G_c/A; \\ \tau_k &= G_k/A. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее рассчитывали значения статических и кинематических коэффициентов трения μ_c и μ_k . Результаты расчетов представлены в таблице.

Если построить графики зависимостей касательных напряжений τ_c и τ_k от нормальных напряжений σ , то получим практически прямые линии, что хорошо согласуется не только с результатами других исследований свойств сыпучих материалов [3, 6], но и с классическими представлениями о трении твердых тел [7]. Среднее значение статического коэффициента внешнего трения μ_c для частиц полиэтилена равно 0,7, а кинематического коэффициента внешнего трения μ_k – 0,47.

Таким образом, предлагаемая методика и установка позволяют экспериментально определить не только статический, но и кинематический коэффициенты внешнего трения, что невозможно сделать с использованием традиционных методик и приборов. Поскольку численные значения статического и кинематического коэффициентов внешнего трения отличаются весьма существенно, это необходимо учитывать при проектировании бункеров, силосов, машин барабанного типа [8], машин и аппаратов с движущимися рабочими органами [9], вибрационных питателей и дозаторов [10], а также ленточных транспортеров, наклоненных к горизонту [11].

Список литературы

1. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с.
2. Конструирование и расчет машин химических производств / под ред. Э. Э. Кольман-Иванова. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.
3. Haaker, G. Wall Friction Measurements / G. Haaker // Powder Handling and Processing. – 1999. – Vol. 11, No. 1. – P. 19 – 25.
4. Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell. The Institut of Chemicalengineer European Federation of Chemical Engineering. Published by the Institution of Chemical Engineers, George E. Davis Building, 165–171 Railway Terrace, Rugby, Warwickshire, CV21 3HQ, England, 1989. – 46 p.

5. Мищенко, С. В. Определение физико-механических и технологических свойств углеродных наноматериалов. Современное состояние, проблемы и перспективы / С. В. Мищенко, С. В. Першина, А. И. Шершукова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – (Препринт Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та / Тамб. гос. техн. ун-та. – Препринт № 23. Рубрика 01. – 2008. – Т. 14, № 2. – 51 с.).
6. Prescott, J. K. Developing a Better Understanding of Wall Friction / J. K. Prescott, D. A. Ploof, J. W. Carson // Powder Handling and Processing. – 1999. – Vol. 11, No. 1. – P. 27 – 36.
7. Крагельский, И. В. Развитие науки о трении. Сухое трение / И. В. Крагельский, В. С. Щедров. – М. : Изд-во ФН СССР, 1956. – 237 с.
8. Селиванов, Ю. Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2003. – Т. 46, вып. 7. – С. 42 – 45.
9. Дёмин, О. В. Способ определения оптимальной высоты лопасти / О. В. Дёмин, Д. О. Смолин // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2012» / ред. С. В. Куприенко. – Вып. 1, т. 9. – Одесса, 2012. – С. 52 – 54.
10. Пат. 2251083 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 F 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления / В. Ф. Першин, С. В. Барышникова, Д. К. Каляпин, А. А. Осипов ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003109774/28 ; заяв. 07.04.2003 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12. – 10 с.
11. Roberts, A. W. Recent Developments in Feeder Design and Performance / A. W. Roberts // Proceedings of the 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. – Dead Sea, Israel, 2000. – Vol. 2. – P. 14.1 – 14.10.

Measuring Static and Kinematic Coefficients of Wall Friction on Bulk Solids

A. S. Durnev, V. F. Pershin

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: bulk solids; kinematic coefficients of wall friction; shear tester; static coefficients of wall friction; wall friction.

Abstract: In accordance with the European standard, friction force of bulk materials is measured using Jenike shear tester and then the static coefficient of friction is calculated. We have developed a device that allows measuring both static and kinematic friction force of bulk solids.

© А.С. Дурнев, В.Ф. Першин, 2013