

## ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «МАШИНА АТВУДА» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук, В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук,  
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2024

Представлена схема и дано описание конструкции лабораторной установки для экспериментального определения коэффициента трения скольжения, собранной на основе классической машины Атвуда. Описана методика проведения измерений. Предложены формулы, позволяющие рассчитать коэффициент трения. Преимуществом представленной установки является предельно простая и самая надежная схема нагружения контакта трущихся поверхностей – гравитационная, которая обеспечивает стабильные и абсолютно точные значения как силы нормального давления на контакт, так и тангенциальной силы. Относительная приборная погрешность не превышает 0,5 %, что значительно меньше случайной погрешности, характерной для экспериментов по измерению коэффициентов трения. Рекомендуется использовать модернизированную установку и методику для создания лабораторной работы в курсах трибологии и триботехники.

*Ключевые слова:* трибология, коэффициент трения скольжения, лабораторная работа, машина Атвуда.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-23-29**

### ВВЕДЕНИЕ

Специалист, занимающийся конструированием, изготовлением и эксплуатацией современного оборудования, должен обладать знаниями в области науки о трении, изнашивании и смазке. Изучение физической природы и закономерностей различных видов трения, формирование знаний о фрикционных характеристиках материалов относятся к числу основных задач трибологии, триботехники, основ трения и изнашивания и других дисциплин, включенных в учебные планы технических специальностей и направлений [1]. Значение дисциплины определено универсальным характером и ключевой ролью процессов трения и изнашивания в обеспечении надежности и долговечности современного технологического, энергетического и транспортного оборудования [2, 3].

Одна из компетенций, приобретаемых студентами при изучении трибологии, – умение проводить исследования процессов трения и изнашивания и определять фрикционные характеристики материалов и узлов, в том числе силу трения и коэффициенты трения материалов. Освоение данной компетенции происходит при выполнении лабораторного практикума, являющегося неотъемлемой частью учебного процесса. При выполнении лабораторных работ студенты должны приобретать навыки обращения с экспериментальными приборами, средствами измерения, использовать методы проведения эксперимента, оценки и представления его результатов, применять теоретические знания на практике [4].

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Классической установкой для изучения законов кинематики и динамики поступательного движения является машина Атвуда, обычно используемая в лабораторных работах по курсу физики в качестве прибора для изучения закономерностей равноускоренного движения и определения ускорения свободного падения [5]. Универсальность конструкции позволяет расширить область применения машины в учебном процессе, в частности, модернизировать ее для изучения закономерностей трения [6].

Нами предлагается использовать лабораторную установку, собранную на основе машины Атвуда, для экспериментального определения коэффициента трения скольжения. Схема установки приведена на рис. 1.

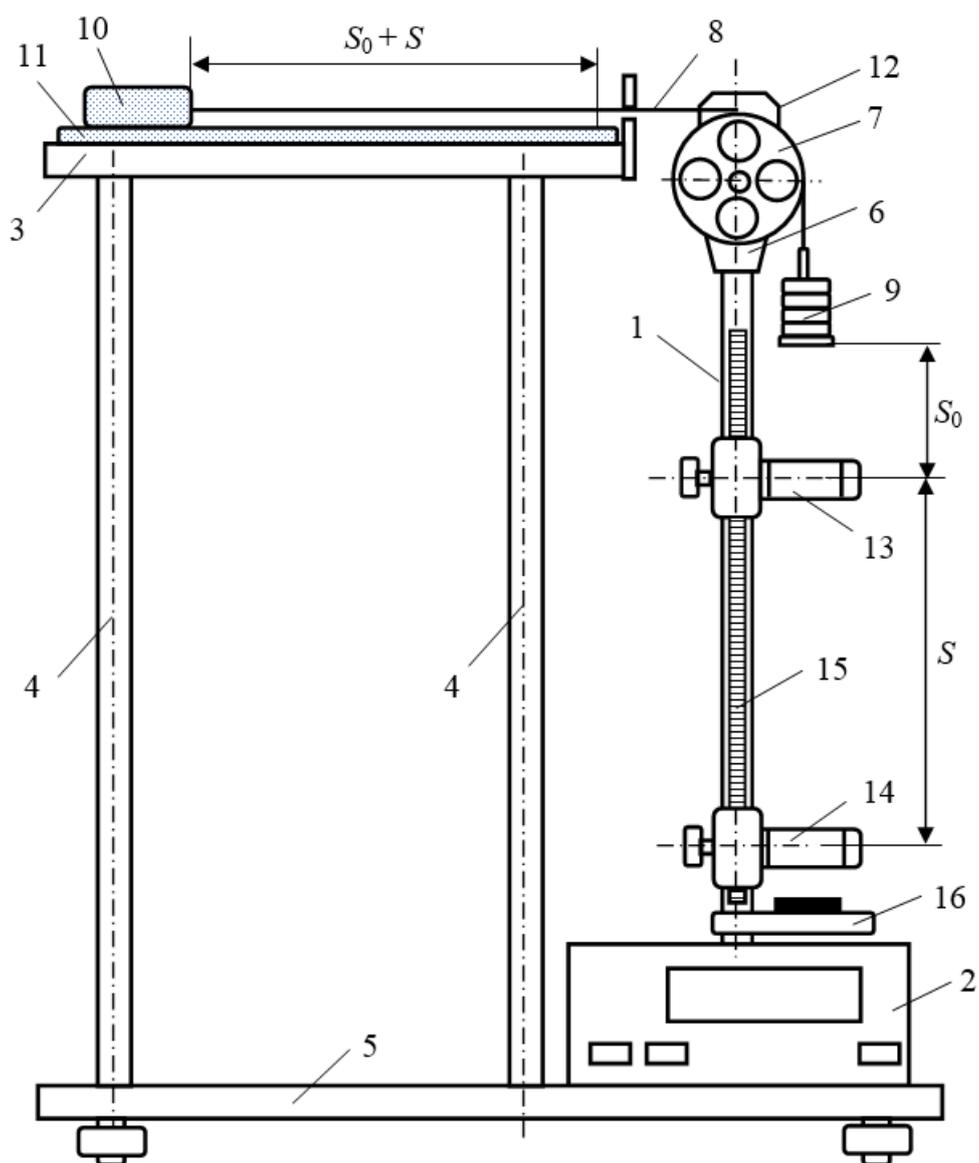


Рис. 1. Схема лабораторной экспериментальной установки

Вертикальная стойка 1, электронный блок управления с таймером (миллисекундомером с цифровой индикацией времени) 2 и горизонтальная плита 3, установленная на четырех вертикальных опорах 4, смонтированы на общем горизонтальном основании 5. На вертикальной стойке расположены четыре кронштейна. На верхнем кронштейне 6 крепится легкий блок 7, свободно вращающийся в подшипниках с малым сопротивлением. Через блок перекинута тонкая нерастяжимая нить 8, на одном конце которой подвешен груз (набор разновесов) 9. Другой конец нити подцепляется к образцу 10, выполненному в виде прямоугольного бруска. Образец может скользить по поверхности контробразца 11, имеющего вид плоской длинной пластины, закрепленной на горизонтальной плите. Коэффициент взаимного перекрытия – отношение номинальной площади контакта к площади всей дорожки трения – составляет для разных образцов примерно 0,1...0,2. Образец и контробразец образуют исследуемую пару трения. На верхнем кронштейне также установлен электромагнит 12 с фрикционной муфтой сцепления, удерживающей блок 7 от вращения, а образец от скольжения.

Для точного измерения времени движения используются вмонтированные в кронштейны фотоэлектрические датчики 13 и 14, положение которых можно изменять. На вертикальной стойке укреплена миллиметровая линейка 15, по которой определяют длину пути трения образца. Начальное положение определяют по нижнему срезу груза, а положение при прохождении заданного участка пути – по рискам на кронштейнах, совпадающим с оптическими осями фотоэлементов 13 и 14.

Нижний кронштейн 16 представляет собой площадку с резиновым амортизатором.

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

В начале опыта груз удерживается неподвижно с помощью электромагнита в исходном положении в верхней части стойки, при этом образец находится в начальной точке пути трения (на рис. 1 – в левом крайнем положении). После нажатия клавиши «ПУСК» на электронном блоке электромагнит отключает муфту сцепления, и система «груз – образец» приходит в равноускоренное движение. При прохождении пути  $S_0$  груз пересекает оптическую ось верхнего фотодатчика 13, при этом автоматически запускается таймер и начинается отсчет времени. При пересечении грузом оптической оси нижнего фотодатчика 14 секундомер автоматически останавливается, и время  $t$  прохождения пути  $S$  между двумя фотодатчиками высвечивается на цифровом индикаторе.

В самом начале первого участка пути  $S_0$  происходит переход от трения покоя к трению скольжения, характеризующийся нестабильностью силы трения. Это может вызвать разное время задержки при срабатывании образца и повлиять на время прохождения пути  $S_0$ , но практически не влияет на скорость  $v_0$ , которую приобретает образец к концу этого участка. Поэтому измерение времени движения проводят на втором участке пути  $S$ , где наблюдается уже установившееся скольжение с практически постоянным значением силы трения.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

Для нахождения коэффициента трения рассмотрим динамику ускоренного движения системы грузов (рис. 2): образца 1, скользящего с трением по горизонтальной плоскости, и груза 2, движущегося вертикально вниз.

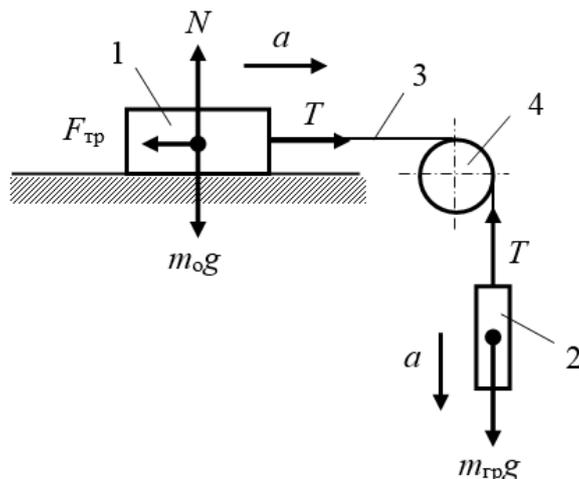


Рис. 2. Схема для расчета ускорения  $a$

В данном случае схема для расчета ускорения фактически представляет из себя задачу, решение которой хорошо известно из курса общей физики. На рис. 2 изображены силы, действующие на систему:  $m_0g$  и  $m_1g$  – силы тяжести, действующие на образец массой  $m_0$  и груз массой  $m_1$ ;  $N$  – сила нормального давления;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения скольжения;  $T$  – сила натяжения нити. Так как нить 3 нерастяжима, то образец и груз движутся с одинаковыми по модулю ускорениями и скоростями, и за одно и то же время проходят равные отрезки пути. В данной установке масса образца и масса груза на порядок больше массы легкого блока 4, поэтому моментом инерции блока можно пренебречь. Масса нити также пренебрежимо мала. Силы трения в подшипниках блока можно не учитывать, так как они незначительны по сравнению с силой трения скольжения образца. В этом случае силу натяжения нити  $T$  можно считать одинаковой по всей ее длине.

Применив основной закон динамики поступательного движения, запишем уравнения для проекций сил и ускорений на горизонтальную и вертикальную оси координат (см. рис. 2):

$$m_1g - T = m_1a, \quad (1)$$

$$T - F_{\text{тр}} = m_0a, \quad (2)$$

$$N - m_0g = 0. \quad (3)$$

Сила трения скольжения согласно закону Амонтона определяется по формуле

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения.

Решая совместно систему уравнений (1)–(4), выразим искомый коэффициент трения:

$$f = \frac{m_1}{m_0} - \left( \frac{m_1}{m_0} + 1 \right) \frac{a}{g}. \quad (5)$$

Так как типичное значение коэффициента трения скольжения твердых тел при сухом трении составляет  $f \approx 0,25 \dots 0,35$  [7], рекомендуется провести серию измерений при разных соотношениях масс:

$$\frac{m_{\text{тр}}}{m_0} \approx 0,3 \dots 0,5.$$

Для нахождения величины ускорения  $a$ , входящей в уравнение (5), необходимо записать кинематические уравнения движения груза (см. рис. 1).

На участке пути  $S_0$  груз (и образец) при движении из состояния покоя с ускорением  $a$  к концу участка разгоняются до скорости  $v_0$ :

$$S_0 = \frac{v_0^2}{2a}. \quad (6)$$

Второй участок пути  $S$  груз, двигаясь равноускорено с ускорением  $a$  и начальной скоростью  $v_0$ , проходит за время  $t$ :

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (7)$$

Объединив уравнения (6) и (7) и решив полученное квадратное уравнение относительно ускорения, получим:

$$a_{1,2} = \frac{4S}{t^2} \left[ \left( \frac{S_0}{S} + \frac{1}{2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{S_0}{S} \right)^2 + \frac{S_0}{S}} \right]. \quad (8)$$

В данном случае физический смысл имеет только знак «минус» перед радикалом, иначе  $a > g$ .

Если задать отношение  $S_0/S = 0,5625$ , то выражение (8) значительно упрощается и принимает вид

$$a = \frac{S}{2t^2}. \quad (9)$$

Для данной установки рекомендуется разделить всю длину пути на два неравных участка  $S_0 = 13,5$  см и  $S = 24$  см (см. рис. 1). В этом случае для нахождения ускорения необходимо будет экспериментально определить только время  $t$ , за которое груз проходит путь  $S$ .

Рассчитав ускорение по формуле (9), значение коэффициента трения скольжения можно будет вычислить по формуле (5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидным преимуществом представленной установки является предельно простая и наиболее надежная схема нагружения контакта трущихся поверхностей –

гравитационная, которая обеспечивает стабильные и абсолютно точные значения как силы нормального давления на контакт, так и тангенциальной силы. Сдвигающее усилие создается набором разновесов, не зависит ни от каких посторонних факторов и может изменяться в широком интервале. Сила нормального давления определяется весом образца, и ее также можно при необходимости увеличить, разместив на образце дополнительные грузы.

К достоинствам установки относятся использование очень точного оптоэлектронного метода измерения времени (до 0,001 с) и высокая точность определения всех других величин, входящих в формулы для расчета коэффициента трения: пути, массы образцов и массы грузов. Во всех случаях относительная приборная погрешность не превышает 0,5 %. Это значительно меньше случайной погрешности, характерной для экспериментов по измерению коэффициентов трения. Определенным недостатком метода можно считать непостоянство скорости скольжения образца на длине пути  $S$ .

Описанная установка и методика экспериментального определения коэффициента трения скольжения могут применяться для создания лабораторной работы в курсах «Трибология», «Триботехника» и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хаджиев А.А., Мадаева М.З., Саидов М.А., Шуаипов А.А. О целесообразности преподавания в вузах, для общеинженерной подготовки студентов, дисциплин «Трибология» и «Триботехника». *Актуальные вопросы в науке и практике: Сборник статей по материалам VII Международной научно-практической конференции. В 2-х ч.* Уфа: ООО «Дендра», 2018. Ч. 1 (2). С. 161–164.
2. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: НИЦ Инфра-М, 2020. 336 с.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
4. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
5. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука, 1983. 704 с.
6. Чебодаева А.Б., Чебодаев М.И. Экспериментальное исследование момента сил трения на оси блока с помощью машины Атвуда // *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки.* 2023. Т. 1. № 1. С. 71–79.
7. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

**Для цитирования:** Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Возможности модернизированной лабораторной установки «Машина Атвуда» для исследования трения скольжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2024. № 2 (22). С. 22–29.

## THE POTENTIAL OF THE MODERNIZED LABORATORY INSTALLATION “ATWOOD MACHINE” FOR STUDYING SLIDING FRICTION

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.,  
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

A diagram is presented and a description of the design of a laboratory installation for the experimental determination of the sliding friction coefficient, assembled on the basis of the classical Atwood machine, is given. The measurement technique is described and formulas are proposed to calculate the friction coefficient. The advantage of the presented installation is the extremely simple and most reliable loading scheme for the contact of rubbing surfaces - gravitational, which provides stable and absolutely accurate values of both the normal pressure force on the contact and the tangential force. The relative instrumental error does not exceed 0.5 %, which is significantly less than the random error characteristic of experiments measuring friction coefficients. It is recommended to use a modernized setup and methodology to create laboratory work in tribology and triboengineering courses.

*Keywords:* tribology, sliding friction coefficient, laboratory work, Atwood machine.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2024; после рецензирования/revised: 22.02.2024;  
принята/accepted: 29.02.2024

УДК 621.791.92

## ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.А. СМОЛЯКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., 2024

Представлены результаты металлографического анализа быстрорежущей стали Р6М5, полученной порошковой наплавкой на автоматизированном комплексе ЦЛТ-Ю-5 с многоканальным (48 лучей) CO<sub>2</sub> лазером. Показано, что фазовый состав стали – мартенсит, 10 % остаточного аустенита и 2 % карбидов V<sub>2</sub>C. Микротвердость наплавленного металла составляет 8 500...9 000 МПа. Результаты проведенных исследований могут быть полезны производителям биметаллического инструмента с рабочей частью из наплавленной быстрорежущей стали.

*Ключевые слова:* быстрорежущая сталь, лазерная наплавка, многоканальный CO<sub>2</sub> лазер.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-29-35**

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленности применяются различные способы наплавки: электродуговая, лазерная, плазменная, газовая, токами высокой частоты и др. К преимуществам лазерной наплавки относятся небольшая зона термического влияния, отсутствие