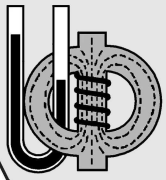
ISSN 2307-5457

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ

Primus inter pares



УЧЕБНАЯ ФИЗИКА

Материалы XXXI Всероссийской научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения"

Июль - сентябрь 2026 №3

Издается с января 1997 года

Посвящается памяти В.В.Майера

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

П. В. Зуев, Т. Н. Шамало — ПОДГОТОВКА УЧАЩИХСЯ К РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО МЕТОДА ПОЗНАНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ КЛАССАХ НАЧАЛЬНОЙ ШКОЛЫ 3

Старшая школа

М. А. Фаддеев, Ю. В. Масленникова — УЧЕБНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА «СИЛА ТРЕНИЯ ЭЙЛЕРА» 15

В. Н. Бакулин, М. И. Толмачева, М. П. Уварова — ТВОРЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ТЕМЕ «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА» 24

Высшая школа

О. В. Сергеева, Е. Л. Казакова — О ВОЗМОЖНОСТЯХ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОБУЧЕНИЯ 38

И. Ю. Зворыкин, М. Р. Каткова — УЧЕБНЫЙ ПРОЕКТ ПО СОЗДАНИЮ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА 49

Компьютер в эксперименте

А. П. Горлов, И. А. Горлов, Е. А. Самойлов — МЕЖПРЕДМЕТНЫЙ УЧЕБНЫЙ ПРОЕКТ: ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОСТИ АРТЕРИЙ 55

Исследования

И. Г. Кирин — ОПЫТ ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ БУДУЩИМ ЮРИСТАМ В ЮРИДИЧЕСКОМ КОЛЛЕДЖЕ 70

АВТОРЫ ЖУРНАЛА 76

Основатель журнала, главный редактор в 1997–2025 гг. — д.п.н., профессор ***Майер Валерий Вильгельмович*** *(Глазов)*

Редакция журнала:
Е. И. Вараксина (главный редактор), Р. В. Акатов, Л. С. Кропачева, Р. В. Майер, Е. С. Мамаева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская–Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно–педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686; внесены изменения в запись о регистрации средства массовой информации Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 07.09.26. Подписано в печать 24.09.26.
Дата выхода в свет: 29.09.26.
Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,75.

Заказ 177. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Исследование учебного физического эксперимента по диффузии (Вараксина Е. И., Майер В. В., Шиляева Л. В. Учебные опыты по диффузии на урочных и внеурочных занятиях по химии и физике // Учебная физика. — 2025. — № 1. — С. 39–55), прототип которого описан в статье В. В. Майера и Е. С. Мамаевой «Несколько новых опытов для седьмого класса» (Учебная физика. — 2007. — № 1. — С. 14–21).

Научная статья
ББК 74.262.23
УДК 372.853

М. А. Фаддеев, Ю. В. Масленникова

УЧЕБНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА «СИЛА ТРЕНИЯ ЭЙЛЕРА»

В статье описана простая и доступная экспериментальная установка, обеспечивающая количественные исследования сухого трения, в частности трения нити о цилиндрическую поверхность. Представлена методика проведения экспериментов, подтверждающих выводы физической теории и способствующих развитию познавательных умений учащихся в системе дополнительного образования. В отличие от других известных работ подробно описана конкретная конструкция лабораторной установки из доступных материалов, в которой применяются цилиндры небольшого диаметра. Отлажена методика проведения опытов, обеспечивающая воспроизводимость результатов. Материал адаптирован для школьников и студентов. Приведены образцы результатов экспериментов с учетом погрешностей.

Ключевые слова: дополнительное образование, старшая школа, учебно–исследовательские работы, экспериментальная установка, сила трения Эйлера.

M. A. Faddeev, Yu. V. Maslennikova

EDUCATIONAL AND RESEARCH WORK «EULER FRICTION FORCE»

The article describes a simple and accessible experimental setup that enables quantitative studies of dry friction, in particular, the friction of a thread against a cylindrical surface. A methodology for conducting experiments is presented, which confirms the conclusions of physical theory and contributes to the development of students' cognitive skills in the system of supplementary education. Unlike other well-known works, a specific design of the laboratory setup is described in detail; it is made from readily available materials and uses cylinders of small diameter. The methodology for conducting experiments has been refined to ensure the reproducibility of the results. The material is adapted for schoolchildren and students. Examples of experimental results are provided, taking into account the errors.

Keywords: additional education, basic school, educational and research work, experimental setup, Eulerian friction force.

DOI: 10.62957/2307-5457-2026-3-15-23

© Фаддеев М. А., Масленникова Ю. В., 2026

Актуальность темы работы

Совершенствование инженерно–физического образования представляет собой одну из самых актуальных проблем Российской Федерации. Применению учебного эксперимента при решении этой проблемы посвящены исследования П. В. Зуева [1], Т. В. Никитиной [2] и других ученых. Важным этапом инженерно–физического образования является многоэтапная довузовская подготовка школьников — будущих абитуриентов и студентов — по экспериментальной физике. Учащимся рекомендуется выполнять учебно–исследовательские работы, в перспективе имеющие практическое применение с учетом реальных условий. Такая деятельность возможна в рамках школьных проектов и в системе дополнительного образования.

В данной статье описывается методика и пример выполнения учебно–исследовательской работы на тему «Исследование силы трения Эйлера». Поучительные результаты проявления силы трения Эйлера рассмотрены в научно–популярной литературе [3, с. 38–41; 4]. Учебное исследование силы Эйлера представлено в работе [5]. На страницах журнала «Учебная физика» ранее разными авторами были рассмотрены занимательные опыты [6] и демонстрационные эксперименты [7], в которых проявляется сила трения Эйлера. В предлагаемой нами работе, в отличие от известных, подробно описана конкретная простая конструкция *лабораторной установки* из доступных материалов, в которой применяются цилиндры небольшого диаметра. Отлажена методика проведения опытов, обеспечивающая *воспроизводимость результатов*. Материал адаптирован для школьников и студентов. Приведены *образцы результатов экспериментов* с учетом погрешностей.

Во множестве механизмов происходит трение гибких тел (веревок, канатов, тросов и т.п.) о твердые цилиндрические поверхности. Леонард Эйлер еще в XVIII века решал задачу о закономерностях сил трения и получил характерную формулу, носящую его имя.

Цель работы: исследование трения нити о поверхность неподвижного цилиндра и экспериментальная проверка формулы Эйлера.

Задачи

1. Изучить теоретические аспекты проблемы.
2. Подобрать (изготовить) необходимое оборудование.
3. Провести эксперимент, подтверждающий выводы теории.

Теоретическая часть учебно–исследовательской работы

Рассмотрим физическую систему, часто встречающуюся на практике. Трос (канат, веревка, шнур) охватывает твердый неподвижный цилиндр (блок, шпиль, кабестан и т. п.). Обозначим φ угол охвата (рис. 1).

На один из концов троса действует постоянная сила $\vec{T}_0$. Величина этой силы много больше веса троса. К противоположному концу

троса прикладывается сила $\vec{T}$, необходимая для уравновешивания силы $\vec{T}_0$, как показано на рис. 1.

Рассмотрим малый элемент троса, опирающийся на малый центральный угол $\Delta\varphi$ (рис. 2). Пусть трос находится в состоянии покоя при минимальной удерживающей силе. При этом сила трения покоя $\Delta\vec{F}$ достигает максимального значения и ее модуль можно выразить по закону Амонтона:

$$\Delta F = \mu \Delta N, \qquad (1)$$

где μ — коэффициент трения, ΔN — модуль нормальной реакции цилиндра, действующей на элемент троса.

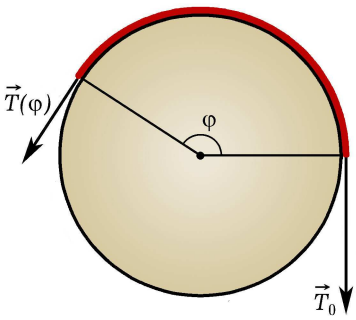


Рис. 1. Охват тросом цилиндрической опоры: $\vec{T}_0$ — сила, приложенная к концу троса, $\vec{T}(\varphi)$ — удерживающая сила, приложенная к другому концу троса

Из-за трения сила натяжения, действующая на левый конец элемента, по модулю меньше силы, действующей на правый конец элемента, на величину ΔT.

Так как трос находится в покое, то сумма сил, действующих на элемент троса, равна нулю. Разложим силы по двум направлениям: вдоль касательной к центру элемента троса и перпендикулярно ей. Уравнения равновесия имеют вид:

$$T\cos\frac{\Delta\varphi}{2} = (T-\Delta T)\cos\frac{\Delta\varphi}{2} + \Delta F, \qquad (2)$$

$$\Delta N = T\sin\frac{\Delta\varphi}{2} + (T-\Delta T)\sin\frac{\Delta\varphi}{2}. \qquad (3)$$

Из-за малости угла $\Delta\varphi$ уравнения (2) и (3) упрощаются:

$$\Delta T = \Delta F, \quad \Delta N = T\Delta\varphi. \qquad (4)$$

Используя (1), (4) и соотношения внизу рис. 2, объясняющие знак «—», составим уравнение:

$$dT = -\mu T\, d\varphi. \qquad (5)$$

Решение можно получить способом разделения переменных:

$$\ln T = -\mu\varphi + C. \qquad (6)$$

Для определения постоянной интегрирования используется граничное условие:

$$T(0) = T_0. \qquad (7)$$

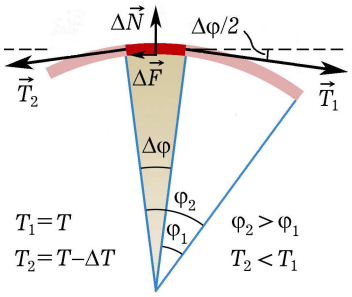


Рис. 2. Силы, действующие на малый элемент троса: $\Delta\vec{F}$ — сила трения покоя, $\Delta\vec{N}$ — нормальная реакция цилиндра

Тогда решение (6) можно представить в виде:

$$T(\varphi) = T_0 e^{-\mu\varphi}. \quad (8)$$

Таким образом, минимальная сила удержания с увеличением угла φ уменьшается монотонно практически до нуля. Следовательно, сила трения покоя $F(\varphi) = T_0 - T(\varphi)$ с ростом угла охвата φ может полностью компенсировать, в принципе, любую внешнюю нагрузку T_0. Отношение модулей сил $T_0/T(\varphi)$, равное числу $e^{\mu\varphi}$, характеризует «выигрыш» в силе удержания при использовании трения Эйлера. Например, расчет показывает, что при коэффициенте трения $\mu = 0,6$ и пяти полных оборотах троса ребенок может удержать атомный авианосец.

На практике использование силы трения Эйлера ограничено прочностью троса и цилиндрической опоры. Обычно используется не более трех оборотов троса.

Экспериментальная часть учебно–исследовательской работы

Для экспериментального исследования трения Эйлера использовались цилиндры, изготовленные из различных материалов (рис. 3).

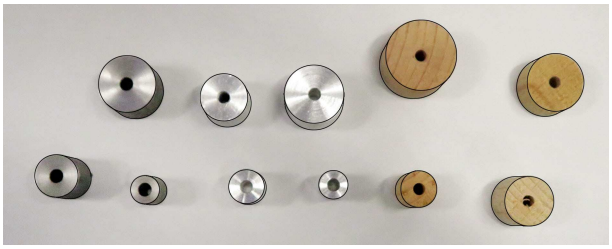


Рис. 3. Цилиндры разных диаметров, изготовленные из бука, алюминия и конструкционной стали

Все цилиндры имеют высоту (длину) 20 мм. Диаметры цилиндров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Цилиндрические образцы, предназначенные для экспериментов

Материал	Диаметры, мм				
Дерево (бук)	15	21	25	30	—
Алюминий	12	15	20	25	30
Сталь конструкционная	12	18	24	—	—

Все цилиндры имеют отверстие диаметром 5 мм, просверленное по оси, предназначенное для крепления на экспериментальной установке. Внешняя поверхность цилиндров была отшлифована абразивной бумагой П–2000.

Исследования проводятся с грузом, вес которого (сила T_0) предварительно измеряется динамометром (рис. 4.1). Цилиндр укрепляется горизонтально на вертикальной доске с помощью магнитной подвески. *Тросом служил капроновый плетеный шнур диаметром около 2 мм, который практически не удлинялся в ходе экспериментов.* Шнур перекидывался через укрепленный цилиндр, как через блок. К нижнему концу шнура крепился груз весом T_0. Для измерения углов охвата использовался угломер с градусной шкалой, закрепленный на одной оси с цилиндром. Величина минимальной удерживающей силы $T(\varphi)$ для данного угла охвата φ измерялась динамометром (рис. 4.2).

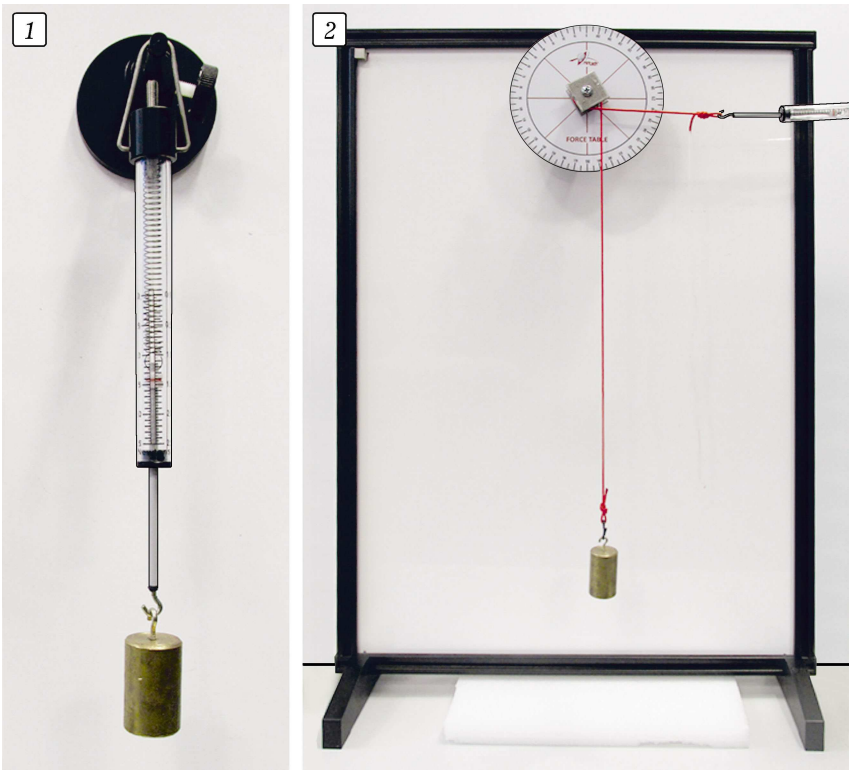


Рис. 4. Проведение эксперимента: *1* — измерение веса груза (силы T_0) динамометром; *2* — измерение минимальной силы удержания груза. Угол охвата $\varphi = 3\pi/2$ (три четверти оборота)

Эксперименты проводились с цилиндрами, показанными на рис. 3. Угол охвата увеличивался с шагом 90° (четверть оборота) до значения, при котором измеряемая минимальная удерживающая

сила по величине становилась близкой к приборной погрешности динамометра. *Количество различных углов охвата в опытах равнялось 8–10.*

Для примера в табл. 2 приведены результаты эксперимента с деревянным (буковым) цилиндром диаметром 15 мм.

Для определения коэффициента трения μ следует использовать экспоненциальную зависимость (8). Логарифмирование функции (8) позволяет провести линейную аппроксимацию методом наименьших квадратов. Величина $\ln(T_0/T)$ прямо пропорциональна углу охвата φ. Угловой коэффициент этой зависимости равен искомому коэффициенту трения μ, если угол φ выразить в радианах.

Таблица 2. Результаты эксперимента с буковым блоком диаметром 15 мм

Число оборотов троса	Угол охвата φ, радиан	Величина минимальной удерживающей силы T, Н	Отношение модулей сил T_0/T	Натуральный логарифм отношения $\ln(T_0/T)$
0	0	2,24	1,00	0
1/4	1,571	1,40	1,60	0,47
1/2	3,142	0,90	2,49	0,91
3/4	4,712	0,65	3,45	1,24
1	6,283	0,50	4,48	1,50
5/4	7,854	0,30	7,47	2,01
3/2	9,425	0,20	11,20	2,42
7/4	10,996	0,15	14,93	2,70
2	12,566	0,10	22,40	3,11

График линейной аппроксимации показан на рис. 5.

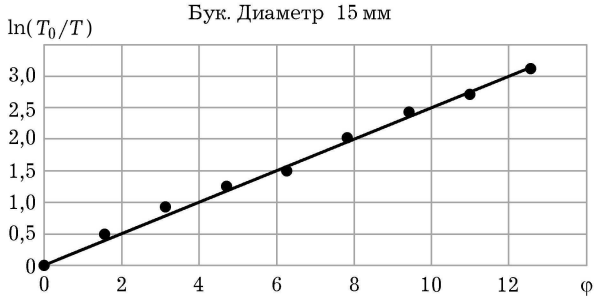


Рис. 5. Зависимость натурального логарифма отношения сил T_0/T от угла охвата φ. Сплошная линия — линейный аппроксимант

Метод наименьших квадратов выражает оптимальное значение углового коэффициента формулой:

$$\mu = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \varphi_i y_i}{\sum\limits_{i=1}^{N} \varphi_i^2}, \tag{9}$$

где для краткости записи введено обозначение:

$$y = \ln \frac{T_0}{T}. \tag{10}$$

В формуле (9) целая величина N — количество различных углов охвата φ, для которых были измерены силы $T(\varphi)$. В данном примере величина N — количество строк в табл. 2. Расчет по данным табл. 2 дает коэффициент трения $\mu = 0,251$.

Расчет погрешности измерений

Оптимальная оценка погрешности коэффициента трения μ вычисляется методом математической статистики [8]:

$$\Delta\mu = t_{\alpha,\nu} \sqrt{\frac{Q}{(N-1)\sum\limits_{i=1}^{N} \varphi_i^2}}, \tag{11}$$

где $t_{\alpha,\nu}$ — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности α и числа степеней свободы ν. В данной задаче равен параметр $\nu = N - 1$. Величина

$$Q = \sum_{i=1}^{N} (y_i - \mu\varphi_i)^2 \tag{12}$$

для коэффициента μ, вычисленного по формуле (9), имеет минимальное значение.

Погрешность коэффициента трения, рассчитанная по данным табл. 2 и по формуле (11), составляет $\Delta\mu = 0,007$.

Эксперименты, проведенные с деревянными (буковыми) цилиндрами разных диаметров, демонстрируют независимость коэффициента трения μ от диаметра цилиндра (в пределах погрешностей), что продемонстрировано на рис. 6.1. Этот результат согласуется с теоретическим выводом, который дает формулу (8), где отсутствует размер цилиндра (блока).

Эксперименты с цилиндрами из других материалов подтвердили вывод о независимости коэффициента трения μ от диаметра цилиндра. На рис. 6.2 приведены результаты для цилиндров из конструкционной стали, на рис. 6.3 — для цилиндров из алюминия.

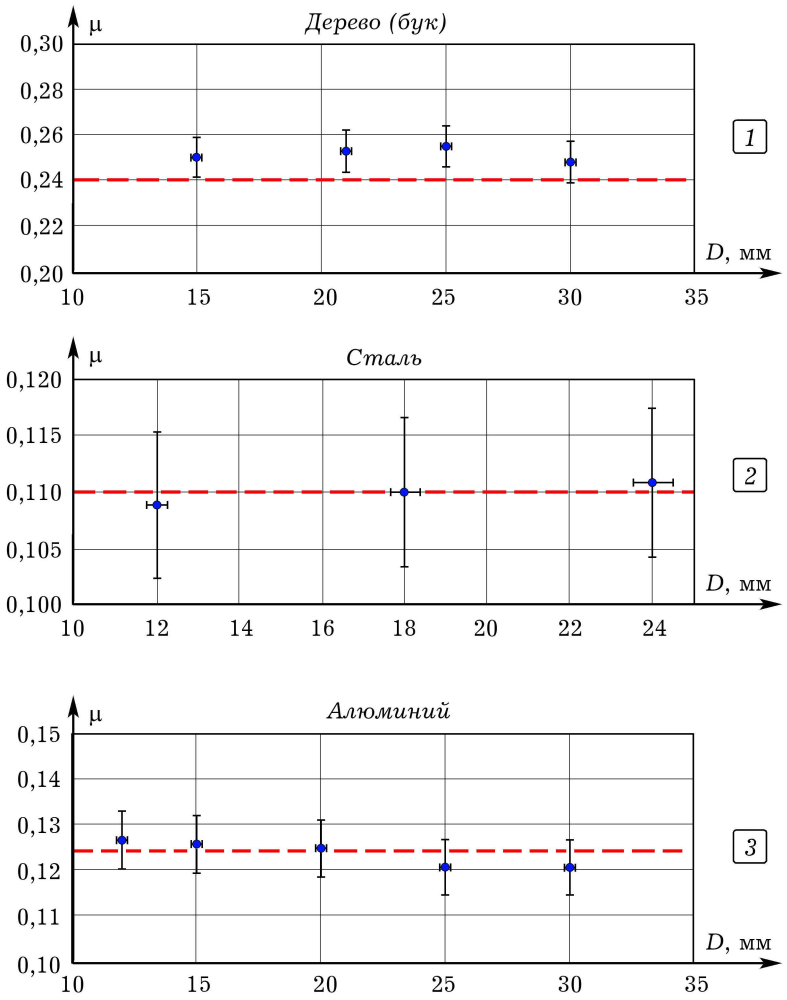


Рис. 6. Полученные в эксперименте коэффициенты трения силы Эйлера для цилиндров разного диаметра: *1* — деревянные цилиндры; *2* — стальные цилиндры; *3* — алюминиевые цилиндры

Дополнение

Коэффициент трения μ существенно зависит от гладкости поверхности. Для демонстрации этой особенности был проведен дополнительный эксперимент. Стальные цилиндры были выточены на токарном станке и перед шлифованием внешней поверхности бы-

ли проведены опыты измерения коэффициент μ по вышеописанной методике. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты трения μ для стальных цилиндров с нешлифованной поверхностью

Диаметр цилиндра(мм)	12	18	24
Коэффициент трения μ	0,159	0,216	0,129

По данным табл. 3 видно, что коэффициенты μ значительно различаются и имеют нерегулярный разброс. После шлифования значения коэффициентов выровнялись и уменьшились (рис. 6.2). Отсюда следует вывод, что увеличение шероховатости поверхности приводит к резкому возрастанию коэффициента трения силы Эйлера.

Заключение

Предложенная учебно–исследовательская работа, безусловно, выходит за рамки школьного курса физики. Однако опыт преподавания показывает, что мотивированные учащиеся успешно справляются с изучением представленного в статье теоретического материала и практической реализацией разработанного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев П. В. Подготовка учащихся к инженерной деятельности в процессе обучения физике // Физико–математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития. Материалы VII и VIII Международных научно–методических конференций. — М., 2023. — С. 793–796.
2. Никитина Т. В. Методика проектирования образовательных событий физико–технической направленности // Учебная физика. — 2026. — № 2. — С. 3–15.
3. Перельман Я. И. Занимательная физика. В двух книгах. Книга 2. — М.: Наука, 1979. — 272 с.
4. Буздин А. И. О швартовке, трении и формуле Эйлера // Квант. — 1988. — № 5. — С. 49–50.
5. Ловцова А. Ф. Исследование трения нити о поверхность неподвижного цилиндра и экспериментальная проверка формулы Эйлера // Молодой ученый. — 2022. — № 44(439). — С. 3–15.
6. Зуев П. В., Кабасов Ю. К., Толмачев М. Д., Костюков Ю. О. Дидактические возможности игрушки «Стамбульский волчок» // Учебная физика. — 2012. — № 4. — С. 10–19.
7. Даммер М. Д., Сибагатуллин А. А., Демин П. А., Горбунов П. В. Самодельное оборудование при изучении статики на уроках физики // Учебная физика. — 2023. — № 3. — С. 6–17.
8. Фаддеев М. А. Элементарная обработка результатов эксперимента. — Нижний Новгород: Изд–во ННГУ, 2004. — 120 с.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского

Поступила в редакцию 01.02.26.