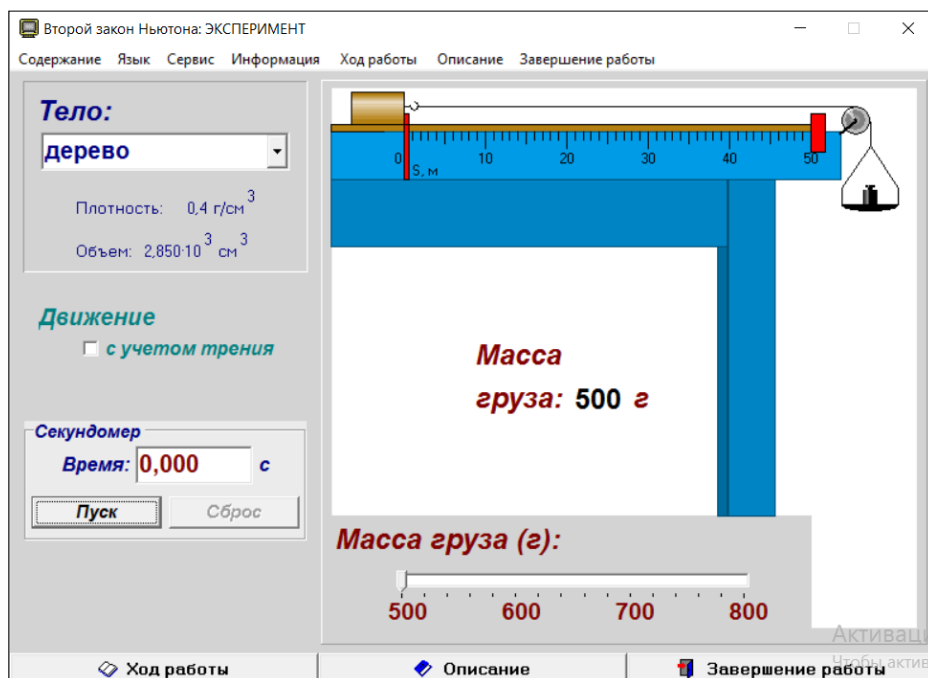


Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Г. Рипп, Е.В. Мирошниченко



Второй закон Ньютона

Учебное пособие
по общей физике
для студентов технических
и естественно-научных специальностей

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 53.08 (075.8)
P537

Рецензент:

Ю.В. Браславский - кандидат технических наук, доцент

Рипп А.Г.

P537 Второй закон Ньютона: учеб. пособие по общей физике / А.Г. Рипп, Е.В. Мирошниченко. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 15 с.

Учебное пособие разработано преподавателями кафедры «Физика» СевГУ и предназначено для студентов 1 и 2 курсов технических и естественно-научных специальностей, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам: «физика» и «физический практикум». В пособии студентам предлагается познакомиться с применением второго закона Ньютона для исследования характера движения механической системы, с методами экспериментальной проверки характера движения и с одним из методов измерения параметров механической системы – в частности, ускорения свободного падения и коэффициента трения. Лабораторная установка, на которой предлагается провести эксперименты, виртуальная.

Пособие содержит краткий теоретический материал, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы и методы оценки погрешности измерений. Материал изложен подробно и в доступной форме. Для студентов, желающих получить больше информации, в конце пособия приводится список литературы.

УДК 53.08 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 11 от 25 июня 2018 г.

Работа 6. Второй закон Ньютона

Цели работы

1. Проверить второй закон Ньютона.
2. Измерить ускорение свободного падения.
3. Измерить коэффициент трения.

1. Краткая теория

Второй закон Ньютона – один из фундаментальных законов физики и главный закон динамики. Суть закона в том, что влияние материальных объектов друг на друга изменяет их состояния. Чем сильнее влияние, тем быстрее меняются состояния. Основная функция состояния материального объекта – это скорость его движения $\mathbf{v}$, поэтому количественной мерой быстроты изменения состояния является быстрота изменения скорости, то есть производная от скорости по времени $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \dot{\mathbf{v}}$. Она называется *ускорением*. Количественной мерой влияния одного объекта на другой является сила $\mathbf{F}$. Итак, сила $\mathbf{F}$ является причиной появления ускорения $\mathbf{a}$. В этом и состоит второй закон Ньютона:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}, \quad (1.1)$$

где m – это масса объекта. Если на данный объект влияют несколько других объектов, то буквой $\mathbf{F}$ в формуле (1.1) обозначается векторная сумма нескольких сил: $\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i$.

В данной лабораторной работе проверка второго закона Ньютона осуществляется на установке, показанной на рисунке 1.1.

К бруску массой m , лежащему на горизонтальной поверхности стола, прикреплена нить, которая переброшена через блок. К другому концу нити прикреплена чашечка с грузом (гирькой) массой m_2 .

Что происходит в экспериментальной установке? Опыт говорит о том, что брусок и чашечка с грузом двигаются: груз – вниз, а брусок – с такой же скоростью вправо. Скорость нарастает (во всяком случае, в начале движения), следовательно, груз и брусок движутся с ускорением. Для нахождения этого ускорения применим второй закон Ньютона. Его можно применить к бруску и к грузу.

Начнём с *бруска*. Сначала выясним, какие силы действуют на брусок.

Нить, прикреплённая к бруску, создаёт силу тяги $\mathbf{F}_{\text{тяги}}$. Причиной появления этой силы является то, что на гирьку действует сила тяжести, которая натягивает нить. В нити возникает сила упругости (сила натяжения $\mathbf{T}$). Она и есть сила тяги, действующая на брусок: $F_{\text{тяги}} = T$. Эта сила вызывает движение бруска и его ускорение $\mathbf{a}$, направленное горизонтально (вправо). При движении бруска возникает вторая сила: сила трения скольжения $\mathbf{F}_{\text{тр}}$, направленная против скорости и уменьшающая величину ускорения.

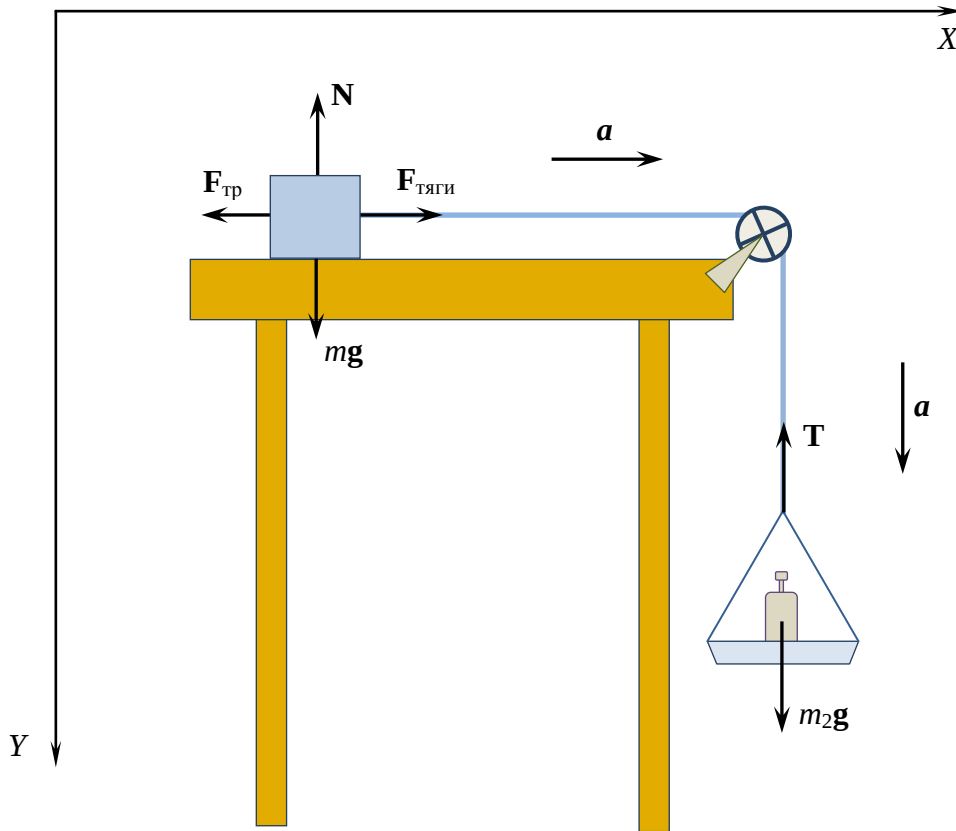


Рис. 1.1. Схема установки

Есть ещё две силы, действующие на брусок: сила тяжести mg и сила реакции стола N . Эти силы направлены вертикально, то есть они перпендикулярны ускорению и поэтому непосредственно на ускорение не влияют. Однако есть влияние косвенное: от величины силы N зависит сила трения:

$$F_{\text{тр}} = \mu N. \quad (1.2)$$

Число μ называется *коэффициентом трения*. Он зависит от материалов бруска и стола.

Теперь можно записать второй закон Ньютона для бруска:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_{\text{тяги}} + \mathbf{F}_{\text{тр}} + \mathbf{N} + \mathbf{mg}}{m}, \quad (1.3)$$

Перейдём от векторов к числам. Для этого запишем векторное уравнение (1.3) в проекциях на координатные оси OX и OY :

$$\begin{cases} OX: a = \frac{F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}}}{m} = \frac{T - \mu N}{m}, \\ OY: 0 = \frac{mg - N}{m}. \end{cases}$$

Из второго равенства следует, что

$$N = mg.$$

Подстановка этого результата в первое равенство даёт:

$$a = \frac{T}{m} - \mu g. \quad (1.4)$$

В этом уравнении – два неизвестных: ускорение a и сила натяжения нити T . Поэтому нужно найти ещё одно уравнение. Им может быть Второй закон Ньютона, применённый к *гирьке*:

$$a = \frac{m_2 g + T}{m}.$$

В проекциях на ось OY это уравнение имеет вид:

$$a = \frac{m_2 g - T}{m_2} = g - \frac{T}{m_2}. \quad (1.5)$$

Таким образом, получилось ещё одно уравнение с двумя неизвестными a и T . Решение системы двух уравнений (1.4) и (1.5) относительно ускорения a следующее:

$$a = \frac{m_2 - \mu m}{m_2 + m} g. \quad (1.6)$$

Итак, ускорение бруска и груза зависит, естественно, от их масс m и m_2 и от коэффициента трения μ .

Для экспериментальной проверки теоретической формулы (1.6) надо провести серию опытов по измерению ускорения системы при различных массах бруска и груза и различных коэффициентах трения. В предлагаемой вам лабораторной установке есть возможность менять массу груза, поэтому можно провести экспериментальное исследование зависимости ускорения груза a от его массы m_2 , а затем сравнить экспериментальную зависимость $a(m_2)$ с теоретической (1.6).

К сожалению, теоретическая зависимость $a(m_2)$ – нелинейная, поэтому надо попробовать её линеаризовать. Это можно сделать так. Сначала приведём (1.6) к виду:

$$(m_2 + m)a = m_2 g - \mu m g,$$

а затем введём вспомогательную величину

$$y = (m_2 + m)a. \quad (1.7)$$

В результате получается *линейная* зависимость между вспомогательной величиной y и массой груза m_2 :

$$y = g m_2 - \mu m g, \quad (1.8)$$

Если эксперимент подтвердит данную линейную зависимость, то это будет подтверждением формулы (1.6), а также *косвенным подтверждением второго закона Ньютона*, так как вывод формулы (1.6) основан на двукратном использовании этого закона. Кроме того, измерив параметры экспериментальной линейной зависимости, можно измерить *ускорение свободного падения* и *коэффициент трения*, так как угловой коэффициент равен ускорению свободного падения, а свободный член равен

$$b = -\mu m g,$$

откуда следует, что коэффициент трения равен

$$\mu = -\frac{b}{mg}. \quad (1.9)$$

Осталось решить вопрос о *способе измерения* ускорения a . Предлагается следующий способ. Из формулы (1.6) следует, что ускорение бруска от времени не зависит, поэтому движение бруска – *равноускоренное*. Тогда, в соответствии с уравнением кинематики равноускоренного движения, расстояние S , пройденное бруском за время t , выражается формулой

$$S = \frac{at^2}{2}. \quad (1.10)$$

В итоге, измеряя S и t , можно определить a по формуле

$$a = \frac{2S}{t^2}. \quad (1.11)$$

Правда, прежде чем пользоваться формулой (1.11), целесообразно убедиться в том, что движение бруска в самом деле – равноускоренное. Для этого надо провести серию опытов по измерению зависимости пройденного бруском пути S от времени движения t . Если опыты покажут квадратичную зависимость $S(t)$, то метод измерения ускорения, основанный на использовании формулы (1.11) можно считать обоснованным.

Убедиться в том, что зависимость $S(t)$ – квадратичная, можно двумя методами. Первый метод: построить на основании экспериментальных данных график зависимости $S(t)$, а затем провести по точкам параболическую линию тренда. Второй метод основан на линеаризации теоретической зависимости (1.10), для чего можно ввести вспомогательную величину $x = \frac{t^2}{2}$, в результате чего квадратичная зависимость $S(t)$ сводится к более простой прямо пропорциональной зависимости $S(x)$. Тогда для экспериментальной проверки квадратичной зависимости $S(t)$ достаточно построить на основании экспериментальных данных график зависимости $S(x)$ и убедиться в том, что по экспериментальным точкам можно провести прямую линию тренда, проходящую через начало координат.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка – *виртуальная*. Она разработана в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

При вызове программы открывается окно «**Второй закон Ньютона**». В центральной части окна приведены цель работы и краткое описание работы. Внизу окна – три управляющие кнопки:

- **Ход работы.** При нажатии этой кнопки открывается окно, в котором показан порядок выполнения работы. Эту кнопку нажимать *не надо*, так как в данном пособии вам предлагается порядок выполнения лабораторной работы, который несколько отличается от того, который предлагают разработчики программы.
- **Эксперимент.** При нажатии на эту кнопку отрывается окно с экспериментальной установкой.

- **Завершение работы.** Эта кнопка вызывает выход из программы. Окно «Эксперимент» показано на рис. 2.1.

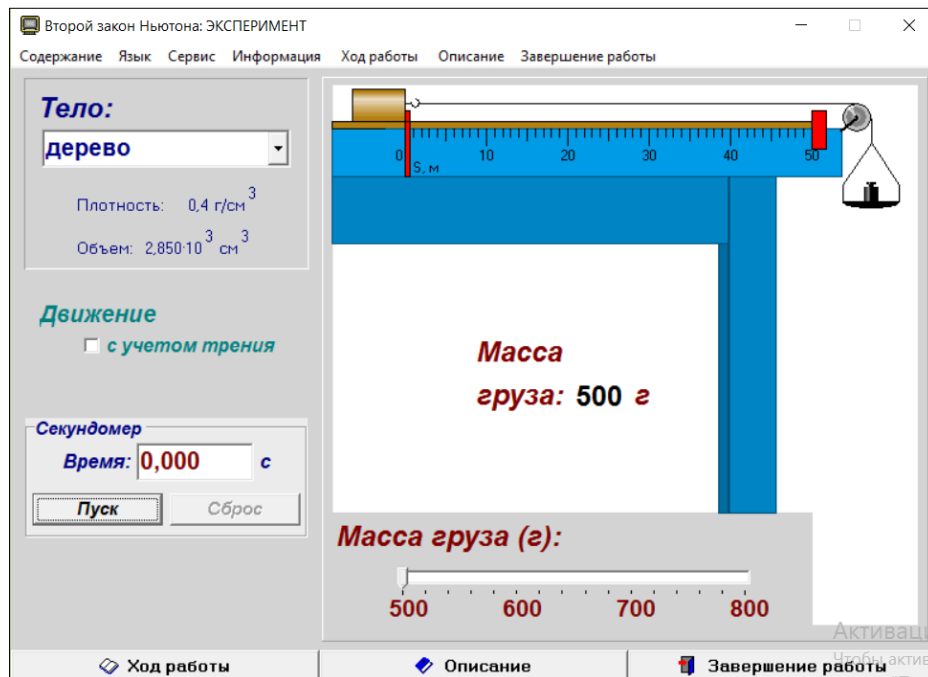


Рис. 2.1. Окно «Эксперимент»

Окно содержит два раздела: панель инструментов (слева) и окно визуализации (справа).

1. *Панель инструментов* содержит окно выбора тела, индикатор режима и секундомер.

После выбора тела под окном «**Тело**» появляется информация о плотности вещества ρ , из которого выполнен брусок, и об объёме бруска V . Зная плотность и объём бруска, можно определить массу бруска по формуле

$$m = \rho V. \quad (2.1)$$

Индикатор режима «**Движение**» позволяет выбирать два режима: без учёта трения и с учётом трения. В режиме без учёта трения поверхность стола является абсолютно гладкой, а в режиме с учётом трения поверхность стола выполнена из того же материала, что и брусок.

Секундомер запускается кнопкой «**Пуск**», в этот момент брусок и чашечка с грузом в окне визуализации начинают движение, а кнопка «**Пуск**» превращается в кнопку «**Стоп**». При нажатии кнопки «**Стоп**» движение прекращается, в окне секундомера «**Время**» высвечивается время движения t , а по линейке на столе в окне визуализации можно узнать путь S , пройденный бруском.

Если кнопку «**Стоп**» не нажимать, то движение системы и работа секундомера автоматически прекратятся в момент, когда брусок дойдёт до сто-

пора на конце стола. В этом случае брусок проходит максимальный путь $S = 50$ м.

2. В окне визуализации вы видите экспериментальную установку и окно с бегунком «**Масса груза (g)**».

На столе нанесена линейка, позволяющая измерять расстояние, пройденное бруском за время опыта. Окно «**Масса груза (g)**» позволяет задавать массу груза в диапазоне от 500 г до 800 г.

3. Задания

Задание 1. Экспериментально исследовать зависимость пути S , пройденного бруском, от времени его движения t и убедиться в том, что движение бруска – равноускоренное.

Задание 2. Экспериментально исследовать зависимость ускорения системы a от массы груза m_2 и убедиться, что эта зависимость соответствует теоретической (1.6), тем самым подтвердив второй закон Ньютона.

4. Порядок выполнения работы

- 4.1. Нажмите кнопку «**Эксперимент**» и обратитесь к преподавателю для того, чтобы он выбрал для вас тело. После этого заполните таблицу 1 «Условия эксперимента».

Массу бруска определите, используя формулу (2.1): $m = \rho V$.

Таблица 1

Условия эксперимента

Материал бруска и поверхности стола			
Плотность бруска	ρ	г/см ³	
Объём бруска	V	см ³	
Масса бруска	m	кг	
Ускорение свободного падения (табличное значение)	g	м/с ²	9,807
Погрешности заданных величин и прямых измерений	$\Delta(\rho)$	г/см ³	
	$\Delta(V)$	см ³	
	$\Delta(m)$	кг	
	$\Delta(S)$	м	
	$\Delta(t)$	с	
	$\Delta(m_2)$	кг	

- 4.2. Установите режим «**Движение**» – **с учётом трения**.

Выполнение задания 1.

- 4.3. Установите бегунком в окне визуализации массу груза – любую, по собственному усмотрению. Запишите её в заголовке к таблице 2.
- 4.4. Если число в индикаторном окне секундомера «**Время**» не равно нулю, то обнулите его, нажав кнопку «**Сброс**».
- 4.5. Нажмите кнопку «**Пуск**» и наблюдайте за движением бруска.

- 4.6. Как только брусок пройдёт путь, равный примерно 5 см, нажмите кнопку «**Стоп**» и запишите в таблицу 2 показание секундомера t и путь S , пройденный бруском.
- 4.7. Нажмите кнопку «**Сброс**».
- 4.8. Повторите пункты 4.5 – 4.7 ещё 8 – 9 раз с той разницей, что каждый раз путь бруска S надо увеличивать примерно на 5 см. В последнем опыте кнопку «**Стоп**» нажимать не надо – брусок остановится, наткнувшись на стопор в конце стола, и в этот же момент автоматически остановится секундомер. Путь, пройденный бруском в этом случае равен $S = 50$ м.

Таблица 2
Зависимость пути S , пройденного бруском, от времени t
(масса груза г)

Номер опыта	t	S	$x = t^2/2$	$\Delta(x)$
	с	м	с ²	с ²
1				
2				
3				
...				
...				
10				

- 4.9. Заполните последние два столбца таблицы 2.
- 4.10. На основании данных таблицы 2 постройте график зависимости $S(x)$. Нанесите на график планки погрешностей и линию тренда. В параметрах линии тренда выберите «Линейная» и «Показывать уравнение на диаграмме».
- 4.11. Напишите в отчёте, что показывает построенный вами график зависимости $S(x)$.

Выполнение задания 2.

- 4.12. Установите бегунком в окне визуализации минимально возможную массу груза: $m_2 = 500$ г.
- 4.13. Если число в индикаторном окне секундомера «**Время**» не равно нулю, то обнулите его, нажав кнопку «**Сброс**».
- 4.14. Нажмите кнопку «**Пуск**» и ждите, пока брусок не остановится у стопора.
- 4.15. Запишите в таблицу 2 значение массы груза m_2 и показание секундомера (время движения бруска) t .
- 4.16. Нажмите кнопку «**Сброс**».
- 4.17. Повторите пункты 4.13 – 4.15 ещё 7 раз, при этом каждый раз увеличивайте массу груза на 40 г.
- 4.18. Нажмите кнопку «**Завершение работы**».

Таблица 3

Зависимость ускорения бруска от массы груза

Номер опыта	m_2 кг	t с	S м	a м/с ²	y Н	$\varepsilon(y)$	$\Delta(y)$ Н
1							
2							
3							
...							
...							
8							

- 4.19. Заполните остальные столбцы таблицы 3. Значения S равны 50 м, значения ускорения a определите по формуле (1.11): $a = \frac{2S}{t^2}$, значения вспомогательной величины y – по формуле (1.7): $y = (m_2 + m)a$.
- 4.20. На основании данных таблицы 3 постройте график зависимости $y(m_2)$. Нанесите на график планки погрешностей и линию тренда. В параметрах линии тренда выберите «Линейная» и «Показывать уравнение на диаграмме».
- 4.21. Напишите в отчёте, что показывает построенный вами график зависимости $y(m_2)$.
- 4.22. Определите экспериментальные значения ускорения свободного падения и коэффициента трения. Для этого заполните таблицу 4.

Таблица 4

Ускорение свободного падения и коэффициент трения

Величина	g	b	μ
Размерность	м/с ²	Н	
Значение			
Абсолютная погрешность			
Относительная погрешность			

Значение и абсолютную погрешность углового коэффициента g и свободного члена b линейной зависимости $y(m_2)$ определите с помощью функции ЛИНЕЙН. Коэффициент трения определите по формуле (1.9): $\mu = -\frac{b}{mg}$.

- 4.1. Запишите результаты измерения ускорения свободного падения и коэффициента трения в стандартной форме:
- $$g = (\dots \pm \dots) \text{ м/с}^2, \quad \varepsilon(g) = \dots\%.$$
- $$\mu = (\dots \pm \dots), \quad \varepsilon(\mu) = \dots\%.$$
- 4.23. Сравните результаты измерения ускорения свободного падения и коэффициента трения с табличными значениями и напишите об этом в вашем

отчёте. Обратите внимание на точность измерений и дайте в своём отчёте соответствующий комментарий.

4.24. Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

5. Оценка погрешностей измерений

5.1. Погрешности *прямых* измерений.

В данной лабораторной работе прямым способом измеряются три величины: время движения бруска t , путь S , пройденный бруском, и масса груза m_2 .

- Время падения показывает цифровой секундомер в секундах в виде числа с тремя знаками после запятой, поэтому $\Delta(t) = 0,001 \text{ с} = 1 \text{ мс}$.
- Путь бруска S измеряется по линейке с ценой деления 1 мм, поэтому $\Delta(S) = 0,5 \text{ мм}$.
- Масса груза задаётся в окне «Масса груза» и указывается в окне визуализации в граммах в виде целого числа. Это означает, что $\Delta(m_2) = 1 \text{ г}$.

Именно эти значения $\Delta(t)$, $\Delta(S)$ и $\Delta(m_2)$ вам надо записать в таблицу 1 «Условия эксперимента».

5.2. Погрешности *заданных* величин.

На панели инструментов под окном «Тело» указаны значения плотности и объёма бруска.

Плотность бруска указана в г/см^3 в виде числа, содержащего от одной до трёх знаков после запятой – в зависимости от материала бруска. Поэтому абсолютная погрешность $\Delta(\rho)$ может быть равной $0,1 \text{ г/см}^3$, $0,01 \text{ г/см}^3$ или $0,001 \text{ г/см}^3$.

Объём бруска указан в см^3 в виде числа в нормальной форме с порядком 10^3 , мантисса числа содержит три знака после запятой. Поэтому $\Delta(V) = 0,001 \cdot 10^3 \text{ см}^3 = 1 \text{ см}^3$.

5.3. Погрешность измерения вспомогательной величины $x = \frac{t^2}{2}$.

Использование общего правила оценки погрешности косвенных измерений даёт:

$$\Delta(x) = \Delta\left(\frac{t^2}{2}\right) = \left|\frac{dx}{dt}\right| \Delta(t) = t\Delta(t).$$

5.4. Погрешность измерения ускорения a .

Ускорение движения системы измеряется косвенно, с использованием формулы (1.11): $a = \frac{2S}{t^2}$. Данная формула содержит только операции умножения, деления и возведения в степень, поэтому наиболее просто выглядит формула для оценки относительной погрешности ускорения:

$$\varepsilon(a) = \varepsilon(S) + 2\varepsilon(t) = \frac{\Delta(S)}{S} + 2\frac{\Delta(t)}{t}.$$

5.5. Погрешность массы бруска.

Масса бруска m не измеряется, а связана формулой (2.1) с заданными величинами – плотностью материала бруска ρ и объёмом бруска V :

$$m = \rho V.$$

Эта формула содержит только операцию умножения, поэтому

$$\begin{cases} \varepsilon(m) = \varepsilon(\rho) + \varepsilon(V), \\ \Delta(m) = m\varepsilon(m). \end{cases}$$

5.6. Погрешность измерения вспомогательной величины $y = (m_2 + m)a$.

Исходя из структуры формулы $y = (m_2 + m)a$, относительная погрешность $\varepsilon(y)$ равна

$$\begin{aligned} \varepsilon(y) &= \varepsilon(m_2 + m) + \varepsilon(a) = \frac{\Delta(m_2 + m)}{m_2 + m} + \varepsilon(a) \\ &= \frac{\Delta(m_2) + \Delta(m)}{m_2 + m} + \varepsilon(a). \end{aligned}$$

Абсолютная погрешность равна

$$\Delta(y) = y\varepsilon(y).$$

5.7. Погрешность измерения коэффициента трения μ .

Коэффициент трения измеряется косвенно, с использованием формулы (1.9):

$\mu = -\frac{b}{mg}$. Данная формула содержит только операции умножения и деления, поэтому получаем:

$$\begin{cases} \varepsilon(\mu) = \varepsilon(b) + \varepsilon(m) + \varepsilon(g), \\ \Delta(\mu) = \mu\varepsilon(\mu). \end{cases}$$

6. Контрольные вопросы

- 6.1. В чём состоит второй закон Ньютона?
- 6.2. Как устроена экспериментальная установка?
- 6.3. От чего зависит ускорение системы брусок-груз?
- 6.4. Какую зависимость предлагается исследовать в данной лабораторной работе?
- 6.5. В чём состоит способ измерения ускорения системы брусок-груз?
- 6.6. Какие физические величины предлагается измерить в данной лабораторной работе?
- 6.7. Из каких двух этапов состоит экспериментальная часть данной лабораторной работы?
- 6.8. Какую вспомогательную физическую величину вам предлагается использовать в данной лабораторной работе и зачем?
- 6.9. Какие графики вам предстоит построить при обработке экспериментальных данных? Какими вы ожидаете увидеть эти графики?
- 6.10. На основании чего вы сможете после завершения работы утверждать, что результаты лабораторной работы подтверждают второй закон Ньютона?

7. Приложение

Коэффициенты трения скольжения
некоторых материалов

Материал	Коэффициент трения
Бронза	0,2
Дерево	0,2 – 0,5
Лёд	0,028
Медь	0,36 – 0,42
Никель	0,53
Сталь	0,12 – 0,20
Стекло	0,4
Чугун	0,15 – 0,16

8. Литература

- 8.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. – М.: Наука, 1989.
- 8.2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989.
- 8.3. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск: Издательство НИ ТПУ, 2007.
- 8.4. Рипп А.Г. Обработка измерений: метод. пособие. – Севастополь: СНУЯЭП, 2012.

Учебное издание

**Рипп Александр Гешелевич
Мирошниченко Евгения Владимировна**

Второй закон Ньютона

Учебное пособие по общей физике

В авторской редакции

Изд. № 140/18. Объем 1 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»