

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра физики и микроэлектроники

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО МЕХАНИКЕ  
Часть II**

Учебно-методическое пособие

УДК 531(076)  
Л 12

Рецензенты:

*Д. О. Усенканов* – канд. физ.-мат. наук,  
*Г. Д. Бейшекеева* – канд. физ.-мат. наук, доц.

Составители:

*А. Н. Айтимбетова, Н. Ж. Кайрыев*

Рекомендовано к изданию  
кафедрой физики и микроэлектроники,  
Ученым советом естественно-технического факультета КРСУ

Л 12 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МЕХАНИКЕ. Часть  
II: учебно-методическое пособие / сост.: А. Н. Айтимбетова,  
Н. Ж. Кайрыев. Бишкек: КРСУ, 2019. 44 с.: ил.

Учебно-методическое пособие содержит указания к пяти новым лабораторным работам по механике, каждое из которых включает в себя теоретическую часть, описание установки, порядок проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных.

Содержание пособия соответствует требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по направлениям подготовки бакалавров и специалистов на естественно-техническом факультете КРСУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19. Определение ускорения свободного падения с помощью машины Атвуда .....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20. Определение коэффициента трения скольжения .....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21. Определение коэффициента трения покоя.....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22. Проверка законов динамики поступательного движения .....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23. Изучение законов сохранения импульса и энергии при ударе ....	31
ЛИТЕРАТУРА .....	41

## ВВЕДЕНИЕ

В учебно-методическом пособии представлены описания новых лабораторных работ лабораторного практикума по механике для студентов I курса КРСУ.

Тематика приведенных в пособии лабораторных работ соответствует учебным планам естественно-технических направлений специальностей КРСУ по разделу механики общей физики, охватывает достаточно широкий круг вопросов физических основ механики и отражает техническую оснащенность учебной лаборатории и сложившиеся традиции проведения физического практикума на кафедре физики и микроэлектроники естественно-технического факультета.

Описания составлены в форме руководства к выполнению лабораторных работ и структурно содержат: название, цель, оборудование, теоретическое введение, описание установки, порядок выполнения работы, контрольные вопросы.

*Название, цель, оборудование* определяют тематику, направленность, приборные и технические средства работы.

*Теоретическое введение* содержит элементы общей теории по тематике работы; качественный анализ рассматриваемого физического явления; основные понятия, определения и формулы; сведения об экспериментальной установке и анализ физических приближений ее описания; сведения об устройстве, принципах действия и правил использования, необходимых в работе приборов. Главная задача введения сформировать у студента ясное представление о существе работы и ее практической реализации даже в том случае, когда выполнение работы опережает теоретический курс.

*Описание установки* знакомит с конструкцией оборудования и особенностями работы с ним.

*Порядок выполнения работы* определяет по существу описание хода эксперимента и обработки его результатов.

*Контрольные вопросы* тестируют студента на подготовленность к выполнению лабораторной работы, анализу ее результатов, обсуждению возможных ошибок.

*Литература* содержит список учебных пособий необходимых для более глубокой проработки всех вопросов, связанных с выполнением и анализом результатов выполнения лабораторных работ.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Успешное выполнение лабораторной работы, объем знаний и навыков, приобретаемых в результате ее выполнения, определяются главным образом подходом студента к ее выполнению. Педагогическая практика однозначно показывает, что оптимальный подход состоит в отношении к выполняемому эксперименту как к небольшому самостоятельному научному исследованию. Необходимо вдумчиво подходить к планированию и каждому шагу эксперимента, умело применять теоретические знания в экспериментальной работе, видеть и анализировать источники ее ошибок.

### Этапы выполнения работы

**Подготовка к работе** состоит в изучении описания лабораторной работы с тем, чтобы получить ясное представление о тематике, теории и существе работы, методах измерений и используемых приборах, последовательности действий при проведении измерений, порядках измеряемых величин, количестве измерений и необходимых таблиц, способах обработки экспериментальных данных и формах представлений результатов эксперимента. Самотестирование студента осуществляется с помощью контрольных вопросов.

*Успешность прохождения этапа подготовки к работе определяется только преподавателем в ходе личного собеседования и оформляется в виде допуска к выполнению лабораторной работы.*

**Начало работы** состоит в реальном ознакомлении с экспериментальной установкой, регулировке и настройке приборов, проверке работоспособности установки путем проведения контрольных измерений. *Обо всех замеченных неполадках в работе приборов и установок необходимо сообщить преподавателю.*

**Проведение измерений** состоит в получении первичных экспериментальных данных. Все записи результатов измерений должны быть продуманы и представлены в рабочих тетрадях в четкой и подробной форме с необходимыми пояснениями, обязатель-

ным указанием единиц измерения физических величин. При большом разбросе результатов измерений необходимо выяснить и устранить причину этого явления.

**Расчеты, анализ и представление результатов** состоит в обработке первичных экспериментальных данных: расчете конечных значений величин, их погрешностей, нахождении доверительной вероятности и доверительного интервала, установлении зависимостей измеряемых величин между собой; правильном построении и обработке графиков; оценке качества полученных результатов.

Все расчеты, графики должны быть представлены в рабочей тетради с целью проверки и анализа результатов преподавателем. Результаты работы оформляются в рабочих тетрадях в виде отчета, который должен содержать:

1. Название и номер работы;
2. Краткое изложение теории с выводом необходимых формул и соотношений, схему экспериментальной установки, описание хода эксперимента и таблиц для записи экспериментальных данных;
3. Обработку результатов путем вычисления расчетных величин, заполнения таблиц, построения графиков, вычисления результатов эксперимента;
4. Апробацию результатов эксперимента путем их сравнения с известными данными, обсуждение возможных ошибок и предложения по улучшению эксперимента.

Отчет по работе защищается студентом в ходе личного собеседования с преподавателем.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

*Цель работы:* проверка справедливости основного закона поступательного движения, определение ускорения свободного падения  $g$ .

*Оборудование:* модульный учебный комплекс МУК-М2 (блок механический БМ2-04, секундомер электронный СЭ1-07), машина Атвуда.

### Теоретическое введение

Машина Атвуда (рисунок 19.1), состоит из:

- легкого блока с неподвижной осью и вращающейся с малым трением;
- двух грузов разной массы ( $m_1 > m_2$ ), подвешенных на нерастяжимой нити, перекинутой через блок.

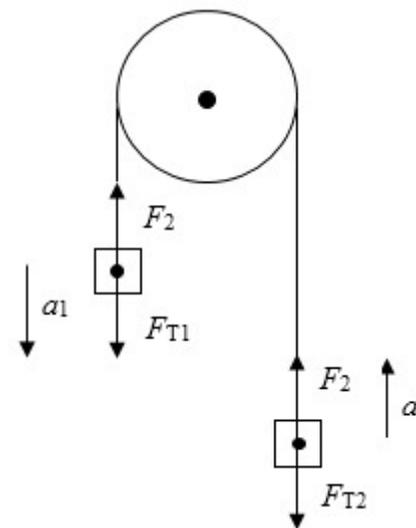


Рисунок 19.1 – Силы, приложенные к грузам

Если грузы не удерживать, то они будут двигаться равноускоренно. Запишем основные уравнения движения грузов в векторной (формула 19.1) и скалярной (формула 19.2) формах:

$$\begin{cases} m_1 \vec{a}_1 = m_1 \vec{g} + \vec{F}_1 \\ m_2 \vec{a}_2 = m_2 \vec{g} + \vec{F}_2 \end{cases} \quad (19.1)$$

$$\begin{cases} -m_1 a_1 = -m_1 g + F_1 \\ m_2 a_2 = m_2 g + F_2 \end{cases} \quad (19.2)$$

Найдем силы натяжения нити  $F_1$  и  $F_2$  с учетом того, что ускорения грузов по модулю одинаковые ( $a_1 = a_2 = a$ ):

$$\begin{cases} F_1 = m_1(g - a) \\ F_2 = m_2(g + a) \end{cases} \quad (19.3)$$

Величину ускорения грузов  $a$  можно найти экспериментальным путем. Для этого следует измерить время опускания груза  $t$  с определенной высоты  $h$ :

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (19.4)$$

В идеальном случае (когда блок невесомый и трение на оси блока отсутствует) эти силы должны быть равны между собой. В этом случае, исходя из формулы 19.3, ускорение грузов можно вычислить как:

$$g = a \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 - m_2} \quad (19.5)$$

### Описание установки

Машина Атвуда представлена на рисунке 19.2. Через блок 3 перекинута нить 6 с грузами 2 и 8. Для удержания грузов используется электромагнит 9. Для окончания счета секундомера используется фотодатчик 5. Для остановки груза применяется отбойное устройство 4.

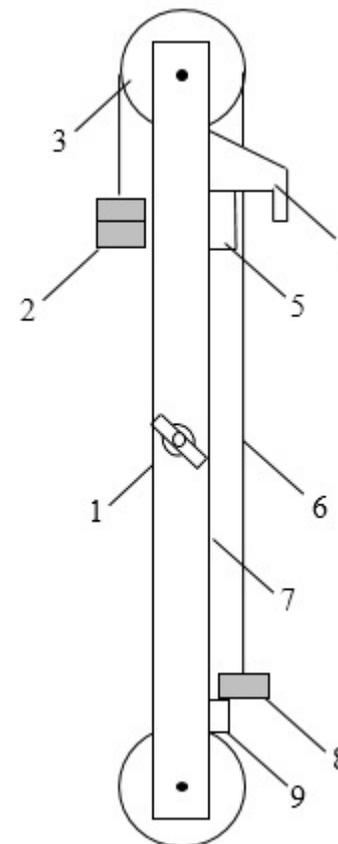


Рисунок 19.2 – Машина Атвуда

Для работы с машиной Атвуда необходимо перевести секундомер СЭ1-07 в режим работы № 1. При этом включится электромагнит 9 и груз 8 будет зафиксирован. После нажатия кнопки «Пуск» секундомера электромагнит выключится, начнется отсчет времени, и грузы начнут равноускоренное движение.

После прохождения фотодатчика 5 произойдет остановка секундомера. Отбойное устройство 4 остановит груз. Время паде-

ния фиксируется на электронном табло. Для повторения эксперименты необходимо сбросить показание времени при помощи кнопки «Сброс».

### Порядок выполнения работы

- С помощью дополнительных грузов и основания известных масс измерьте время опускания груза с высоты  $h$ . Результаты измерений занесите в таблице 19.1.  
 Масса подставки – 29 г.  
 Масса меньшего дополнительного груза – 8 г.  
 Масса большего дополнительного груза – 12 г.

Таблица 19.1 – Экспериментальные данные

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$h$ , м	$t$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н
1	$37 \times 10^{-3}$	$29 \times 10^{-3}$	0,52					
2								
3								
4								
5								
1	$41 \times 10^{-3}$	$29 \times 10^{-3}$						
2								
3								
4								
5								
1	$41 \times 10^{-3}$	$37 \times 10^{-3}$						
2								
3								
4								
5								

- Повторите измерения 5 раз при неизменном значении  $m_1$  и  $m_2$ .
- Рассчитайте ускорение  $a$  по формуле 19.4, а ускорение  $g$  – по формуле 19.5.

- Найдите силы  $F_1$  и  $F_2$  для каждого случая.
- Проведите оценку погрешности измерения ускорения свободного падения и результаты занесите в таблицу 19.2.

Таблица 19.2 – Ускорение свободного падения

№	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$\Delta g$ , м/с <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , %
1			
...			
15			
Сред.			

- Окончательный результат выполнения лабораторной работы запишите в виде интервала:

$$g_{\text{ср}} - \Delta g_{\text{ср}} \leq g \leq g_{\text{ср}} + \Delta g_{\text{ср}}$$

### Контрольные вопросы

- Сформулируйте основной закон динамики поступательного движения (второй закон Ньютона).
- Дайте определение ускорения свободного падения  $g$ .
- Запишите формулу для ускорения свободного падения  $g$  на планете.
- Как ускорение свободного падения зависит от географической широты?
- Как ускорение свободного падения зависит от высоты над поверхностью Земли?
- Запишите формулу пути при равноускоренном движении.
- Выведите формулу 19.4.
- Выведите формулу 19.5.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

*Цель работы:* изучение законов динамики поступательного движения, ознакомление с методикой расчета коэффициента трения скольжения.

*Оборудование:* модульный учебный комплекс МУК-М2 (блок механический БМ2-04, секундомер электронный СЭ1-07).

### Теоретическое введение

При соскальзывании бруска с наклонной плоскости на него действует несколько сил: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила нормальной реакции опоры  $\vec{N}$  и сила трения скольжения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  (рисунок 20.1).

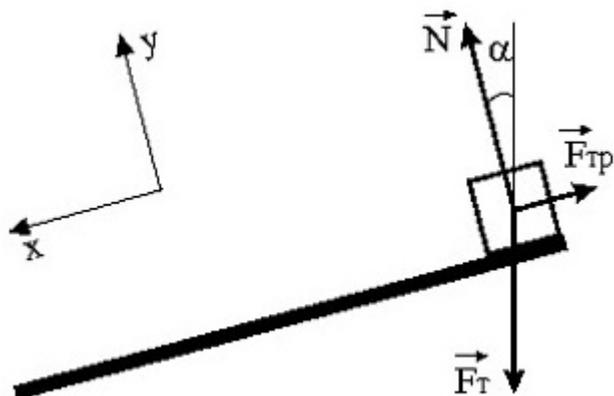


Рисунок 20.1 – Силы, приложенные к грузу

Выберем направление координатной оси X вдоль плоскости вниз, а координатной оси Y перпендикулярно плоскости вверх. Запишем уравнение динамики поступательного движения бруска

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + \vec{F}_T$$

в проекциях на эти оси:

$$\begin{cases} OX: ma = mg \sin \alpha - F_{\text{тр}}. \\ OY: 0 = N - mg \cos \alpha \end{cases} \quad (20.1)$$

Учтем, что сила трения скольжения равна:

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (20.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

Решая систему уравнений 20.1 и 20.2, получаем

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha} = \text{tg } \alpha - \frac{a}{g \cos \alpha}. \quad (20.3)$$

Величину ускорения  $\vec{a}$  можно найти, измерив пройденный бруском путь  $S$  и соответствующее время  $t$ :

$$a = \frac{2S}{t^2}. \quad (20.4)$$

Формула получена при нулевом значении начальной скорости, что соответствует условиям опыта. Подставляем  $a$  из выражения 20.4 в формулу 20.3, получаем рабочую формулу для определения коэффициента трения скольжения:

$$\mu = \text{tg } \alpha - \frac{2S}{g t^2 \cos \alpha}. \quad (20.5)$$

### Описание установки

Установка представляет собой наклонную плоскость 1, которую с помощью винта 2 можно устанавливать под разными углами  $\alpha$  к горизонту (рисунок 20.2). Угол  $\alpha$  измеряется с помощью шкалы 3. На плоскость помещается брусок 4 массой  $m$ , состоящий из двух частей, изготовленных из различных материалов: дерево – дюраль. Брусок закрепляется в верхней точке наклонной плоскости с помощью электромагнита 5, управление которым осуществляется с помощью

электронного секундомера СЭ1-07 и тумблера на левой стороне лабораторного стенда. Пройденное бруском расстояние составляет 0,52 м. Время соскальзывания бруска измеряется автоматически с помощью датчика 7, выключающего секундомер в момент касания бруском финишной точки.

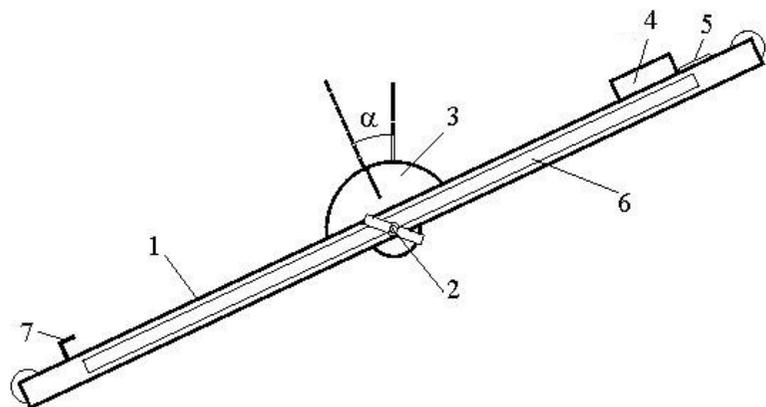


Рисунок 20.2 – Экспериментальная установка

### Порядок выполнения работы

- Ослабив винт 2 (рисунок 20.2), установите плоскость под углом  $25^\circ$  к горизонту, электромагнит при этом должен находиться в верхней части плоскости. Закрепите плоскость в таком положении, зажав винт 2.
- Включите секундомер СЭ1-07. Переключите его в режим № 1.
- Поместите брусок на наклонную плоскость в положении дерева вниз, прижмите торец бруска, на который наклеена металлическая пластина, к электромагниту. Убедитесь, что брусок удерживается в этом положении.
- Нажмите кнопку «Пуск» секундомера. При этом происходит одновременное отключение электромагнита и включение секундомера. Выключение секундомера происходит автоматически в момент удара бруска по финишному датчику.

- Запишите время соскальзывания бруска  $t$ , пройденный бруском путь  $S$ , угол наклона плоскости  $\alpha$  в таблицу 20.1. Повторите опыт 3 раза.
- Повторите п.п. 1–5 для других углов  $\alpha$  ( $\alpha = 35^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ).

Таблица 20.1 – Экспериментальные данные для материалов дерево – дерево

№	$\alpha$ , град	$S$ , м	$t$ , с	$\mu$	
1	25°	0,52			
2					
3					
1	35°				
2					
3					
1	45°				
2					
3					

- Вычислите по формуле 20.5 коэффициент трения скольжения  $\mu$ . Проведите математическую обработку результатов измерений. Результаты занесите в таблицу 20.2.

Таблица 20.2 – Коэффициент трения скольжения дерево – дерево

№	$\mu$	$\Delta\mu$	$\varepsilon$ , %
1			
...			
9			
Сред.			

- Повторите п. п. 1–7 для дюралюминия и запишите значения в таблицы 20.3 и 20.4.

Таблица 20.3 – Экспериментальные данные для материалов дерево – дюраль

№	$\alpha$ , град	$S$ , м	$t$ , с	$\mu$
1	25°	0,52		
2				
3				
1	35°			
2				
3				
1	45°			
2				
3				

Таблица 20.4 – Коэффициент трения скольжения дерево – дюраль

№	$\mu$	$\Delta\mu$	$\varepsilon$ , %
1			
...			
9			
Сред.			

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение силы трения скольжения. Единица измерения.
2. Запишите формулу пути при равноускоренном движении.
3. Из уравнения кинематики выведите формулу 20.4.
4. Сформулируйте основной закон динамики поступательного движения (второй закон Ньютона).
5. Выведите рабочую формулу 20.5.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКОЯ

*Цель работы:* ознакомиться с одним из способов измерения коэффициента трения покоя.

*Оборудование:* модульный учебный комплекс МУК-М2 (блок механический БМ2-04, узел «плоскость»).

### Теоретическое введение

Силой трения  $F_{тр}$  называется сила, возникающая при соприкосновении поверхностей двух тел и препятствующая их взаимному перемещению. Она приложена к телам вдоль поверхности их соприкосновения и направлена всегда противоположно относительной скорости перемещения [1, 3].

Если соприкасающиеся тела неподвижны друг относительно друга, то говорят о трении покоя; при относительном перемещении говорят о трении скольжения. В случае, если одно из тел катится по поверхности другого без проскальзывания, то говорят о трении качения.

Сила трения покоя не является однозначно определенной величиной. В зависимости от приложенной силы тяги  $F$  величина силы трения покоя меняется от 0 до  $F_{мин}$  – того значения силы, когда брусок начнет двигаться. Поэтому

$$F_{тр} \leq F_{тр \text{ макс пок}} = F_{мин}$$

Обычно силой трения покоя называют максимальную силу трения покоя  $F_{тр \text{ макс пок}}$ . Сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения тел и пропорциональна силе нормального давления  $P_n$  ( а следовательно, равной ей силе реакции опоры  $N$ ):

$$F_{тр \text{ макс пок}} = \mu_{пок} N. \quad (21.1)$$

Величина  $\mu_{пок}$  называется коэффициентом трения покоя. Коэффициент трения покоя зависит от трущихся материалов и от качества обработки поверхностей. Для определения коэффициента трения покоя удобно использовать наклонную плоскость

При медленном увеличении угла наклона плоскости можно найти такой угол  $\alpha_0$ , при котором брусок скачкообразно сдвинется с места и начнет скользить по плоскости. В данном случае на брусок будут действовать три силы: сила тяжести  $\vec{F}_T$ , сила реакции опоры  $\vec{N}$  и сила трения  $\vec{F}_{\text{тр. пок.}}$  (рисунок 21.1).

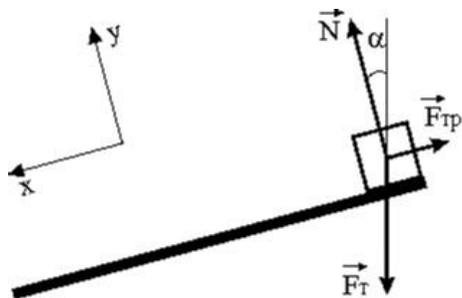


Рисунок 21.1 – Силы, действующие на груз

Выберем направление координатной оси  $X$  вдоль плоскости вниз, а координатной оси  $Y$  перпендикулярно плоскости вверх. При отсутствии ускорения равнодействующая всех трех сил равна нулю. Запишем систему уравнений исходя из второго закона Ньютона:

$$\vec{N} + \vec{F}_{\text{тр. пок.}} + \vec{F}_T = 0,$$

или в проекциях:

$$\begin{cases} -F_{\text{тр. пок.}} + F_T \sin \alpha = 0 \\ N - F_T \cos \alpha = 0 \end{cases}$$

Из системы уравнений следует  $F_{\text{тр. пок.}} = N \operatorname{tg} \alpha$ . Исходя из выражения (1) можно получить

$$\mu_{\text{пок.}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (21.2)$$

### Описание установки

Установка представляет собой наклонную плоскость 1, которую с помощью винта 2 можно устанавливать под разными углами  $\alpha$  к горизонту (рисунок 21.2). Угол  $\alpha$  измеряется с помощью шкалы 3. На плоскость может быть помещен брусок 4 массой  $m$ , изготовленный из различных материалов: дерево – дюраль.

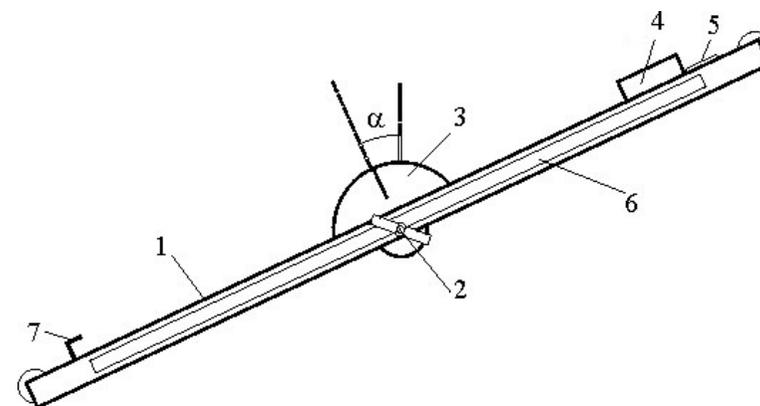


Рисунок 21.2 – Экспериментальная установка

Изменяя угол наклона плоскости можно найти такой угол, при котором брусок скачком сдвинется с места и начнет скользить по плоскости. Используя формулу 21.2 можно рассчитать коэффициент трения покоя  $\mu_{\text{пок.}}$  бруска.

### Порядок выполнения работы

1. Ослабив винт 2 (рисунок 21.2), установите плоскость под углом  $0^\circ$  к горизонту. Поместите брусок 4 (дерево – дюраль) на наклонную плоскость в положении деревом вниз.
2. Медленно изменяя угол наклона плоскости, найдите такой угол, при котором брусок скачком сдвинется с места и начнет скользить по плоскости. Запишите угол наклона плоскости  $\alpha$  в таблицу 21.1. Вычислите по формуле (21.2) коэффициент трения покоя  $\mu_{\text{пок.}}$ .

Таблица 21.1 – Экспериментальные данные дерево – дерево

№		$\alpha$ , град	$\mu_{\text{пок}}$	$\Delta\mu_{\text{пок}}$	$\varepsilon$ , %
1	Дерево – дерево				
2					
3					
4					
5					
Сред.		X			

- Повторите опыт 5 раз. Проведите статистическую обработку результатов.
- Повторите п.п. 1-3 для бруска, помещенного дюралюминием вниз. Полученные значения внесите в таблицу 21.2.

Таблица 21.2 – Экспериментальные данные дерево – дюраль

№		$\alpha$ , град	$\mu_{\text{пок}}$	$\Delta\mu_{\text{пок}}$	$\varepsilon$ , %
1	Дерево – дюраль				
2					
3					
4					
5					
Сред.		X			

- Сравните полученные в опыте значения коэффициентов трения покоя с табличными, взятыми из справочника или Интернета.

### Контрольные вопросы

- Дайте определение силы трения покоя и силы трения скольжения. К чему приложены эти силы и куда направлены?
- От чего зависит сила трения покоя?

- От чего зависит коэффициент трения покоя? Его единица измерения.
- Какие силы действуют на брусок при его скольжении по наклонной плоскости? Покажите их на рисунке.
- Выведите формулу 21.2, используемую для расчета коэффициент трения покоя бруска в лабораторной работе.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22.  
ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ  
ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

*Цель работы:* определение ускорения тела при поступательном движении и нахождение зависимости ускорения тела от угла наклона плоскости.

*Оборудование:* модульный учебный комплекс МУК-М2 (блок механический БМ2-04, секундомер электронный СЭ1-07).

**Теоретическое введение**

Основной закон динамики (или второй закон Ньютона) выражает соотношение между силой  $\vec{F}$  и изменением скорости (ускорением  $\vec{a}$ ) взаимодействующих тел [1, 4]:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (22.1)$$

где  $m$  – масса тела.

С помощью основного закона динамики можно определить силы, действующие на тело, либо характер движения (ускорение) по заданным силам. При составлении уравнения движения необходимо пользоваться следующим алгоритмом:

- вначале нужно найти все силы, действующие на данную материальную точку (включая силы реакции);
- затем следует найти равнодействующую этих сил;
- применить основной закон динамики и решить уравнение относительно неизвестной величины.

В данной лабораторной работе предлагается рассмотреть основной закон динамики на примере движения бруска массой  $m_1$  по наклонной плоскости (рисунок 22.1).

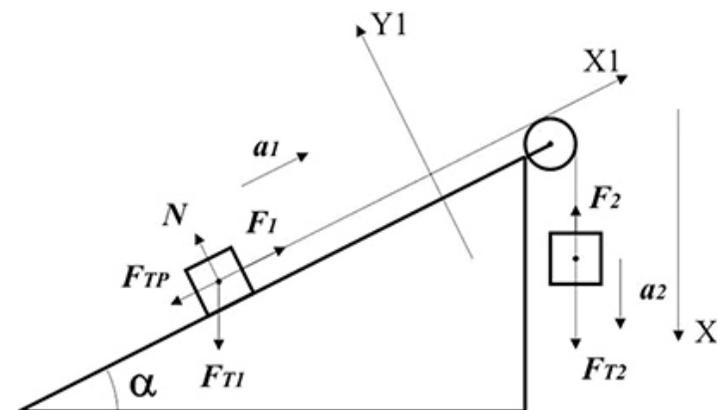


Рисунок 22.1 – Силы, действующие на грузы

Для создания силы тяги  $\vec{F}_1$  на невесомую, нерастяжимую нить, перекинутую через невесомый, вращающийся с малым трением блок подвешен груз массой  $m_2$ . Груз под действием силы тяжести  $\vec{F}_{T2}$  опускается, натягивает нить и заставляет брусок скользить равноускоренно по поверхности наклонной плоскости вверх. На брусок будут действовать: сила тяжести  $\vec{F}_{T1} = m_1\vec{g}$ , сила тяги  $\vec{F}_1$ , сила трения  $\vec{F}_{TP}$ , сила реакции опоры  $\vec{N}$ . На груз будут действовать сила натяжения нити  $\vec{F}_2$  и сила тяжести  $\vec{F}_{T2} = m_2\vec{g}$ .

Для описания движения бруска введем инерциальную систему отсчета, ось  $X1$  которой сонаправим с ускорением  $a_1$ , а ось  $Y1$  – перпендикулярно к наклонной плоскости. Движение груза будем рассматривать относительно системы отсчета, ось  $X2$  которой направим по направлению ускорения  $a_2$ .

Запишем уравнения движения бруска и груза в векторной форме:

$$\begin{cases} m_1\vec{a}_1 = m_1\vec{g} + \vec{F}_1 + \vec{F}_{TP} + \vec{N} \\ m_2\vec{a}_2 = m_2\vec{g} + \vec{F}_2 \end{cases} \quad (22.2)$$

Для решения полученной системы уравнений необходимо знать коэффициент трения  $\mu$ , входящий в формулу для определения модуля силы трения  $F_{TP} = \mu N$ . Для нахождения этого коэффициента удобнее расположить наклонную плоскость под углом  $0^\circ$  к горизонту. В этом случае:

$$\begin{cases} F_1 = m_1(a_1 + \mu g) \\ F_2 = m_2(g - a_2). \end{cases} \quad (22.3)$$

Если считать, что блок невесомый и трение на оси блока отсутствует, то эти силы должны быть равны между собой по модулю. Поскольку нить нерастяжима, то ускорения  $a_1 = a_2 = a$ . Модуль ускорения  $a$  можно найти, зная длину пути  $L$ , пройденную бруском и время его движения:

$$a = \frac{2L}{t^2}. \quad (22.4)$$

Таким образом, решая уравнения (3), можно получить выражения для нахождения коэффициента трения скольжения:

$$\mu = \frac{m_2 g - a(m_1 + m_2)}{m_1 g}. \quad (22.5)$$

Рассмотрим общий случай, при котором  $\alpha \neq 0$ . Систему уравнений 22.2 в скалярном виде можно представить:

$$\begin{cases} m_1 a_1 = F_1 - m_1 g \sin \alpha - \mu m_1 \cos \alpha \\ m_2 a_2 = m_2 g - F_2 \end{cases}. \quad (22.6)$$

Если выполняются условия  $F_1 = F_2 = F$  и  $a_1 = a_2 = a$ , то

$$a = \frac{g(m_2 - m_1(\sin \alpha + \mu \cos \alpha))}{m_1 + m_2}. \quad (22.7)$$

## Описание установки

Исследовать движение бруска по наклонной плоскости можно с помощью узла «плоскость» и секундомера СЭ1-07, входящих в состав модульно учебного комплекса МУК-М2. Установка представляет собой наклонную плоскость 1, которую с помощью винта 2 можно устанавливать под разными углами  $\alpha$  к горизонту (рисунок 22.2). Угол  $\alpha$  измеряется с помощью шкалы 3. На плоскость может быть помещен брусок 4. Для удержания бруска используется электромагнит 5. Пройденное бруском расстояние можно измерить с помощью линейки 6. На нить 10, перекинутую через блок 8, подвешивается груз подставки 9.

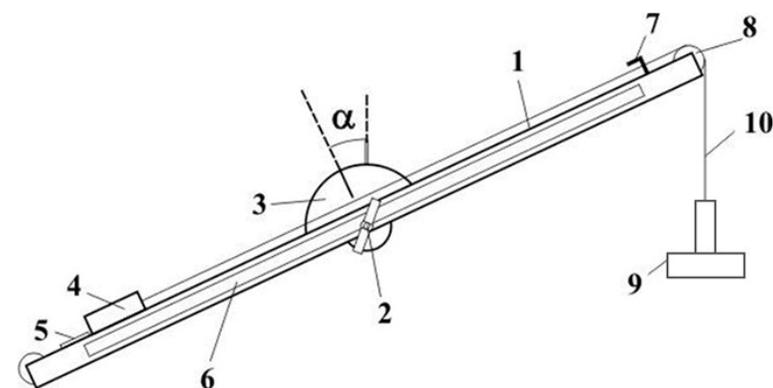


Рисунок 22.2 – Экспериментальная установка

В комплект узла «плоскость» входят брусок и груз. Брусок состоит из двух частей, изготовленных из различных материалов: дерево-дюраль.

Масса бруска  $m_1 = 23$  г.

Масса груза  $m_2 = 29$  г.

## Порядок выполнения работы

1. Ослабив винт 2 (рисунок 22.2), установите плоскость под углом  $0^\circ$  к горизонту. Поместите брусок 4 (дюраль-дерево) на наклонную плоскость в положении деревом вниз.

- Включите тумблер управления электромагнитами механического блока, расположенный на левой стороне лабораторного стенда.
- Переведите секундомер СЭ1-07 в режим 1.
- Нажмите кнопку «Пуск» секундомера. Измерьте время опускания груза. Полученные данные занесите в таблицу 22.1.
- Повторите опыт 5 раз.

Таблица 22.1 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 0^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$\mu$
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

- Найдите ускорение бруска по формуле 22.4 и коэффициент трения по формуле 22.5. Проведите статистическую обработку измерений коэффициента трения скольжения и данные занесите в таблицу 22.2.

Таблица 22.2 – Коэффициент трения скольжения

№	$\mu$	$\Delta\mu$	$\varepsilon$ , %
1			
2			
3			
4			
5			
Сред.			

- Полученный в опыте  $\mu_{\text{ср}}$  сравните с табличным значением коэффициента трения скольжения и используйте в дальнейших расчетах.
- Меняя угол наклона плоскости  $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  (таблицы 22.3.–22.7) найдите ускорения бруска в каждом случае по формуле 22.4. Сравните полученные результаты с теоретическими значениями, найденными по формуле 22.7.

Таблица 22.3 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 10^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a_{\text{эксп}}$ , м/с <sup>2</sup> по формуле 22.4	$a_{\text{теор}}$ , м/с <sup>2</sup> по формуле 22.7
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

Таблица 22.4 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 15^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a_{\text{эксп}}$ , м/с <sup>2</sup> по формуле 22.4	$a_{\text{теор}}$ , м/с <sup>2</sup> по формуле 22.7
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

Таблица 22.5 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 20^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a_{\text{эксп}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.4	$a_{\text{теор}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.7
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

Таблица 22.6 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 25^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a_{\text{эксп}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.4	$a_{\text{теор}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.7
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

Таблица 22.7 – Экспериментальные данные при  $\alpha = 30^\circ$

№	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L$ , м	$t$ , с	$a_{\text{эксп}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.4	$a_{\text{теор}}$ , М/с <sup>2</sup> по формуле 22.7
1	0,023	0,029	0,52			
2						
3						
4						
5						
Сред.						

9. Постройте график зависимости среднего экспериментального значения ускорения  $a_{\text{эксп}}$  от угла наклона плоскости  $\alpha$  (рисунок 22.3).

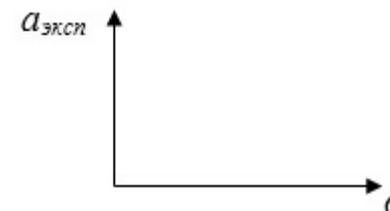


Рисунок 22.3 – Зависимость ускорения от угла наклона

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основной закон динамики поступательного движения.
2. Запишите уравнения движения двух грузов при горизонтальном и наклонном положениях плоскости.
3. Запишите формулу пути при равноускоренном движении. Выведите формулу 22.4.
4. Дайте определение силы трения скольжения. Единица измерения коэффициента трения скольжения.
5. Выведите формулу 22.5.
6. Выведите рабочую формулу 22.7.
7. Объясните расхождения в значениях  $a_{\text{эксп}}$  и  $a_{\text{теор}}$ .

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23.  
ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ  
ИМПУЛЬСА И ЭНЕРГИИ ПРИ УДАРЕ**

*Цель работы:* знакомство с явлением удара на примере соударения подвешенных на нитях шаров, определение коэффициентов восстановления скорости и энергии.

*Оборудование:* измерительная установка, набор шаров, пресс-форма, технические весы.

**Теоретическое введение**

*Удар* – совокупность явлений, возникающих при кратковременном приложении к телу внешних сил (например, при взаимодействии с другим движущимся относительно него телом), связанных со значительным изменением его скорости за короткий промежуток времени. Для тел, с которыми обычно имеют дело на практике, удар протекает в течение тысячных или даже миллионных долей секунды.

В качестве меры механического взаимодействия тел при ударе вместо ударной силы  $\vec{F}$  служит ее импульс за время удара, т. е. величина [1, 2]

$$\int_0^t \vec{F} dt = \vec{F}_{cp} t,$$

где  $\vec{F}_{cp}$  – средняя сила удара,  $t$  – время удара.

Если количество движения за время удара  $t$  изменяется на конечную величину  $\Delta(m\vec{V})$ , то из второго закона динамики получим

$$\vec{F}_{cp} t = \Delta(m\vec{V}). \quad (23.1)$$

Измеряя время удара, можно определить из выражения 23.1 среднюю силу при ударе  $\vec{F}_{cp}$ .

Рассеяние механической энергии при ударе характеризуется *коэффициентом восстановления скорости*  $k_c$  или *коэффициентом*

*восстановления энергии*  $k_\varepsilon$ . Коэффициент восстановления скорости определяется как отношение модуля скорости взаимного удаления центров тяжести тел после удара к модулю скорости их сближения до удара в проекции на общую нормаль к поверхности тел в точке их соприкосновения, эта нормаль называется *линией удара* ( $nn$  на рисунок 23.1),  $A, B$  – точка контакта,  $O_1, O_2$  – центры тяжести тел:

$$k_c = \frac{|u_{2n} - u_{1n}|}{|v_{2n} - v_{1n}|}, \quad (23.2)$$

где  $v_{1n}$  и  $v_{2n}$  – проекции на линию удара скоростей первого и второго тела до удара;

$u_{1n}$  и  $u_{2n}$  – проекции скоростей на линию удара тех же тел после удара.

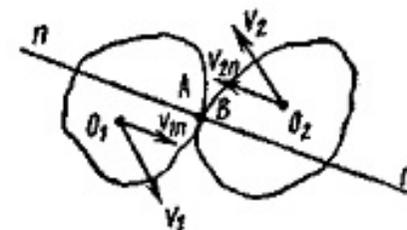


Рисунок 23.1 – Удар тел

Коэффициент восстановления энергии  $k_\varepsilon$  зависит от системы отсчета. Он определяется как отношение суммарной кинетической энергии тел после удара  $E_k''$  к суммарной кинетической энергии тел до удара  $E_k'$ :

$$k_\varepsilon = \frac{E_k''}{E_k'}. \quad (23.3)$$

Величины  $k_c$  и  $k_\varepsilon$  связаны между собой. Величина коэффициентов восстановления зависит от физических свойств материалов

соударяющихся тел, от их формы, а также в сильной степени зависит от масс соударяющихся тел. Для *абсолютно упругого удара*  $k_s = 1$ , для *абсолютно неупругого удара*  $k_s = 0$ , в реальных случаях  $0 < k_s < 1$ . В настоящей работе рассматривается удар шаров, подвешенных в виде маятников, причем один шар до удара покоится ( $\vec{v}_2 = 0$ ). Удар происходит в положении, соответствующем равновесию тел, и является центральным и прямым. Это значит, что при ударе центры тяжести тел лежат на линии удара, а их относительная скорость параллельна линии удара. Применяя к ударяющимся шарам закон сохранения импульса, можем написать [1, 3]:

для упругого удара

$$m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2; \quad (23.4a)$$

для абсолютно неупругого удара

$$m_1 \vec{v}_1 = (m_1 + m_2) \vec{u}, \quad (23.4б)$$

где  $m_1, m_2$  – массы ударяющихся шаров;

$\vec{u}_1, \vec{u}_2$  – скорости шаров после упругого удара;

$\vec{u}$  – общая скорость шаров после абсолютно неупругого удара.

При прямом центральном ударе, который рассматривается в данной работе, проекции скоростей тел на общую нормаль к их поверхностям в месте соударения совпадают с соответствующими скоростями тел:  $v_{1n} = v_1, u_{1n} = u_1$  и т. д. Следовательно, выражение (2) для определения коэффициента восстановления скорости  $k_c$  переписывается в виде:

$$k_c = \frac{|u_2 - u_1|}{|v_2 - v_1|}. \quad (23.5)$$

Для нахождения коэффициентов восстановления  $k_c$  и  $k_s$  необходимы величины скоростей тел до и после соударения, которые можно определить, зная высоту, с которой тела начинают движение до удара, и высоту их подъема после удара. Без учета потерь

энергии на преодоление сил сопротивления на основании закона сохранения энергии получаем:

для опускающегося шара

$$v_1 = \sqrt{2gh_1};$$

для поднимающихся шаров

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{2gh'_1}, \\ u_2 &= \sqrt{2gh'_2}, \end{aligned}$$

где  $v_1$  – скорость первого шара до удара;

$u_1$  и  $u_2$  – скорости шаров после соударения;

$h_1$  – высота бросания первого шара;

$h'_1$  и  $h'_2$  – высоты поднятия шаров после соударения.

Поскольку при установке непосредственно измеряются углы, на которые отскакивают шары после удара, и угол бросания, скорость шаров будем определять из соотношений:

$$\begin{aligned} v_1 &= 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_{6p}}{2}, \\ u_1 &= 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1}{2}, \\ u_2 &= 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_2}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $l$  – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шаров;

$\alpha_{6p}$  – угол бросания;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы отскока первого и второго шаров.

### Описание установки

Установка представляет собой основание 1 (рисунок 23.2) на трех регулируемых винтах 10, служащих для выверки ее по уровню. На основании смонтирована стойка 4, несущая подвески 5 шаров 3 и штангу 6, на которой крепится электромагнит 7.

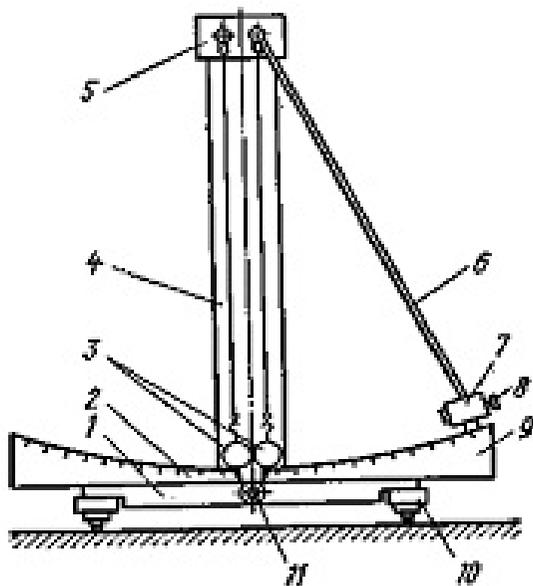


Рисунок 23.2 – Экспериментальная установка

Бифилярный подвес, несущий левый шар, можно перемещать в горизонтальном направлении, изменяя тем самым межцентровое расстояние.

Для отсчета положения шаров имеются две шкалы, проградуированные в градусной мере. Правая шкала 9 установлена так, что указатель положения правого шара в положении равновесия располагается над нулевой отметкой шкалы. Левая шкала 2 может перемещаться. При изменении межцентрового расстояния шаров необходимо левую шкалу 2 расположить так, чтобы ее нулевая отметка находилась против указателя левого шара в положении равновесия последнего. При перемещении шкалы 2 необходимо ослабить винт, расположенный на основании прибора за шкалой (на рисунке не показан). После установки шкалы винт затягивается.

Электромагнит 7, служащий для удержания правого шара в исходном положении для бросания, может перемещаться по разным направлениям. Это позволяет произвести необходимую цен-

тровку установки. Для закрепления электромагнита в нужном положении служат соответствующие винты на оправке электромагнита. Винтом 8 на правом торце электромагнита можно изменять зазор между сердечником магнита и шаром, что необходимо для создания достаточного для удержания шара усилия. Эта операция, так же как и установка правой шкалы 9, осуществляется при наладке установки.

Питание электромагнита осуществляется переменным напряжением 220 В. Все шары имеют указатель положения и крючок для подвеса. Шары из немагнитных материалов могут иметь специальные накладки для удержания их электромагнитом.

Для формирования пластилинового шара (неупругий удар) имеется специальная пресс-форма. Размягченный пластилин укладывается в пресс-форму, куда предварительно закладывается штырь, служащий указателем положения, и несущий крючок для подвеса. Закрытая пресс-форма сжимается винтом.

### Порядок выполнения работы

#### Определение коэффициентов восстановления энергии и скорости для упругого соударения шаров

1. Проверьте положение основания прибора. В случае необходимости произведите ее установку по уровню с помощью винтов 10.
2. Взвесьте массы упругих шаров  $m_1$ ,  $m_2$  и неупругого шара  $m_3$ . Подвесьте упругие шары и произведите их центровку.
3. Произведите удар малого правого шара по находящемуся в равновесии большому левому шару при определенном угле  $\alpha_{бр}$ . Определите угол отбросов шаров  $\alpha_1$   $\alpha_2$  после упругого удара. Удар из данного положения  $\alpha_{бр}$  повторите 5 раз.
4. Повторите замеры п.3 при пяти различных первоначальных положениях ударяющегося шара. Все полученные данные занесите в таблицу 23.1.
5. Снимите левый упругий шар и замените его неупругим пластилиновым, предварительно пограв его в руках. Повторите измерения п. п. 3 и 4 для неупругого удара.

Таблица 23.1 – Экспериментальные данные

	$\alpha_{\text{обр}}$ , град	№	$\alpha_1$ , град	$\alpha_2$ , град	$l$ , м	$v_1$ , м/с	$u_1$ , м/с	$u_2$ , м/с	$k_c$	$\Delta k_c$	$\varepsilon_{\text{кэ}}$ , %	$k_3$	$\Delta k_3$	$\varepsilon_{\text{кэ3}}$ , %
Упругий удар		1												
		...												
		5												
		Ср.												
		1												
		...												
		5												
		Ср.												
		1												
		...												
		5												
		Ср.												
Неупругий удар		1												
		...												
		5												
		Ср.												
		1												
		...												
		5												
		Ср.												
		1												
		...												
		5												
		Ср.												

6. Измерив длину подвеса шаров  $l$ , по формулам 23.6 вычислите скорости  $v_1$ ,  $u_1$  и  $u_2$  шаров.

- По формуле 23.5 найдите коэффициенты восстановления скорости  $k_c$  для упругого и неупругого ударов.
- Вычислите коэффициенты восстановления энергии для упругого и неупругого ударов по формуле

$$k_3 = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_{\text{бр}}}{2}}$$

- Вычислите относительную погрешность измерения  $k_c$  и  $k_3$ .

### Проверка закона сохранения импульса для упругого соударения шаров

- Прodelайте все операции, указанные в задании 1. В дальнейших расчетах используйте средние значения величин.
- Вычислите скорости  $v_1$  и  $u_1$  по формулам 23.6.
- Рассчитайте теоретические значения скоростей  $u_2$  и  $u$  по формулам:  
для упругого удара

$$u_2 = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_2}, \quad (23.7a)$$

а для неупругого

$$u = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}. \quad (23.7b)$$

- Вычислите скорости  $u_2$  и  $u$  по углу отскока шаров по формулам 23.6:  
для упругого удара

$$u_2 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_2}{2},$$

а для неупругого

$$u = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2},$$

где  $\alpha$  – общий угол отскока первого и второго шаров после неупругого удара.

5. Сравните теоретические и экспериментальные значения скоростей  $u_2$  и  $u$ :

$$\varepsilon_{u2} = \frac{|u_{2 \text{ эксперим}} - u_{2 \text{ теор}}|}{u_{2 \text{ теор}}} \cdot 100\%, \quad \varepsilon_u = \frac{|u_{\text{экспер}} - u_{\text{теор}}|}{u_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

6. Результаты вычислений внесите в таблицу 23.2.

Таблица 23.2 – Экспериментальные данные

№	$v_1$ , м/с	$u_1$ , м/с	$u_2$ эксперим, м/с по формуле 23.6	$u_2$ теор, м/с по формуле 23.7а	$\varepsilon_{u2}$ , %	$u_{\text{экспер}}$ , м/с по формуле 23.6	$u_{\text{теор}}$ , м/с по формуле 23.7б	$\varepsilon_u$ , %
1								
...								
5								

7. Считая удар абсолютно упругим, из закона сохранения энергии и закона сохранения импульса для  $\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  получим:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad u_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \quad (23.8)$$

8. Вычислите  $u_1$  и  $u_2$  по формулам 23.6 и 23.8. Сравните полученные значения. Результаты расчетов внесите в таблицу 23.3.

Таблица 23.3 – Абсолютно упругий удар

№	$v_1$ , м/с	$u_1$ эксперим, м/с по формуле 23.6	$u_1$ теор, м/с по формуле 23.8	$\varepsilon_{u1}$ , %	$u_2$ эксперим, м/с по формуле 23.6	$u_2$ теор, м/с по формуле 23.8	$\varepsilon_{u2}$ , %
1							
...							
5							

### Контрольные вопросы

1. Что называется импульсом силы и импульсом материальной точки?
2. Сформулируйте закон сохранения импульса. Для каких систем он справедлив?
3. Изменяется ли импульс материальной точки, которая движется равномерно по окружности?
4. Какое явление называется ударом?
5. В чем различие между упругим и неупругим ударами? Какой удар называют абсолютно упругим?
6. Запишите законы сохранения импульса для упругого соударения шаров одинаковых и неодинаковых масс.
7. Какими величинами характеризуется рассеяние механической энергии при ударе?
8. Дайте определение коэффициента восстановления скорости.
9. Дайте определение коэффициента восстановления энергии.
10. Запишите формулы кинетической и потенциальной энергии шаров.
11. Выведите формулы 23.6.
12. Докажите справедливость формул 23.8.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2009.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика: учеб. пособие для вузов. М.: Физматлит, 2002.
3. Тюрин Ю. И., Чернов И. П., Крючков Ю. Ю. Физика. Механика. СПб.: Лань, 2008.
4. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики: учеб. пособие. В 2 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. Изд. 3-е, перераб. М.: Наука, 1981. 480 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Составители:

*Айгуль Нурисовна Айтимбетова,  
Нурланбек Жутанович Кайрыев*

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО МЕХАНИКЕ  
Часть II

Учебно-методическое пособие

Компьютерная верстка – *Ю. Ф. Атаманов*

Подписано в печать 23.10.2019.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Офсетная печать.  
Объем 2,75 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 181

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Анкара, 2а