

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

Г.С. Якупов

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ. СОУДАРЕНИЯ УПРУГИХ ШАРОВ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург
2019

УДК 531.1(076.5)

ББК 22.21я7

Я49

Рецензент – доцент, кандидат педагогических наук А.В. Дудко

Якупов, Г.С.

Я49 Изучение движения тел под действием постоянной силы. Соударения упругих шаров: методические указания / Г. С. Якупов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 19 с.

Методические указания содержат требования и необходимый вспомогательный материал для выполнения лабораторных работ по механике.

Методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 531.1(076.5)

ББК 22.21я7

© Якупов Г.С., 2019

© ОГУ, 2019

Содержание

1	Лабораторная работа №135. Изучение звучание движения тел под действием постоянной силы	4
1.1	Цель работы.....	4
1.2	Краткая теория	4
1.3	Методика и порядок измерений.....	9
1.4	Обработка результатов и оформление отчета	11
1.5	Вопросы и задания для самоконтроля	12
2	Лабораторная работа № 136. Соударения упругих шаров	13
2.1	Цель работы.....	13
2.2	Краткая теория.....	13
2.3	Методика и порядок измерений	17
2.4	Измерения	17
2.5	Обработка результатов и оформление отчета.....	19
2.6	Вопросы и задания для самоконтроля	19

1 Лабораторная работа №135. Изучение звучание движения тел под действием постоянной силы

1.1 Цель работы

- 1) Выбор физической модели для анализа движения тела.
- 2) Исследование движения тела под действием постоянной силы.
- 3) Экспериментальное определение свойств сил трения покоя и движения.
- 4) Определение массы тела.

1.2 Краткая теория

Динамика – часть механики, изучающая связь движения тела с причинами, которые его вызвали.

Механика для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач использует разные физические модели. Простейшими из них являются: материальная точка (тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь) и абсолютно твердое тело (которое ни при каких условиях не может деформироваться и при всех условиях расстояние между двумя точками этого тела остается постоянным). Любое движение твердого тела можно представить, как комбинацию поступательного и вращательного движений. Поступательное движение – это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению.

Масса тела – физическая величина, являющаяся одной из основных характеристик материи, определяющая ее инерционные (инертная масса) и гравитационные (гравитационная масса) свойства. Чтобы описывать взаимодействия материальных точек или твердых тел вводят понятие силы.

Сила является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры. Сила – векторная величина – характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения.

Основной закон динамики поступательного движения – второй закон Ньютона -отвечает на вопрос, как изменяется механическое движение материальной точки или тела под действием приложенных к ней сил.

Оказывается, что ускорение, приобретаемое телом, всегда прямо пропорционально равнодействующей приложенных сил:

$$a = k_1 F \quad (m = \text{const}) . \quad (1.1)$$

При действии одной и той же силы на тела с разными массами их ускорения оказываются различными, а именно:

$$a = k_2 \frac{1}{m} \quad (F = \text{const}). \quad (1.2)$$

Используя выражения (1.1) и (1.2), можем записать

$$\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1.3)$$

Соотношение (1.3) выражает второй закон Ньютона: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с нею по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела).

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.4)$$

Масса материальной точки (тела) в классической механике есть величина постоянная, поэтому ее можно внести под знак производной:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}). \quad (1.5)$$

Векторная величина

$$\vec{P} = m\vec{v}, \quad (1.6)$$

называется импульсом (количеством движения) материальной точки или тела. Тогда

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}. \quad (1.7)$$

(1.7) – уравнение движения материальной точки, более общая формулировка второго закона Ньютона: скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе. Единица силы в СИ: 1 Н – сила, которая массе в 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы: $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг м/с}^2$

В механике большое значение имеет принцип независимости действия сил: если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто других сил не было. Согласно этому принципу, силы и ускорения можно разлагать на составляющие, использование которых приводит к существенному упрощению решения задач. Например, на рисунке 1.1 действующая сила $\vec{F} = m\vec{a}$ разложена на два компонента:

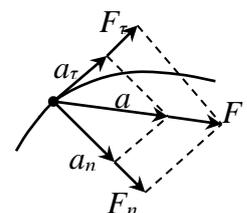


Рисунок 1.1

тангенциальную силу \vec{F}_r (направлена по касательной к траектории) и нормальную силу \vec{F}_n (направлена по нормали к центру кривизны).

Если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то, согласно принципу независимости действия сил, под \vec{F} во втором законе Ньютона понимают результирующую силу.

Из опыта известно, что всякое тело, движущееся по горизонтальной поверхности другого тела, при отсутствии действия на него других сил с течением времени замедляет свое движение и, в конце концов, останавливается. Это можно объяснить существованием силы трения, которая препятствует скольжению соприкасающихся тел друг относительно друга. Силы трения зависят от относительных скоростей тел и могут быть разной природы, но в результате их действия механическая энергия всегда превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел. Различают внешнее (сухое) и внутреннее (жидкое или вязкое) трение. Внешним трением называется трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении. Если соприкасающиеся тела неподвижны друг относительно друга, говорят о трении покоя, если же происходит относительное перемещение этих тел, то в зависимости от характера их относительного движения говорят о трении скольжения или качения.

Сила трения скольжения всегда направлена против скорости, не зависит от величины скорости и пропорциональна силе N , прижимающей по нормали одно тело к поверхности другого.

Рассмотрим лежащее на плоскости тело (рисунок 1.2), к которому приложена горизонтальная сила \vec{F} .

Тело придет в движение лишь тогда, когда приложенная сила \vec{F} будет больше силы трения \vec{F}_{mp} .

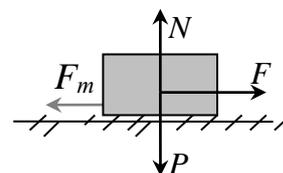


Рисунок 1.2

Французские физики Г. Амонтон и Ш. Кулон опытным путем установили следующий закон: сила трения скольжения \vec{F}_{mp} пропорциональна силе \vec{N} нормального давления, с которой одно тело действует на другое:

$$F_{mp} = fN, \quad (1.8)$$

где f – коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Найдем значение коэффициента трения. Если тело находится на наклонной плоскости с углом наклона α (рисунок 1.3), то оно приходит в движение только когда тангенциальная составляющая \vec{F} силы тяжести \vec{P} больше силы трения \vec{F}_{mp} . Следовательно, в предельном случае (начало скольжения тела)

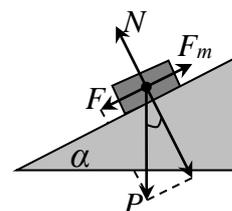


Рисунок 1.3

$$F = F_{mp}, \quad (1.9)$$

Откуда несложно заметить, что

$$f = \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (1.10)$$

Таким образом, коэффициент трения равен тангенсу угла α_0 , при котором начинается скольжение тела по наклонной плоскости.

Для гладких поверхностей определенную роль начинает играть межмолекулярное притяжение. Поэтому Б. В. Дерягиным (р. 1902) предложен закон трения скольжения

$$F_{mp} = f_{уст} (N + Sp_0), \quad (1.11)$$

p_0 – добавочное давление, обусловленное силами межмолекулярного притяжения, которые быстро уменьшаются с увеличением расстояния между частицами,

S – площадь контакта между телами,

$f_{ист}$ – истинный коэффициент трения скольжения.

Трение играет большую роль в природе и технике. Благодаря трению движется транспорт, удерживается забитый в стену гвоздь и т. д.

УКАЗАНИЯ: Выпишите формулу для второго закона Ньютона. Подставьте в нее все реальные силы, действующие на параллелепипед. Спроектируйте полученное векторное уравнение на вертикальную и горизонтальную оси. Решите систему уравнений и, разделив слева и справа на mg , найдите нормированное ускорение.

1.3 Методика и порядок измерений

Выберите «Механика» и «Движение по наклонной плоскости». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ еще раз.)

Внимательно рассмотрите рисунок 1.4, найдите все регуляторы и другие основные элементы.

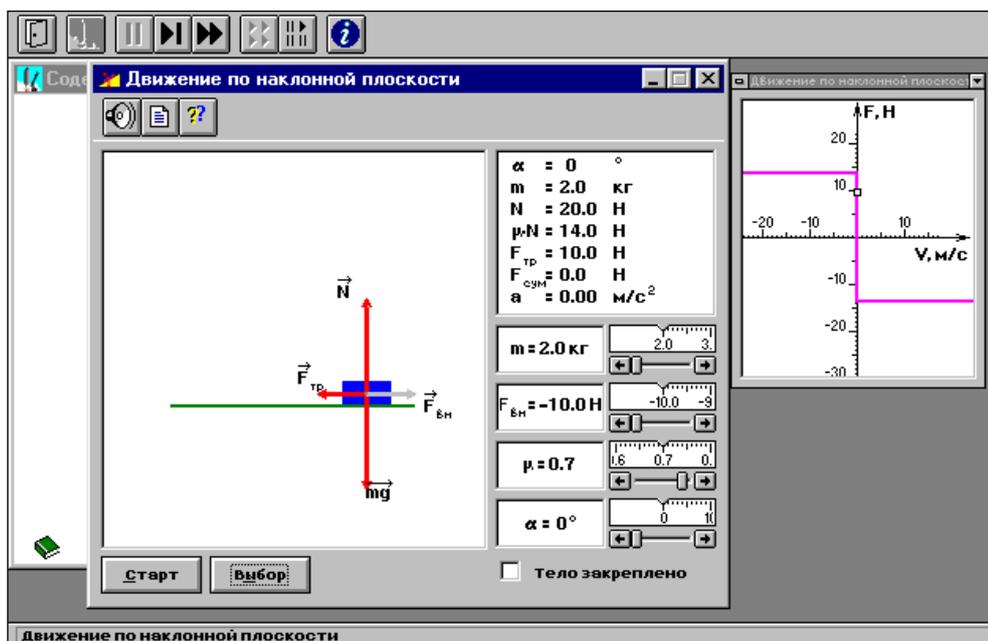


Рисунок 1.4

Зарисуйте поле движения тела с регуляторами соответствующих параметров (укажите, что они регулируют).

Щелкните мышью кнопку «Старт» в верхнем ряду кнопок.

Внимательно рассмотрите картинку на экране монитора. Нажав мышью, снимите метку около надписи «Тело закреплено». Установите с помощью движков регуляторов:

- 1) угол наклона плоскости, равный нулю;
- 2) значение внешней силы, равное нулю;
- 3) первое значение коэффициента трения, указанное в таблице 1 для вашей бригады.

Нажимая мышью на кнопку регулятора внешней силы на экране монитора, следите за движением квадратика на оси силы графика силы трения (справа сверху) и за поведением тела. Потренируйтесь, устанавливая новое значение внешней силы после завершения движения тела и снимая фиксацию (убирая метку). **Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений!**

Приступайте к измерениям, начиная с положительных малых (около 0,05 мг) значений внешней силы и изменяя ее на 0,05 мг. Выставив значение

силы, снимайте фиксацию и наблюдайте поведение параллелепипеда. Величину силы трения и ускорения определяйте по таблице вверху экрана. Результаты измерений силы трения и ускорения записывайте в таблицу 2.

Таблица 1 – Значения коэффициентов трения покоя (не перерисовывать)

Номер бригады	m , кг	μ_1	μ_2	μ_3	Номер бригады	m , кг	μ_1	μ_2	μ_3
1	2.2	0.08	0.13	0.18	5	2.9	0.05	0.10	0.15
2	2.4	0.07	0.12	0.17	6	2.7	0.06	0.11	0.16
3	2.6	0.06	0.11	0.16	7	2.5	0.07	0.12	0.17
4	3	0.05	0.10	0.15	8	2.1	0.08	0.13	0.18

Таблица 2 – Результаты измерений (количество измерений и строк – 10)

Номер измерения	$\mu_1 = \underline{\hspace{2cm}}$			$\mu_2 = \underline{\hspace{2cm}}$			$\mu_3 = \underline{\hspace{2cm}}$		
	F , Н	$F_{\text{тр}}$, Н	a , м/с ²	F , Н	$F_{\text{тр}}$, Н	a , м/с ²	F , Н	$F_{\text{тр}}$, Н	a , м/с ²
1									
2									
...									
m , кг									

1.4 Обработка результатов и оформление отчета

Постройте на одном чертеже графики зависимости силы трения от внешней силы и ускорения от внешней силы.

По наклону графика $a = f(F)$ определите значение m , используя формулу

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta a}. \quad (1.12)$$

Вычислите среднее значение m и абсолютную ошибку среднего значения m .

1.5 Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что изучает динамика?
2. Что такое масса?
3. Что такое сила, импульс?
4. Сформулируйте принцип суперпозиции сил.
5. Сформулируйте третий закон Ньютона.
6. Сформулируйте условия, при которых ускорение прямо пропорционально силе.
7. Как направлена сила трения скольжения?
8. Как направлена сила трения покоя?
9. Напишите формулу, определяющую максимальное значение силы трения покоя.

2 Лабораторная работа № 136. Соударения упругих шаров

2.1 Цель работы

- 1) Выбор физических моделей для анализа взаимодействия двух шаров при столкновении.
- 2) Исследование физических характеристик, сохраняющихся при соударениях упругих шаров.

2.2 Краткая теория

Удар (или соударение) – это столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время. При ударе в телах возникают столь значительные внутренние силы, что внешними силами, действующими на них, можно пренебречь. Это позволяет рассматривать соударяющиеся тела как замкнутую систему и применять к ней законы сохранения.

Тела во время удара претерпевают деформацию. Сущность удара заключается в том, что кинетическая энергия относительного движения соударяющихся тел на короткое время преобразуется в энергию упругой деформации. Во время удара имеет место перераспределение энергии между соударяющимися телами. Наблюдения показывают, что относительная скорость тел после удара не достигает своего прежнего значения. Это объясняется тем, что нет идеально упругих тел. Отношение нормальных составляющих относительной скорости тел после и до удара называется коэффициентом восстановления:

$$\varepsilon = v'_n / v_n. \quad (2.1)$$

Если для сталкивающихся тел $\varepsilon = 0$, то такие тела называются абсолютно неупругими, если $\varepsilon = 1$ – абсолютно упругими.

На практике для всех тел $0 < \varepsilon < 1$ (например, для стальных шаров $\varepsilon \approx 0,56$, для шаров из слоновой кости $\varepsilon \approx 0,89$, для свинца $\varepsilon \approx 0$). Однако в некоторых случаях тела можно с большой точностью рассматривать либо как абсолютно упругие, либо как абсолютно неупругие.

Прямая, проходящая через точку соприкосновения тел и нормальная к поверхности их соприкосновения, называется линией удара. Удар называется центральным, если тела до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры масс.

Абсолютно упругий удар – столкновение двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в кинетическую энергию. Для абсолютно упругого удара выполняются закон сохранения импульса и закон сохранения кинетической энергии.

Обозначим скорости шаров массами m_1 и m_2 до удара через \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , после удара – через \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 (рисунок 2.1). При прямом центральном ударе векторы скоростей шаров до и после удара лежат на прямой линии, соединяющей их центры. Проекции векторов скорости на эту линию равны модулям

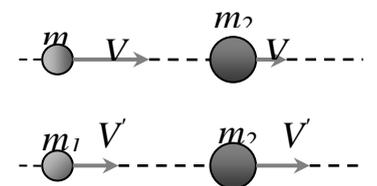


Рисунок 2.1

скоростей. Их направления учтем знаками: положительное значение припишем движению вправо, отрицательное – движению влево. В этом случае законы сохранения имеют вид

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2, \quad (2.2)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v'^2_1}{2} + \frac{m_2 v'^2_2}{2}. \quad (2.3)$$

Произведя соответствующие преобразования выражений (2.2) и (2.3), получим

$$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_2), \quad (2.4)$$

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2), \quad (2.5)$$

а разделив (2.5) на (2.4):

$$v_1 + v_1' = v_2 + v_2'. \quad (2.6)$$

Решая уравнения (2.4) и (2.6), находим

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}, \quad (2.7)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}. \quad (2.8)$$

Рассмотрим несколько примеров.

1) При $v_2 = 0$

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad (2.9)$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1. \quad (2.10)$$

Проанализируем выражения (2.9) и (2.10) для двух шаров различных масс: а) $m_1 = m_2$. Если второй шар до удара висел неподвижно ($v_2 = 0$) (рисунок 2.2), то после удара остановится первый шар ($v_1' = 0$), а второй будет двигаться с той же скоростью и в

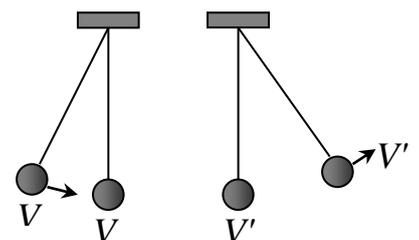


Рисунок 2.2

том же направлении, в котором

двигался первый шар до удара ($v_2' = v_1$);

б) $m_1 > m_2$. Первый шар продолжает двигаться в том же направлении, как и до удара, но с меньшей скоростью ($v_1' < v_1$). Скорость второго шара после удара больше, чем скорость первого после удара ($v_2' > v_1'$) (рисунок 2.3);

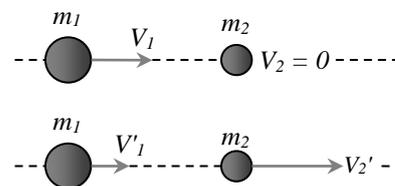


Рисунок 2.3

в) $m_1 < m_2$. Направление движения первого шара при ударе изменяется – шар отскакивает обратно. Второй шар движется в ту же сторону, в которую двигался первый шар до удара, но с меньшей скоростью ($v_2' < v_1$) (рисунок 2.4);

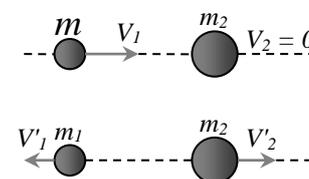


Рисунок 2.4

г) $m_1 \ll m_2$ (например, столкновение шара со стеной), тогда $v_1' \approx -v_1$, $v_2' \approx 2m_1v_1/m_2 \approx 0$.

2) При $m_1 = m_2$ $v_1' = v_2$, $v_2' = v_1$, т. е. шары равной массы «обмениваются» скоростями.

ПРИЦЕЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ d есть расстояние между линией движения первого шара и параллельной ей линией, проходящей через центр второго шара.

Законы сохранения для кинетической энергии и импульса преобразуем и получим:

$$(V_0^2 - V_1^2) = \frac{m_2}{m_1} V_2^2, \quad (2.11)$$

$$(V_0 - V_1 \cos \alpha_1) = \frac{m_2}{m_1} V_2 \cos \alpha_2, \quad (2.12)$$

$$V_1 \sin \alpha_1 = -\frac{m_2}{m_1} V_2 \sin \alpha_2. \quad (2.13)$$

Выберите «Механика» и «Соударения упругих шаров». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ еще раз).

2.3 Методика и порядок измерений

Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Рассмотрите картинку на экране. Установив прицельное расстояние $d \approx 2R$ (минимальное расстояние, при котором не наблюдается столкновения), определите радиус шаров.

Установив прицельное расстояние $0 < d < 2R$ мышью нажмите кнопку «Старт» внизу экрана и наблюдайте процесс рассеяния при столкновении. Зарисуйте с экрана поле движения и все характеристики тел. **Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

2.4 Измерения

Установите, двигая мышью движки регуляторов, массы шаров и начальную скорость первого шара (первое значение), указанные в табл. 1 для вашей бригады. Прицельное расстояние d выберите равным нулю. Нажимая мышью на кнопку «СТАРТ» на экране монитора, следите за движением шаров. Результаты измерений необходимых величин записывайте в таблицу 2.1, образец которой приведен ниже.

Измените значение прицельного расстояния d на величину $(0,2d/R$, где R – радиус шара) и повторите измерения.

Когда возможные значения d/R будут исчерпаны, увеличьте начальную скорость первого шара и повторите измерения, начиная с нулевого прицельного расстояния d . Результаты запишите в новую таблицу 2.3, аналогичную таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Массы шаров и начальные скорости (не перерисовывать).

Номер бригады	m_1 , кг	m_2 , кг	V_0 , м/с	Номер бригады	m_1 , кг	m_2 , кг	V_0 , м/с
1	1	5	4	5	1	4	6
2	2	5	4	6	2	4	6
3	3	5	4	7	3	4	6
4	4	5	4	8	4	4	6

Таблицы 2.2 и 2.3 – Результаты измерений и расчетов (количество измерений и строк – 10)

№	d/R	V_1 , м/с	V_2 , м/с	α_1 , град	α_2 , град	$V_1 \cos \alpha_1$, м/с	$V_1 \sin \alpha_1$, м/с	$V_2 \cos \alpha_2$, м/с	$V_2 \sin \alpha_2$, м/с	V^2_1 , м/с	V^2_2 , м/с
1	0										
2	0.2										
3	0.4										
4	0.6										
5	0.8										
...											

2.5 Обработка результатов и оформление отчета

- 1) Вычислите необходимые величины и заполните таблицах 2.2 и 2.3.
- 2) Постройте графики зависимостей (на трех рисунках).
- 3) разности квадратов скоростей первого шара до и после удара как функция от квадрата скорости второго шара после удара $(V_0^2 - V_1^2) = f(V_2^2)$,
- 4) разности проекций на OX скоростей первого шара до и после удара как функции от проекции на OX скорости второго шара после удара $(V_0 - V_1 \cos \alpha_1) = f(V_2 \cos \alpha_2)$,
- 5) проекции на OY скорости первого шара после удара от проекции на OY скорости второго шара после удара $V_1 \sin \alpha_1 = f(V_2 \sin \alpha_2)$.
- 6) По каждому графику определите отношение масс m_2/m_1 шаров. Вычислите среднее значение этого отношения и абсолютную ошибку среднего.
- 7) Проанализируйте и сравните измеренные и заданные значения отношения масс.

2.6 Вопросы и задания для самоконтроля

- 1) Что такое удар (столкновение)?
- 2) Для какого взаимодействия двух тел можно применять модель столкновения?
- 3) Какое столкновение называют абсолютно упругим?
- 4) При каком столкновении выполняется закон сохранения импульса?
- 5) Дайте словесную формулировку закона сохранения импульса.
- 6) При каких условиях сохраняется проекция суммарного импульса системы тел на некоторую ось?
- 7) При каком столкновении выполняется закон сохранения кинетической энергии?

- 8) Дайте словесную формулировку закона сохранения кинетической энергии.
- 9) Дайте определение кинетической энергии.
- 10) Дайте определение потенциальной энергии.
- 11) Что такое полная механическая энергия?
- 12) Что такое замкнутая система тел?
- 13) Что такое изолированная система тел?
- 14) При каком столкновении выделяется тепловая энергия?
- 15) При каком столкновении форма тел восстанавливается?
- 16) При каком столкновении форма тел не восстанавливается?
- 17) Что такое прицельное расстояние (параметр) при столкновении шаров?