

Учебно-методический комплекс дисциплины

Н.Г. Замкова,
Л.А. Кузовникова,
Е.А. Денисова,
С.В. Комогорцев

ФИЗИКА

ВИРТУАЛЬНЫЙ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ЧАСТЬ 1. МЕХАНИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
ТЕРМОДИНАМИКА



Красноярск
Изд-во КриЖТ
2010

Красноярский институт железнодорожного транспорта

Филиал ГОУ ВПО ИрГУПС в г.Красноярске

Н.Г. Замкова
Л.А. Кузовникова
Е.А. Денисова
С.В. Комогорцев

ФИЗИКА

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**ЧАСТЬ 1. МЕХАНИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
ТЕРМОДИНАМИКА**

Учебное пособие

Красноярск 2010

УДК 530.145+539.18 (076)
ББК 22.2 я 73

Виртуальный лабораторный практикум по дисциплине «Физика».
Часть 1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика / Н.Г. Замкова, Л.А. Кузовникова, Е.А. Денисова, С.В. Комогорцев. – Красноярск: Изд-во КрИЖТ, 2010. - 68 с.

Настоящее издание является частью учебно-методического комплекса по дисциплине «Физика», включающего учебную программу, конспект лекций, лабораторный практикум.

Лабораторный практикум содержит краткие теоретические сведения, методику проведения лабораторных работ с компьютерными моделями и порядок обработки результатов. Даны вопросы и задания для самоконтроля.

Материал пособия размещен в последовательности, обеспечивающей оптимальную работу студентов над выполнением лабораторных работ, которые предусмотрены учебными планами специальностей очной и заочной формы обучения специальностей: 190701 - "Организация перевозок и управление на транспорте", 270204 - "Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство", 080502 - "Экономика и управление на предприятии (железнодорожный транспорт)", 654700 - Информационные системы.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Д-р физ.-мат. наук Втюрин А.Н., зам. директора Института физики СО РАН;

Канд. техн. наук Смелый В.В., зав. кафедрой «Общепрофессиональных дисциплин» КрИЖТ.

Печатается по решению учебно-методического совета Красноярского института железнодорожного транспорта.

УДК 530.145+539.18 (076)
ББК 22.2 я 73

© Замкова Н.Г.
© Кузовникова Л.А.
© Денисова Е.А.
© Комогорцев С.В.

© Красноярский институт железнодорожного транспорта
филиал ГОУ ВПО ИрГУПС в
г.Красноярске

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ	6
1.1 ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ	9
1.2 ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	16
1.3 УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СОУДАРЕНИЯ.....	21
1.4 МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА....	26
2.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА	31
2.2 АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.....	36
2.3 ЦИКЛ КАРНО.....	42
ЛИТЕРАТУРА.....	68
НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	68

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Этап 1. Домашняя подготовка

1. Для изучения сущности физических явлений и законов, которые предстоит исследовать в лабораторной работе, необходимо внимательно просмотреть содержание конспектов лекций по теме лабораторной работы, а также учебные пособия.
2. Оформление своего персонального конспекта для допуска к ЛР (готовится заранее на листах формата А4). (см. соответствующие требования ниже).
3. Выполнение Заданий для допуска – вывод формул, решение задач.

Этап 2. Допуск к лабораторной работе.

1. Для допуска к лабораторной работе необходимо наличие персонального конспекта ЛР, выполненного Задания для допуска и результатов проведения Тестирования компьютерной модели.
2. Преподаватель допускает студента к работе, ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке) и определяет номер варианта задания..

Этап 3. Экспериментальная часть

1. Выполнение наблюдений и измерений опытов в соответствии с методическим руководством и указаниями преподавателя.
2. Заполнение таблиц измерений для отчета о проделанной работе.
3. Преподаватель проверяет таблицу измерений студента и ставит свою подпись в конспекте студента. Таблицы должны быть заполнены чернилами. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

Этап 4. Обработка полученных результатов

1. Вычисление значений расчетных величин по рабочим формулам (расчеты **подробно** записываются в отчете **после написанной формулы**).
2. Построение графиков исследуемых зависимостей. Графики должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже. Расчеты необходимых величин по графикам.
3. Написание вывода по полученным результатам.

Этап 5. Защита лабораторной работы

1. Письменные ответы на вопросы для самостоятельной работы.
2. Выполнение дополнительных заданий к лабораторной работе.
3. Предоставление полностью готового оформленного отчета о работе.
4. Собеседование с преподавателем об изученных физических явлениях и законах, полученных экспериментальных результатах (контрольные вопросы).

ПЕРВАЯ СТРАНИЦА (ОБЛОЖКА) ОТЧЕТА:

ГОУ ВПО Иркутский государственный университет путей сообщения
Красноярский институт железнодорожного транспорта

Кафедра «Общепрофессиональных дисциплин»

Лабораторная работа №__
(Название)

Выполнил:
студент группы ____
ФИО _____
Проверил:
Преподаватель
ФИО _____
Дата выполнения: ____
Дата сдачи: _____

Допуск	Измерения	Зачет

Красноярск (год)

Наиболее сложным для большинства студентов является **написание выводов** по результатам работы. Рекомендуется подходить к написанию выводов следующим образом:

1. Проанализировать *ожидаемые результаты* работы: что должно получиться по теории.
2. Проанализировать *реально полученные результаты*, указать сходства и различия теоретических и практических результатов.
3. *Обосновать* с точки зрения теории отмеченные *сходства и различия* в результатах: почему так получилось.

Г Р А Ф И К (требования):

- график должен быть построен на миллиметровой бумаге, размер не менее 1/2 листа А4,
- над графиком - полное название графика **СЛОВАМИ**,
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, индексы величин, единицы измерения, 10^N ,
- на каждой оси - **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок),
- на графике - экспериментальные и теоретические точки ярко,
- форма графика должна соответствовать теоретической зависимости (не ломаная).

Требования к оформлению персонального конспекта

Цель работы: (переписать полностью из описания).

Краткая теория (выписать основные формулы, определения, законы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).

Экспериментальная установка (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).

Таблицы (название, состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).

Оформление отчета. В отчете должны присутствовать подробные расчеты величины после написанной формулы. В расчетах указываются единицы измерения физических величин. Все расчеты ведутся в системе СИ.

Раздел 1. МЕХАНИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.1

ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Свободное падение тел». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Экспериментальное определение ускорения свободного падения на поверхности Земли.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим движение тела, брошенного со скоростью V_0 под углом α к горизонту (рис.1). Если пренебречь силой сопротивления воздуха, то на тело будет действовать только сила тяжести. Это движение можно разложить на два независимых простых движения: движение по вертикали вдоль оси Y и движение по горизонтали вдоль оси X . Участвуя одновременно в этих двух движениях, тело будет перемещаться по траектории, которую мы наблюдаем на практике.

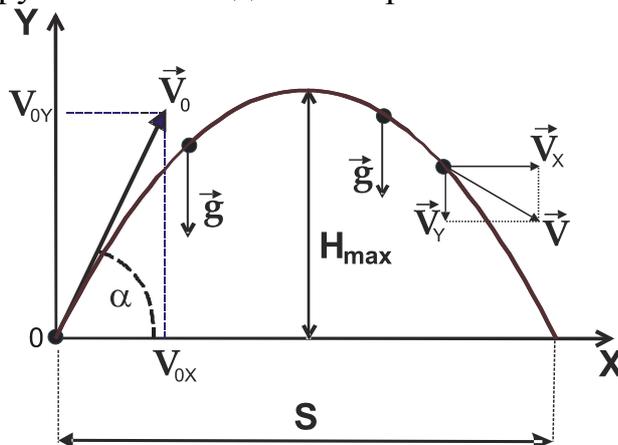


Рисунок 1.

Спроектируем вектор начальной скорости V_0 на оси координат:

$$V_{0x} = V_0 \cos \alpha$$

$$V_{0y} = V_0 \sin \alpha$$

Движение тела вдоль оси Y равнопеременное с ускорением g , которое направлено вертикально вниз.

Движение тела вдоль оси X равномерное, так как проекция ускорения свободного падения на эту ось равна нулю, а сопротивлением воздуха можно пренебречь. Поэтому скорость тела вдоль этого направления не меняется:

$$V_x = \text{const} = V_{0x}.$$

Каждое из двух движений описывается системой двух уравнений: уравнением пути и уравнением скорости.

Для движения вдоль оси Y (вверх)

$$Y = V_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$$

$$V_y = V_{0y} - gt$$

Для движения вдоль оси X

$$X = V_{0x}t$$

$$V_x = V_{0x} = \text{const}$$

1. Найдем уравнение траектории, по которой движется тело. С этой целью для уравнений X и Y исключим время t . Тогда получим уравнение

$$Y = tg\alpha \cdot X - \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot X^2 \quad (1)$$

Это уравнение параболы. Траектория движения тела - парабола.

2. Найдем время подъема t_n тела на максимальную высоту и максимальную высоту подъема H_{max} . При подъеме вверх вдоль оси Y тело уменьшает свою скорость и, достигнув максимальной высоты, останавливается. Следовательно, в верхней точке траектории вертикальная составляющая скорости обращается в нуль:

$$V_y = V_{0y} - gt_n = 0, \quad (2)$$

где t_n - время подъема тела на максимальную высоту. Отсюда

$$t_n = \frac{V_0 \sin \alpha}{g} \quad (3)$$

$$H_{max} = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (4)$$

3. Найдем дальность полета S . В силу симметрии траектории время подъема на максимальную высоту и время падения с этой высоты равны между собой. Поэтому для времени всего движения тела получаем:

$$t_{\text{полное}} = 2t_n = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} \quad (5)$$

Дальность полета S - это перемещение вдоль оси X за все время движения:

$$S = V_{0x} \cdot t = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad (6)$$

4. Скорость в любой заданный момент времени t_1 определяется по теореме Пифагора:

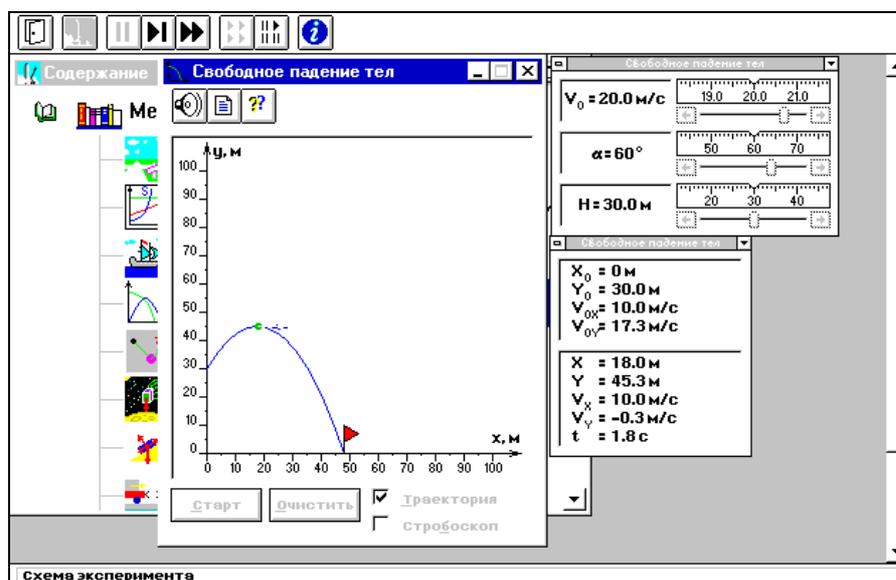
$$\vec{V} = \vec{V}_X + \vec{V}_Y \quad , \quad V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \quad (7)$$

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ДОПУСКА:

1. Выведите формулу (1) траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту.
2. Выведите формулу (4) для максимальной высоты подъема тела.
3. Получите выражение для определения ускорения свободного падения, используя формулы.

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите раздел «Механика» и «Свободное падение тел».
2. Внимательно рассмотрите картинку в средней части монитора. Найдите регуляторы с движками, задающими начальную скорость V_0 , угол бросания α и начальную высоту H . «Стробоскоп» можно включить или выключить, установив маркер мыши на квадрат с меткой и нажав (коротко) на левую кнопку мыши.



3. Подведите маркер мыши к движку регулятора высоты, нажмите и, удерживая левую кнопку мыши, двигайте мышь вправо. Движок регулятора будет двигаться за маркером мыши. Таким способом установите любое значение высоты. Тем же методом, зацепив мышью и двигая движок регулятора или щелкая мышью по стрелке на движке, установите любое значение угла бросания, а затем начальную скорость. Нажмите на кнопку «Старт». Наблюдайте траекторию движения брошенного тела.

4. Для того, чтобы проводить измерения, тело должно двигаться пошагово (на небольшое расстояние при нажатии кнопки мыши). Для этого на мониторе щелкните мышью кнопку «|» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера. Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверху окна и наблюдайте за движением тела. Чтобы тело продолжило свободное движение, нажмите кнопку «▶▶».

5. Внимательно рассмотрите нижнее окно справа от рисунка. Определите, каким величинам соответствуют значения X_0 , Y_0 , V_{0X} , V_{0Y} , а также X , Y , V_X , V_Y , t .

6. **Протестируйте модель** и убедитесь, что модель работает в соответствии с формулами, описывающими движение тела, брошенного под углом α к горизонту. Для этого следует выбрать те значения параметров модели, для которых результат поведения модели является известным или легко просчитывается. Например, вы можете использовать значения параметров, приведенные в таблице ниже.

Таблица для тестирования модели.

№ п	Кинематическая характеристика	Формула для расчета	Характерные точки	Расчетное значение	Результат моделирования
1.	Время полета	$t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}$,	$\alpha = 90^\circ$ $y_0 = 0 \text{ м}$ $V_0 = 10 \text{ м/с}$	$t =$	$t =$
2.	Дальность полета	$S = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}$,	$y_0 = 0 \text{ м}$ $V_0 = 20 \text{ м/с}$ $\alpha_1 = 30^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$	$S_1 =$ $S_2 =$	$S_1 =$ $S_2 =$
3.	Максимальная высота подъема	$h = y_0 + \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$	$V_0 = 20 \text{ м/с}$ $y_0 = 0 \text{ м}$ $\alpha = 90^\circ$	$h_1 =$	$h_1 =$
			$V_0 = 20 \text{ м/с}$ $y_0 = 10 \text{ м}$ $\alpha = 90^\circ$	$h_2 =$	$h_2 =$

7. Убедитесь, что при движении тела:

- горизонтальная составляющая скорости V_X остается постоянной,
- вертикальная составляющая скорости V_Y меняется,
- вертикальная составляющая скорости V_Y на одной и той же высоте при движении вверх и на обратном пути (движение вниз) имеет одну и ту же величину. Запишите результаты наблюдений в отчет по работе.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.
Приступайте к измерениям.

8. Установите начальные параметры траектории, соответствующие номеру вашего варианта (таблица 1). Установите первое значение скорости бросания V_0 из таблицы 2.

9. Чтобы измерить максимальную высоту подъема тела для этой траектории, на мониторе щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите клавишу пробела на клавиатуре компьютера. Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверху окна и, когда тело будет в верхней точке траектории (вертикальная компонента скорости V_y должна быть равна нулю), запишите результаты измерений координаты максимальной высоты подъема Y_{MAX} в таблицу 2. Нажмите кнопку «▶▶».

10. Установите начальную скорость движения тела для следующей траектории, которая указана в таблице 2.

11. Проведите измерения Y_{MAX} для этой траектории по пункту 9.

12. Повторите действия по пунктам 10 и 11

Таблица 1. Начальные параметры траекторий .

Номер варианта	Начальная высота H_0 (м)	Начальный угол α_0 (град)	Номер варианта	Начальная высота H_0 (м)	Начальный угол α_0 (град)
1	10	60	9	5	45
2	30	25	10	15	40
3	50	30	11	25	50
4	60	35	12	35	55
5	10	45	13	40	30
6	0	70	14	45	35
7	20	75	15	50	60
8	40	63	16	55	50

Таблица 2. Результаты измерений

	V_0 , м/с	V_0^2 , м ² /с ²	Y_{MAX} , м
1	15		
2	17		
3	18		
4	19		
5	20		
6	21		
7	22		
8	23		
9	24		
10	25		

13. По данным таблицы 2 постройте график зависимости значений вертикальной координаты точки максимального подъема Y_{MAX} (по оси Y) от квадрата начальной скорости V_0^2 (по оси X).

14. Определите по наклону графика значение ускорения свободного падения g , используя формулу, полученную в задании для допуска

$$g = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha) \cdot \frac{\Delta(V_0^2)}{\Delta(Y_{\max})}$$

15. Сравните полученное значение с теоретическим. Сделайте вывод.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называется механическим движением? Что называется поступательным и вращательным движением?
2. Что такое система отсчета? Назовите составляющие системы отсчета.
3. Что такое радиус-вектор точки?
4. Дайте определения основных кинематических характеристик движения. Какие из них являются векторными величинами?
5. Что называется средним и мгновенным вектором скорости точки? Что называется средним и мгновенным вектором ускорения точки? Как направлены эти вектора?
6. Запишите кинематические уравнения равномерного и равнопеременного движения.
7. Как определить путь, пройденный телом при неравномерном движении?
8. Что характеризуют нормальное и тангенциальное ускорения? Как разложить вектор полного ускорения на нормальную и тангенциальную составляющие?
9. Дайте определения кинематических характеристик вращательного движения.
10. Как направлен вектор элементарного углового перемещения? Как определить направление угловой скорости и углового ускорения?
11. Как связаны между собой линейные и угловые величины?

Выполните следующие дополнительные задания:

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1. Уравнения движения материальной точки имеют вид $x(t) = A + Bt$ и $y(t) = C + Dt - Et^2$, где A, B, C, D, E – коэффициенты, которые задаются для каждого варианта. Время $t_1=0$ с, $t_2=5$ с, $t=3$ с.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A (м)	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1
B (м/с)	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
C (м)	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3	2	1	1	2	3	3
D (м/с)	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	7
E (м/с²)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

1) Построить траекторию в координатах XU . Для построения траектории необходимо определить значения X и U из уравнений движения в интервале времени от $t_1=0c$ до $t_2=5c$ (рекомендуется через 0,5 c) и полученные результаты занести в таблицу.

2) Определить аналитически (по формуле) перемещение $\Delta \vec{r}$ в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$ и указать его на графике траектории.

3) Определить величину мгновенной скорости $|\vec{V}|$ в заданный момент времени t и обозначить ее направление на графике в произвольном масштабе.

4) Определить величину полного ускорения a в заданный момент времени t и обозначить его направление на графике в произвольном масштабе.

5) Определить величину тангенциального a_τ и нормального a_n ускорения в заданный момент времени t и обозначить их направления на графике в произвольном масштабе.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 2. Уравнение вращательного движения тела имеет вид: $\varphi(t) = At + Bt^2 - Ct^3$, где коэффициенты A, B, C задаются для каждого варианта. Время $t_1=0c$, $t_2=3,5c$.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A (рад/с)	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,0	2,5
B (рад/с²)	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5	6,5	6,5
C (рад/с³)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,8

1) Построить график $\varphi = \varphi(t)$, т.е. зависимость угла φ от времени t в интервале времени от t_1 до t_2 .

2) Определить аналитически угловую скорость ω .

3) Построить график $\omega = \omega(t)$ в интервале времени от t_1 до t_2 .

4) Определить аналитически угловое ускорение β .

5) Построить график $\beta = \beta(t)$ в интервале времени от t_1 до t_2 .

♦ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ:

1. На мотоцикле совершается прыжок через 10 установленных в ряд автобусов. Длина ряда 40 м. До какой скорости должен разогнаться мотоциклист, чтобы при прыжке под углом в 45° выполнить этот прыжок? Смоделируйте ситуацию в виртуальном эксперименте.

2. Винни-Пух висит на воздушном шарике на высоте H над землей. На расстоянии L от того места, куда он мог бы упасть находится Пятачок, готовящийся выстрелить в Винни-Пуха. В момент выстрела медвежонок отпускает шарик и начинает практически свободно падать (сопротивление воздуха мало). В каком направлении следует целиться Пятачку и с какой скоростью должна вылететь пробка из его ружья для того, чтобы она попала в медвежонок раньше, чем тот упадет на землю?

3. Под каким углом следует выпустить снаряд с заданной начальной скоростью V из орудия, для того, чтобы поразить расположенную на том же уровне мишень, удаленную от орудия на расстояние L ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2
**ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Движение тела по наклонной плоскости». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Экспериментальная проверка закона сохранения механической энергии в консервативных и диссипативных системах.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ **Масса** m (кг) – мера инертности тел при поступательном движении.

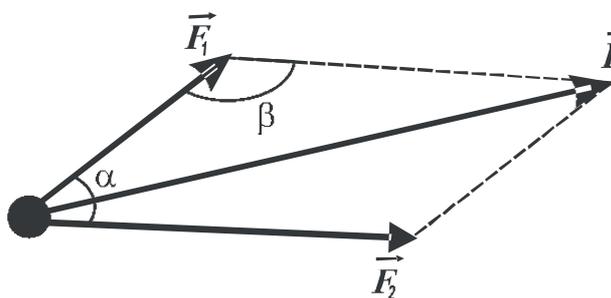
♦ **Плотность** $\rho = m/V$ (кг/ м³) – масса в единице объема. V – объем тела.

♦ **Сила** \vec{F} (Ньютон) – векторная величина, является мерой взаимодействия тел.

♦ **Сложение сил**: если на тело действуют несколько сил, то их можно заменять равнодействующей силой \vec{F} , равной их векторной сумме:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i .$$

Например, если на тело действуют две силы, то результирующую силу можно найти по правилу параллелограмма (по теореме косинусов).



$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha$$

♦ **Импульс** \vec{p} (кг·м/с²) – векторная величина, равная произведению массы тела m на его скорость \vec{V} :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{V} .$$

♦ **Основной закон динамики** - это второй закон Ньютона:

Скорость изменения импульса тела \vec{p} равна действующей на него силе \vec{F} :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

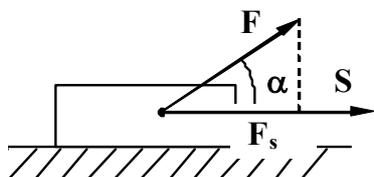
Если масса тела постоянна, то

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Ускорение \vec{a} , приобретаемое телом под действием постоянной силы \vec{F} , прямо пропорционально этой силе, обратно пропорционально массе тела m и направлено так же, как и сила \vec{F} .

♦ **Работа силы** A (Дж) – физическая величина, используемая для характеристики действия силы, в результате которого совершается перемещение тела.

Работой постоянной силы называется скалярная величина, равная произведению модуля вектора силы на модуль вектора перемещения и на косинус угла между направлением силы и направлением перемещения:



$$A = \vec{F} \cdot \vec{S} = F \cdot S \cdot \cos \alpha = F_s \cdot S$$

Это выражение справедливо, если величина проекции силы на направление перемещения постоянна:

$$F_s = F \cdot \cos \alpha = \text{const.}$$

Если на тело действует несколько сил, каждая из которых совершает над ним работу, то вся произведённая работа равна алгебраической сумме работ отдельных сил:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i$$

♦ **Энергией** называется физическая величина, характеризующая способность тела или системы тел совершать работу.

Изменение энергии связано с совершением работы. Работа есть мера изменения энергии. Энергия имеет такую же размерность, как и работа - Джоуль.

Часть энергии тела, соответствующую механическим формам движения материи, называют *механической* энергией. Её принято делить на *кинетическую* и *потенциальную*.

♦ **Кинетическая энергия** W_k - это энергия движущегося тела

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Теорема о кинетической энергии: Работа результирующей всех сил, действующих на тело, идет на приращение кинетической энергии тела:

$$A_{рез} = \Delta W_{кин} = W_{кин, кон} - W_{кин, нач}$$

♦ **Потенциальная энергия** W_n – часть механической энергии, обусловленная взаимным расположением тел (или частей тела) и силами взаимодействия их друг с другом. Потенциальную энергию можно определить только в случае, когда силы взаимодействия являются консервативными. Единой формулы для вычисления потенциальной энергии нет, выражение для вычисления потенциальной энергии определяется видом взаимодействия.

♦ **Консервативными (или потенциальными) силами** называются силы, РАБОТА которых не зависит от траектории движения тела, а определяется только начальным и конечным положениями тела. Если работа силы зависит от траектории перемещения тела из одной точки в другую, то такая сила называется **диссипативной** или **неконсервативной**. Следует заметить, что работа консервативных сил по перемещению точки осуществляется за счет убыли ее потенциальной энергии.

Теорема о потенциальной энергии: Работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы.

$$A_{конс} = -\Delta W_{пот} = W_{пот, нач} - W_{пот, кон}$$

♦ **Полная механическая энергия** системы тел равна арифметической сумме кинетических и потенциальных энергий всех тел, входящих в данную систему:

$$W_{мех} = \sum W_k + \sum W_n.$$

♦ **Система называется замкнутой**, если на нее не действуют внешние силы, т.е. $\vec{F}_{внешн.} = \mathbf{0}$. Второй закон Ньютона для замкнутой системы принимает вид:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \mathbf{0} \quad . \quad \text{Тогда} \quad \vec{p} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{V}_i = const$$

♦ **Закон сохранения импульса:** Импульс замкнутой системы не меняется с течением времени.

Если в замкнутой системе тел действуют только консервативные силы, то механическая энергия такой системы не меняется с течением времени.

♦ **Закон сохранения механической энергии:** в системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется.

$$W_{\text{мех}} = \text{const.}$$

Если в системе кроме консервативных сил действуют другие силы, то изменение полной механической энергии равно работе этих сил:

$$W_{\text{мех}2} - W_{\text{мех}1} = \sum A . \quad (*)$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

Получите расчетные формулы для выполнения лабораторной работы при решении следующей задачи.

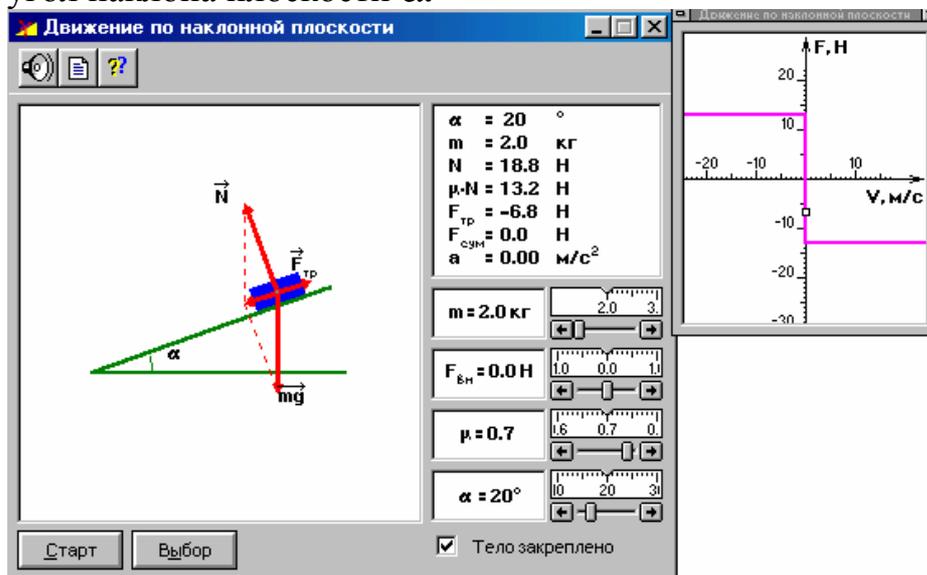
Тело массой m соскальзывает с наклонной плоскости за время t . На тело действует внешняя сила $F_{\text{вн}}$, направленная параллельно наклонной плоскости в направлении движения. Коэффициент трения тела о плоскость μ . Угол наклона плоскости α .

Нарисуйте рисунок. Укажите все силы, нужные углы. Определите:

- Ускорение тела
- Скорость тела в конце плоскости
- Длину наклонной плоскости
- Кинетическую энергию тела, в конце наклонной плоскости
- Потенциальную энергию тела в верхней точке плоскости
- Работу силы трения на участке спуска
- Работу внешней силы на участке спуска

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Движение тела по наклонной плоскости».
2. Внимательно рассмотрите окно опыта. Найдите регуляторы с движками, задающими массу тела m , внешнюю силу $F_{\text{вн}}$, коэффициент трения μ и угол наклона плоскости α .



3. **Протестируйте модель.** Для этого убедитесь, что модель работает в соответствии с формулами, описывающими движение тела, соскальзывающего с наклонной плоскости под действием силы тяжести. Для этого выберите следующие значения параметров модели:

- масса тела $m=2\text{кг}$,
- угол наклона плоскости $\alpha=30^\circ$,
- внешняя сила $F_{\text{вн}}=0$
- коэффициент трения $\mu=0$.

4. Рассчитайте ускорение тела, используя формулу, полученную в задании для допуска. Сравните рассчитанное ускорение с модельным, указанным в верхнем окошке справа. Запишите в отчете.

5. Измерьте время, за которое тело соскользнет с плоскости с помощью личного секундомера. Для этого снимите закрепление, нажмите кнопку СТАРТ, и включите секундомер, когда плоскость поднимется и погаснут красные стрелки сил. Выключите секундомер, когда тело будет в конце наклонной плоскости. Проведите измерение времени не менее трех раз, рассчитайте среднее.

6. Рассчитайте потенциальную энергию тела в начале наклонной плоскости и кинетическую в конце. Убедитесь, что при данном выборе параметров полная механическая энергия тела не меняется. Объясните почему.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.
 Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 1. Исходные параметры опыта (не перерисовывать)

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$m, \text{кг}$	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	2,9	2,7
$F_{\text{вн}}, \text{Н}$	-4	-3	-2	-1	1.5	2	3	4
$\alpha_1, \text{град}$	35	30	25	30	20	20	22	17
$\alpha_2, \text{град}$	45	40	35	35	25	30	32	25
$\alpha_3, \text{град}$	55	50	40	40	30	40	42	28
μ_1	0.10	0.12	0.14	0.12	0.06	0.20	0.14	0.08
μ_2	0.15	0.18	0.20	0.17	0.16	0.25	0.24	0.23
μ_3	0.20	0.22	0.24	0.23	0.26	0.30	0.30	0.30
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
$m, \text{кг}$	2,1	2,3	2,5	2,7	2,0	2,2	2,4	2,6
$F_{\text{вн}}, \text{Н}$	-3.5	-2.5	-1.5	-0.5	0.5	1.5	2.5	3.5
$\alpha_1, \text{град}$	37	32	28	25	17	12	18	15
$\alpha_2, \text{град}$	47	42	38	30	27	25	25	25
$\alpha_3, \text{град}$	57	52	45	40	35	30	28	35
μ_1	0.09	0.11	0.15	0.13	0.06	0.08	0.04	0.22
μ_2	0.14	0.21	0.25	0.23	0.16	0.22	0.14	0.24
μ_3	0.19	0.26	0.3	0.29	0.26	0.32	0.25	0.28

7. Установите значения массы тела m , угла наклона плоскости α_1 , внешней силы $F_{вн}$ и коэффициента трения μ_1 , соответствующие Вашему варианту (таблица 1). Зарисуйте рисунок и отметьте силы, действующие на тело.

8. Измерьте время t , за которое тело соскользнет с плоскости. Для этого снимите закрепление, нажмите кнопку СТАРТ, и включите секундомер, когда плоскость поднимется и погаснут стрелки сил. Выключите секундомер в момент остановки тела в конце наклонной плоскости. Запишите в таблицу 2 значение ускорения тела и время, за которое тело съехало с наклонной плоскости. Измерение времени проводите в каждом опыте не менее трех раз. В таблицу записывайте среднее значение.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчётов

№ изм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\alpha_1=$			$\alpha_2=$			$\alpha_3=$		
	$\mu_1=$	$\mu_2=$	$\mu_3=$	$\mu_1=$	$\mu_2=$	$\mu_3=$	$\mu_1=$	$\mu_2=$	$\mu_3=$
$a, \text{ м/с}^2$									
$t, \text{ с}$									
$v, \text{ м/с}$									
$S, \text{ м}$									
$W_{к}, \text{ Дж}$									
$W_{п}, \text{ Дж}$									
$A_{тр}, \text{ Дж}$									
$A_{вн}, \text{ Дж}$									
$W_{мех2} - W_{мех1}$									
$\sum A$									

9. Прделайте этот опыт для данного угла наклона α_1 с другими коэффициентами трения μ_2 и μ_3 вашего варианта. Результаты измерения времени соскальзывания тела с наклонной плоскости и ускорения тела запишите в таблицу 2.

10. Прделайте также этот опыт для других углов наклона α_2 и α_3 с различными коэффициентами трения (таблица 1). Результаты измерения времени соскальзывания тела с наклонной плоскости и ускорения тела запишите в таблицу 2.

11. Вычислите по формулам, полученным в задании для допуска:

а) скорость тела в конце наклонной плоскости v ;

б) длину наклонной плоскости S ;

в) кинетическую энергию тела в конце наклонной плоскости $W_{к}$;

г) потенциальную энергию тела в верхней точке наклонной плоскости $W_{п}$;

д) работу силы трения на участке спуска $A_{тр}$;

е) работу внешней силы на участке спуска $A_{вн}$.

Запишите эти значения в соответствующие строки таблицы 2.

12. По формуле (*) (см. Краткая теория) проверьте выполнение закона сохранения механической энергии при движении тела по наклонной плоскости. Сделайте выводы.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что называют массой? В чем заключается свойство аддитивности массы?
2. Что называют силой? Является ли сила причиной движения?
3. Что называют равнодействующей нескольких сил? Как найти и рассчитать равнодействующую силу? Нарисуйте.
4. Что называется импульсом материальной точки? Системы материальных точек?
5. Сформулируйте второй закон Ньютона.
6. Запишите и сформулируйте закон сохранения импульса системы тел. В каких системах выполняется закон сохранения импульса? Почему?
7. Что называется элементарной работой?
8. Как рассчитать работу постоянной и переменной силы?
9. Какие силы называются консервативными? Неконсервативными? Приведите примеры.
10. Что называется кинетической энергией тела, системы тел?
11. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.
12. Что называется потенциальной энергией системы тел? Какова связь изменения потенциальной энергии системы с работой сил?
13. Запишите и сформулируйте закон сохранения энергии в механике. В каких системах сохраняется механическая энергия?
14. Товарный вагон, движущийся с небольшой скоростью, сталкивается с другим вагоном и останавливается. При этом пружина буфера сжимается. Какие преобразования энергии происходят в этом процессе?

Выполните следующее дополнительное задание:

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1. На материальную точку массой m действуют две консервативные силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , направленные под углом α друг к другу. Начальная скорость \vec{V}_0 точки направлена по результирующей силе. Числовые значения массы, сил, начальной скорости и угла между силами для каждого варианта приведены в таблице ниже. Время $t_0 = 0$ с, $t_1 = 2$ с.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$F_1(\text{Н}) =$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7	8
$F_2(\text{Н}) =$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	7	8	9	10	11	12
$V_0(\text{м/с}) =$	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	2	3	4	6	7	8
$m(\text{кг}) =$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
α , град	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90

Определите:

- 1) ускорение a материальной точки;
- 2) скорость и координату материальной точки в заданные моменты времени t_0 и t_1 ;
- 3) величину импульса материальной точки \vec{p} в моменты времени t_0 и t_1 . Проверить выполнение основного закона динамики;
- 4) работу A результирующей силы в интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по формуле механической работы;
- 5) величину кинетической энергии материальной точки в моменты времени t_0 и t_1 ;
- 6) работу A результирующей силы в заданном интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по теореме о кинетической энергии;
- 7) величину потенциальной энергии U_1 в момент времени t_1 , приняв начальную потенциальную энергию U_0 при $t_0=0$ равной нулю;
- 8) механическую энергию материальной точки в моменты времени t_0 и t_1 . Проверить выполнение закона сохранения механической энергии.

◆ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ:

1. В Санкт-Петербургском метрополитене пути проложены так, что на первой части перегона поезда совершают небольшой спуск, а на второй части — подъем. Какое превращение механической энергии из одного вида в другой происходит на первой части перегона, на второй? Почему здесь возможна экономия электроэнергии?
2. Как изменится движение пули, если на ее пути встретится доска, которую она пробивает? Сохранится ли при этом неизменной кинетическая энергия пули? Не противоречит ли закону сохранения энергии изменение кинетической энергии при пробивании пулей доски?
3. Объясните, переход каких видов механической энергии происходит в детской игрушке «воздушный пистолет», стреляющей шариками от настольного тенниса.
4. Когда автомобиль больше расходует горючего: при езде без остановки или с остановками? Объясните почему.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.3

УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СОУДАРЕНИЯ

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Упругие и неупругие соударения». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать закономерности изменения энергии физических тел при столкновениях на примере моделей абсолютно упругого и абсолютно неупругого центрального удара.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ **Удар** (или **столкновение**)- это кратковременное взаимодействие тел, в результате которого их скорости испытывают значительные изменения. Силы взаимодействия при этом так велики, что внешними силами можно пренебречь и рассматривать соударяющиеся тела как замкнутую систему.

♦ **Система** называется **замкнутой**, если на нее не действуют внешние силы, т.е. $\vec{F}_{\text{внешн.}} = \mathbf{0}$.

♦ **Импульс тела** \vec{p} (кг·м/с²) – векторная величина, равная произведению массы тела m на его скорость \vec{V} :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{V} .$$

♦ **Импульс системы N тел** с массами m_i и скоростями \vec{V}_i равен векторной сумме импульсов отдельных тел, входящих в эту систему.

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots = \sum_{i=1}^N m_i \vec{V}_i$$

♦ **Закон сохранения импульса**: Импульс замкнутой системы тел не меняется с течением времени.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{V}_i = \text{const}$$

♦ **Закон сохранения механической энергии**: в замкнутой системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, то есть не меняется с течением времени.

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \text{const}.$$

Закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса позволяют находить решения механических задач в тех случаях, когда действующие силы неизвестны. Примером такого рода задач является ударное взаимодействие тел. С ударным взаимодействием тел нередко приходится иметь дело в обыденной жизни, в технике и в физике (в частности, в физике атома и элементарных частиц).

Во время столкновения тел между ними действуют кратковременные ударные силы. Определить величину этих сил, как правило, очень сложно. Поэтому сложно описывать ударное взаимодействие с помощью законов Ньютона. Применение законов сохранения энергии и импульса во многих случаях позволяет исключить из рассмотрения сам процесс столкновения и получить прямую связь между скоростями тел до и после столкновения, минуя все промежуточные значения сил, импульсов и энергий.

При ударе всегда выполняется закон сохранения импульса. Предполагается, что за время удара действием внешних сил можно пренебречь и считать систему замкнутой.

Закон сохранения механической энергии при ударе может не выполняться. При соударении тел они в большей либо меньшей мере деформируются. При этом кинетическая энергия тел частично или полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации (пластические деформации, механические разрушения) и во внутреннюю энергию тел. Увеличение внутренней энергии приводит к нагреванию тел.

♦ **Центральным ударом** называют соударение, при котором скорости тел до и после удара направлены по линии соединяющей центры масс тел.

Рассмотрим два предельных вида соударения - абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары.

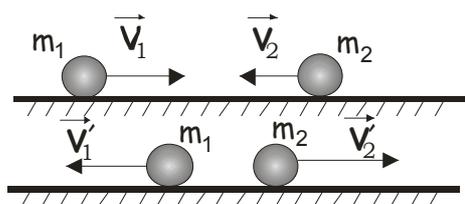


Рисунок 1

♦ **Абсолютно упругий удар** - столкновение тел, после которого форма и размеры сталкивающихся тел полностью восстанавливаются. Выполняется закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

Это такой удар, при котором полная механическая энергия тел сохраняется.

Сначала кинетическая энергия частично или полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкиваясь друг от друга. Потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую и тела разлетаются со скоростями, которые можно определить из законов сохранения суммарного импульса и суммарной энергии тел.

Обозначим массы шаров m_1 и m_2 , скорости шаров до удара \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , скорости шаров после удара \vec{v}_1' и \vec{v}_2'

тело	до столкновения			после столкновения		
	скорость	импульс	энергия	скорость	импульс	энергия
1-е	\vec{v}_1	$\vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1$	$E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}$	\vec{v}'_1	$\vec{p}'_1 = m_1 \vec{v}'_1$	$E'_1 = \frac{m_1 (\vec{v}'_1)^2}{2}$
2-е	\vec{v}_2	$\vec{p}_2 = m_2 \vec{v}_2$	$E_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2}$	\vec{v}'_2	$\vec{p}'_2 = m_2 \vec{v}'_2$	$E'_2 = \frac{m_2 (\vec{v}'_2)^2}{2}$

Закон сохранения импульса в векторном виде для абсолютно упругого удара:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 \quad (1)$$

Закон сохранения механической энергии:

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 \quad (2)$$

или

$$\begin{cases} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 (v'_1)^2}{2} + \frac{m_2 (v'_2)^2}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Мы получили систему из двух уравнений. Эту систему можно решить и найти скорости \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 тел после столкновения. Таким образом, пользуясь законами сохранения механической энергии и импульса, можно определить скорости тел после столкновения, если известны их скорости и массы до столкновения.

♦ **Абсолютно неупругий удар** - столкновение двух тел, после которого форма и размеры тел не восстанавливаются, в результате столкновения тела объединяются и движутся как одно целое с единой скоростью \vec{V} , единым импульсом

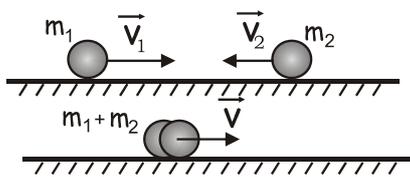


Рисунок 2

и единой энергией

$$\vec{p}_{общ} = (m_1 + m_2) \vec{V} \quad \text{и} \quad \text{единой энергией}$$

$$E_{общ} = \frac{(m_1 + m_2) V^2}{2}.$$

При абсолютно неупругом ударе выполняется только закон сохранения импульса. Механическая энергия при таком ударе частично или полностью превращается во внутреннюю энергию тел ΔU , поэтому суммарная кинетическая энергия тел после столкновения становится меньше.

Закон сохранения импульса в векторном виде для абсолютно неупругого удара:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_{общ} \quad (4)$$

Закон сохранения энергии:

$$E_1 + E_2 = E_{общ} + \Delta U \quad (5)$$

или

$$\begin{cases} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{V} \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) V^2}{2} + \Delta U \end{cases} \quad (6)$$

При движении двух тел вдоль одной оси X (рис.1) величины векторов скоростей совпадают с абсолютными величинами проекций векторов на эту ось. Решая совместно уравнения (6) и (8) для модели абсолютно неупругого удара, можно выразить величину потерь механической энергии (то есть какая часть механической энергии перешла во внутреннюю энергию ΔU) только через массы и скорости тел до столкновения:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{m_1 (m_1 + m_2) v_1^2 + m_2 (m_1 + m_2) v_2^2 - (m_1 v_1 + m_2 v_2)^2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

Доля механической энергии δ , перешедшей во внутреннюю энергию ΔU :

$$\delta = \frac{\Delta U}{E_1 + E_2} = 1 - \frac{E_{общ}}{E_1 + E_2} \quad (8)$$

Если $\alpha = \frac{v_2}{v_1}$ - это отношение скоростей сталкивающихся тел до удара, а

$\beta = \frac{m_1}{m_2}$ - отношение масс сталкивающихся тел, то

$$\delta = 1 - \frac{(\beta + \alpha)^2}{(\beta + 1)(\beta + \alpha^2)} \quad (9)$$

В данной работе закономерности изменения энергии физических тел при столкновениях исследуются на примере моделей абсолютно упругого и абсолютно неупругого центрального удара двух тел.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

1. Два шара массами m_1 и m_2 испытывают абсолютно упругое столкновение. Скорости шаров до удара \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , соответственно. Решите систему уравнений (3) и определите скорости шаров после удара для случаев:

а) шары движутся навстречу друг другу;

б) первый шар догоняет второй.

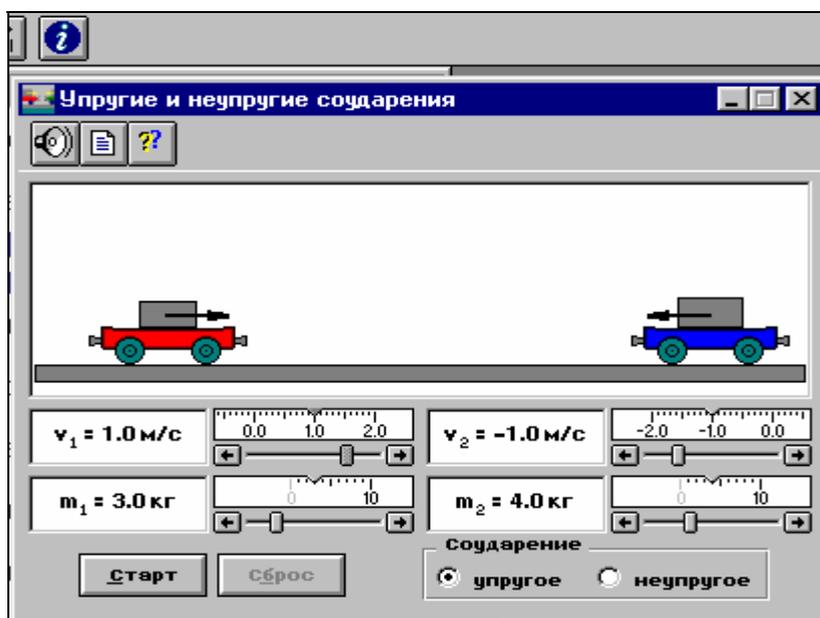
2. Два шара массами m_1 и m_2 испытывают абсолютно неупругое столкновение. Шары движутся навстречу друг другу. Скорости шаров до удара

\vec{v}_1 и \vec{v}_2 , соответственно. Определите, какая часть механической энергии перешла во внутреннюю энергию для случаев:

- шары имеют одинаковые массы $m_1 = m_2$ ($\beta = 1$);
 - шары имеют одинаковые по модулю скорости $|v_1| = |v_2|$ ($\alpha = 1$);
 - шары имеют одинаковые по модулю импульсы $|m_1 v_1| = |m_2 v_2|$ ($\beta = -\alpha$).
- Что произойдет с шарами после удара в последнем случае?

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

- Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Упругие и неупругие соударения».
- Внимательно рассмотрите окно опыта, найдите все регуляторы и другие основные элементы.



- Протестируйте модель. Включите кнопку «Упругое» справа внизу. Установите произвольные значения масс и скоростей тележек. Занесите их в таблицу 1. Рассчитайте значения импульсов и кинетических энергий тележек до столкновения. Занесите в таблицу 1 (убедитесь, что полученные вами значения совпадают с компьютерными).
- По формулам, полученным в задании для допуска, рассчитайте скорости тележек после столкновения. Получите величины импульсов и кинетических энергий тележек после столкновения. Занесите их в таблицу 1.
- Нажмите кнопку "Старт". Запишите в таблицу 1 значения модельных скоростей, импульсов и кинетических энергий тележек после столкновения.

Таблица 1. Тестирование модели (абсолютно упругий удар)

	ДО СТОЛКНОВЕНИЯ	ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ
--	-----------------	--------------------

	скорость	импульс	энергия		скорость	импульс	энергия
$m_1=$				расчет			
				модель			
$m_2=$				расчет			
				модель			

6. Проверьте законы сохранения импульса и механической энергии при абсолютно упругом ударе.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.
Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 2. Исходные параметры опыта

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
v_1 , м/с	1.4	1.2	1.6	1.3	1.3	1.0	1.5	0.9
v_2 , м/с	-0.6	-1.7	-0.6	-1.0	-1.2	-2.0	-1.5	-1.8
Вариант	9	10	11	12	13	14	15	16
v_1 , м/с	1.0	0.5	1.2	1.6	1.3	1.3	1.0	1.4
v_2 , м/с	-1.5	-2.0	-1.0	-1.8	-1.6	-0.9	-1.0	-1.2

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерений и расчетов для абсолютно упругого удара.

№	$m_1 = 1 \text{ кг}; \quad v_1 = \underline{\hspace{2cm}}; \quad v_2 = \underline{\hspace{2cm}}.$						
	m_2 , кг	До столкновения			После столкновения		
		E_1 , Дж	E_2 , Дж	$E_1 + E_2$, Дж	E'_1 , Дж	E'_2 , Дж	$E'_1 + E'_2$, Дж
1	1						
2	3						
3	5						
4	7						
5	9						

ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование АБСОЛЮТНО УПРУГОГО центрального удара.

- Включите кнопку «Упругий» справа внизу.
- Установите, нажимая мышью на кнопки регуляторов, значение массы первой тележки $m_1 = 1 \text{ кг}$ и значения начальных скоростей тележек v_1 и v_2 в соответствии с вашим вариантом (таблица 2). Масса второй тележки m_2 выбирается в процессе измерений из табл.3 .

8. Установите первое значение массы второй тележки. Запишите в таблицу 3 величины кинетических энергий тележек до столкновения. Рассчитайте их сумму.
9. Нажмите мышью на кнопку «СТАРТ» в окне опыта и следите за движением тележек. После первого столкновения остановите движение тележек кнопкой «СТОП». Запишите в таблицу 2 величины кинетических энергий тележек после столкновения. Рассчитайте их сумму.
10. Проведите измерения кинетических энергий тележек до и после столкновений для других значений массы второй тележки из табл.3.
11. Постройте график зависимости $E'_1 + E'_2$ от величины $E_1 + E_2$.
12. Сделайте вывод по графику.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Исследование АБСОЛЮТНО НЕУПРУГОГО центрального удара.

ТАБЛИЦА 4. Результаты измерений и расчетов для абсолютно неупругого удара.

№	$v_1 = \underline{\hspace{2cm}}$; $v_2 = \underline{\hspace{2cm}}$; $\alpha = \underline{\hspace{2cm}}$.						
	$m_1, \text{ кг}$	$m_2, \text{ кг}$	До столкновения		После столкновения $E_{\text{общ}} = E'_1 + E'_2, \text{ Дж}$	β	δ
			$E_1, \text{ Дж}$	$E_2, \text{ Дж}$			
1	1	1					
2	2	1					
3	4	1					
4	6	1					
5	8	1					
6	10	1					
7	1	2					
8	1	4					
9	1	10					

13. Нажмите кнопку «Неупругий» справа внизу.
14. Начальные скорости тел установите согласно вашему варианту из таблицы 2 и запишите их в таблицу 4. Рассчитайте величину отношения начальных скоростей тел $\alpha = \frac{v_2}{v_1}$.
15. Установите значения масс тележек, указанные в табл.4 для первого опыта. Измерьте энергии сталкивающихся тележек до и после столкновения. Результаты запишите в таблицу 4.
16. Прделайте такие же измерения для других масс тележек, указанных в таблице 4. Измерьте энергии сталкивающихся тележек до и после столкновения. Результаты запишите в таблицу 4.

17. Рассчитайте отношения масс $\beta = \frac{m_1}{m_2}$.
18. Вычислите величины доли энергии δ , перешедшей во внутреннюю энергию тел в результате столкновения, по формуле (9). Результаты расчетов занесите в таблицу 4.
19. Постройте график зависимости δ от β .
20. Рассчитайте значение δ по формуле (9) при $\beta = -\alpha$. Отметьте полученное значение δ на графике.
21. Проанализируйте график и сделайте выводы.

Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Что такое замкнутая система тел?
2. Запишите и сформулируйте закон сохранения импульса системы тел. В каких системах выполняется закон сохранения импульса? Почему?
3. Что такое полная механическая энергия?
4. Запишите и сформулируйте закон сохранения энергии в механике. В каких системах выполняется закон сохранения механической энергии?
5. Какое взаимодействие тел называют в механике ударом (столкновением, соударением)?
6. Какой удар называется абсолютно упругим? Какие законы сохранения выполняются при этом ударе?
7. Какой удар называется абсолютно неупругим? Какие законы сохранения выполняются при этом ударе?

Выполните следующее дополнительное задание:

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ В покоящийся шар массой M падает пуля массой m . Определить кинетическую энергию шара с пулей E_2 , если скорость пули V_1 . Определить часть кинетической энергии пули, перешедшей во внутреннюю.

◆ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Мяч массой 200 г свободно падает с высоты 5 м и после удара о пол отскакивает на высоту 3,2 м. Найти модуль изменения импульса мяча при ударе.
2. Шар массой $m = 1,8$ кг сталкивается с покоящимся шаром большей массы M . В результате прямого, центрального, абсолютно упругого удара шар потерял 36% своей кинетической энергии. Определить массу M большего шара.
3. Боек свайного молота массой $m_1 = 500$ кг падает с некоторой высоты на сваю массой $m_2 = 120$ кг. Определить КПД η удара бойка, считая удар абсолютно неупругим. Изменением потенциальной энергии сваи при углублении ее пренебречь. Полезной считать энергию, затраченную на вбивание сваи.

МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Момент инерции». Нажмите вверху слева внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Экспериментальная проверка теоремы Штейнера.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

♦ Абсолютно твердое тело - тело, расстояние между любыми двумя точками которого всегда остается неизменным.

Абсолютно твердое тело – это физическая модель. Любое движение твердого тела можно разложить на два основных вида движения – *поступательное* и *вращательное*.

Для характеристики вращательного движения твердого тела, кроме массы и сил, действующих на тело, необходимы физические величины, зависящие от точки приложения силы и от распределения массы тела относительно оси вращения. Такими величинами являются момент инерции I , момент сил \vec{M} и момент импульса \vec{L} .

♦ Момент инерции: I (кг·м²) – мера инертности тел во вращательном движении. Момент инерции зависит от массы тела и распределения массы относительно оси вращения.

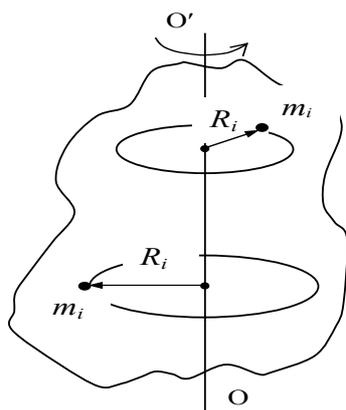
Моментом инерции материальной точки относительно неподвижной оси вращения называется величина, равная произведению массы точки на квадрат расстояния от точки до оси вращения:

$$I = mR^2,$$

где R - кратчайшее расстояние от оси вращения до точки, m – масса точки.

Абсолютное твердое тело можно представить как систему N материальных точек массой m_i .

Моментом инерции твердого тела относительно оси вращения называется величина, равная сумме произведений элементарных масс на квадраты их расстояний до данной оси



$$I = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2 .$$

Для твердого тела произвольной формы вычисление момента инерции является сложной задачей. Наиболее просто вычислить момент инерции твердого тела относительно оси, проходящей через центр масс (центр инерции) тела.

♦ **Центр инерции (центр масс) системы** из N материальных точек - это точка, положение которой задается радиус-вектором:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + \dots + m_N \vec{r}_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{m},$$

где m_i, \vec{r}_i - масса и радиус-вектор i -ой материальной точки,
 $\sum m_i = m$ - масса системы.

Соответственно, координаты центра масс:

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_N x_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i x_i}{m}$$

$$y_c = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \dots + m_N y_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i y_i}{m}$$

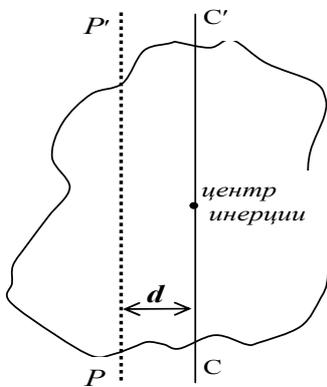
$$z_c = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + \dots + m_N z_N}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i z_i}{m}$$

Для определения момента инерции тела относительно любой оси используется теорема Штейнера.

♦ **Теорема Штейнера:**

Момент инерции I_p твердого тела относительно произвольной оси (PP') равен сумме момента инерции I_c относительно оси (CC'), проходящей через центр масс тела параллельно произвольной, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями

$$I_p = I_c + md^2.$$



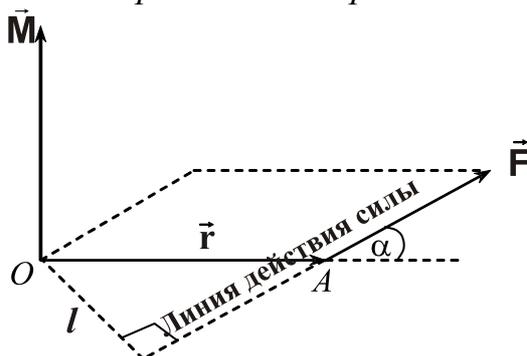
♦ **Момент силы:**

\vec{M} (Н·м) – характеризует силовое взаимодействие тел при вращательном движении.

Моментом силы \vec{F} относительно точки O называется векторная величина \vec{M} , определяемая векторным произведением радиус-вектора \vec{r} точки приложения силы и вектора силы \vec{F} ,

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}],$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из точки O в точку приложения силы (точка A).



Направление вектора \vec{M} перпендикулярно плоскости, в которой находятся радиус-вектор и вектор силы,

и задается правилом правого винта (винт поворачивать от радиус-вектора \vec{r} к вектору силы \vec{F}). Моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, считаются положительными, по часовой стрелке – отрицательными.

Величина вектора момента сил равна:

$$M = r F \sin \alpha = Fl,$$

где α – угол между векторами \vec{r} и \vec{F} ,

$l = r \cdot \sin \alpha$ – плечо силы - кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O (длина перпендикуляра, опущенного из точки O на прямую, вдоль которой действует сила).

Если на тело действует несколько сил, то момент равнодействующей этих сил относительно некоторой точки равен векторной сумме моментов каждой силы относительно той же точки

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i.$$

♦ Момент импульса: \vec{L} ($\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$) – мера количества вращательного движения. Момент импульса материальной точки определяется аналогично моменту силы.

Моментом импульса \vec{L} материальной точки относительно точки O называется векторная величина, определяемая выражением:

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = m [\vec{r}, \vec{v}],$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из точки O в ту точку, где находится материальная точка,

$\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс точки.

Момент импульса твердого тела относительно оси вращения

$$L = \omega I,$$

где I – момент инерции тела; ω – угловая скорость вращения тела.

♦ Основной закон динамики (уравнение моментов)

Скорость изменения момента импульса тела \vec{L} равна действующему моменту силы \vec{M} :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Следствие: Если момент инерции тела не меняется, то

$$M = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow$$

Равнодействующий момент силы \vec{M} равен произведению момента инерции тела I на вызываемое угловое ускорение β

$$M = I \cdot \beta$$

♦ Кинетическая энергия при вращательном движении

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2} \text{ (Дж)}$$

где I – момент инерции тела, ω – его угловая скорость.

Теорема о кинетической энергии: Работа результирующего момента внешних сил равна приращению кинетической энергии вращающегося тела.

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k$$

♦ Элементарная работа dA (Дж) вращательного движения равна произведению момента силы \vec{M} на элементарное угловое перемещение $d\varphi$:

$$dA = M \cdot d\varphi$$

Работа при повороте на конечный угол $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ находится суммированием (интегрированием) всех элементарных работ:

$$A_{12} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОПУСКА:

Получите формулы, необходимые для выполнения лабораторной работы, при решении следующей задачи.

Имеется четыре шарика одинаковой массы M , насаженные на невесомый стержень длины L . Координаты шариков относительно центра стержня r_1, r_2, r_3 и r_4 . Сделайте рисунок. Отметьте на нем все необходимые величины.

Получите выражение для координаты центра масс данной системы. Отметьте его на рисунке.

Запишите выражение для расчета момента инерции системы шаров.

Напишите теорему Штейнера для данной системы относительно произвольной оси.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите «Механика» и «Момент инерции».

2. Внимательно рассмотрите окно опыта. Найдите регуляторы с движками, задающими координаты шариков. Найдите кнопки, задающие положение оси вращения.

3. **Протестируйте модель.** Расположите шарики так, чтобы центр масс системы находился в центре стержня. Для этого, например, установите $r_4 = -r_1$ и $r_3 = -r_2$. Зарисуйте рисунок в отчете. Расположите ось через центр стержня. Рассчитайте момент инерции системы по формуле, полученной в задании для допуска. Сравните расчетное значение момента инерции с модельным, показанном в верхнем окошечке внизу экрана. Переместите ось на край стержня. Рассчитайте момент инерции системы относительно этой оси с помощью теоремы Штейнера. Сравните расчетное значение момента инерции с модельным. Запишите расчеты в отчет.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Приступайте к измерениям.

ТАБЛИЦА 1. Значения координат (не перерисовывать).

Вариант	I				II				III					
	r_1	r_2	r_3	r_4	см	r_1	r_2	r_3	r_4	см	r_1	r_2	r_3	r_4
1	-50	-30	9	22	-48	-23	15	30	-40	-16	18	28		
2	-48	-32	5	18	-44	-28	1	22	-36	-24	10	32		
3	-35	-13	3	45	-20	-5	15	34	-28	-11	25	46		
4	-44	-24	12	36	-37	-15	23	50	-27	-6	18	49		
5	-46	-30	7	20	-42	-26	3	24	-44	-22	12	25		
6	-36	-20	-2	45	-25	-4	33	48	-47	-28	26	40		
7	-23	-10	18	42	-33	-13	26	39	-50	-35	3	24		
8	-22	-16	16	47	-22	-9	16	44	-45	-14	10	21		
9	-31	-12	34	50	-24	-3	23	47	-41	5	25	38		
10	-30	-16	-1	19	-49	-35	20	28	-33	-6	36	50		
11	-29	-15	32	47	-43	-28	3	32	-15	2	16	48		
12	-27	-14	28	46	-50	-23	15	37	-22	-9	31	47		
13	-40	-26	16	37	-18	-5	32	48	-7	6	27	40		
14	-45	-21	-2	19	-50	-26	5	39	-44	-16	4	32		
15	-47	-23	14	30	-33	-17	30	46	-20	-8	17	40		
16	-32	-10	23	38	-50	2	15	39	-19	-5	28	43		

4. Установите первый набор значений координат шариков r_1, r_2, r_3, r_4 , соответствующий номеру вашего варианта (таблица 1). Зарисуйте расположение шариков.

5. Установите поочередно положение оси ЧЕРЕЗ ЛЕВЫЙ КОНЕЦ, ЧЕРЕЗ ЦЕНТР и ЧЕРЕЗ ПРАВЫЙ КОНЕЦ стержня. Измерьте значения модельных моментов инерции, показываемых в верхнем окошечке внизу экрана. Занесите их в таблицу.

6. Для этого же набора координат рассчитайте положение центра масс r_C системы. Отметьте его на рисунке. Отметьте на рисунке положение оси, проходящей через центр масс и расстояния R_i от шариков до этой оси. Рассчитайте момент инерции I_C системы шаров относительно оси, проходящей через центр масс. Занесите полученные значения в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчетов.

		r_C , м	I_C , кг м ²	d_L , м	I_L , кг м ²	d_C , м	I_C , кг м ²	d_P , м	I_P , кг м ²
I	$r_1 =$				измеренное		измеренное		измеренное
	$r_2 =$				рассчетное		рассчетное		рассчетное
	$r_3 =$								
	$r_4 =$								
II	$r_1 =$								
	$r_2 =$								
	$r_3 =$								
	$r_4 =$								
III	$r_1 =$								
	$r_2 =$								
	$r_3 =$								
	$r_4 =$								

7. Нарисуйте оси, проходящие через левый край, правый край и центр стержня.

8. Рассчитайте расстояния d_L , d_C , d_P от оси, проходящей через центр масс, до осей, проходящих через левый край, центр и правый край стержня, соответственно. Занесите эти значения в таблицу 2 и отметьте на рисунке.

9. С помощью теоремы Штейнера, используя формулу, полученную в задании для допуска, рассчитайте моменты инерции системы I_L , I_C , I_P относительно всех трех осей, соответственно. Занесите эти значения в таблицу 2.

10. Сравните значения модельных моментов инерции, показываемых в верхнем окошечке внизу экрана, с рассчитанными вами. Сделайте вывод.

11. Прodelайте пункты 4 – 9 для двух других наборов координат шариков.

12. Для каждого набора координат постройте график зависимости момента инерции I от квадрата расстояния между осями d^2 . По углу наклона каждого графика определите массу одного шарика:

$$M = \frac{1}{4} \frac{\Delta(I)}{\Delta(d^2)}$$

13. Сравните отрезки, отсекаемые графиками по оси Y , со значениями I_C для каждого набора координат шариков. Сделайте вывод.

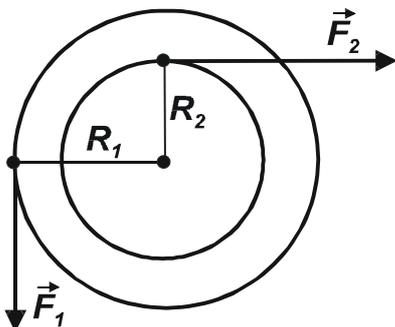
Письменно ответьте на следующие вопросы:

1. Дайте определение поступательного и вращательного движения твердого тела.
2. Как определить положение центра инерции (центр масс) твердого тела?
3. Объясните физический смысл момента инерции. Чему равен момент инерции материальной точки? Системы тел?
4. Сформулируйте теорему Штейнера. Проиллюстрируйте ее рисунком.
5. Что называется моментом силы? Как определить его величину и направление? Что такое плечо силы? Покажите на рисунке.
6. Что такое момент импульса материальной точки? Каковы его величина и направление?
7. Сформулируйте закон сохранения момента импульса системы тел.
8. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения относительно оси вращения.
9. Проведите аналогию между кинематикой и динамикой поступательного и вращательного движения.
10. Что называется плоским движением? Чему равна кинетическая энергия катящегося тела?

Выполните следующее дополнительное задание:

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 1. На тело, имеющее момент инерции I , действуют две касательные силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . При этом $R_1=3\text{м}$ – плечо первой силы, $R_2=2\text{м}$ – второй. Начальная угловая скорость тела ω_0 . Числовые значения момента инерции I , сил F_1 и F_2 , начальной скорости ω_0 задаются для каждого варианта. Время $t_0=0\text{с}$, $t_1=2\text{с}$.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$I (\text{кг}\cdot\text{м}^2) =$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$F_1(\text{Н}) =$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_2(\text{Н}) =$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$\omega_0 (\text{рад/с})$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	6	7	8	9	10	11



Определить:

- 1) величину и направление результирующего момента сил;
- 2) угловое ускорение β ;
- 3) угловую скорость ω_1 и угол поворота φ_1 в заданный момент времени t_1 ;

- 4) величину момента импульса L в моменты времени t_0 и t_1 ;
- 5) работу A результирующего момента сил в заданном интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по формуле механической работы;
- 6) величину кинетической энергии вращения E_{k0} и E_{k1} в моменты времени t_0 и t_1 ;
- 7) работу A результирующей силы в заданном интервале времени $\Delta t = t_1 - t_0$ по теореме о кинетической энергии.

◆ ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА:

В выполненной вами компьютерной лабораторной работе шарики рассматривались как материальные точки. Рассчитайте, какая ошибка в расчете момента инерции системы из четырех шариков при этом допускается. Радиус шарика $R = 5,5$ см. Момент инерции шара

$$I_w = \frac{2}{5} MR^2 .$$