

Лабораторная работа 1.05

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА И ЭНЕРГИИ ПРИ УПРУГОМ И НЕУПРУГОМ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Цель: изучить законы сохранения импульса и механической энергии для системы двух сталкивающихся тележек; исследовать абсолютно упругий и абсолютно неупругий удар.

Оборудование приборы и принадлежности: установка для изучения столкновения тележек; электронный секундомер со световыми барьерами; воздушная подушка; весы; тележки; набор насадок для изучения столкновений; набор грузов.

Введение

При соударении тел друг с другом они претерпевают деформации. При этом кинетическая энергия, которой обладали тела перед ударом, частично или полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации и в так называемую внутреннюю энергию тел.

Существует два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий.

Абсолютно упругим называется удар, при котором механическая энергия соударяющихся тел не переходит в другие немеханические виды энергии.

Абсолютно неупругий удар характеризуется тем, что кинетическая энергия соударяющихся тел частично или полностью превращается во внутреннюю энергию, при этом после соударения тела движутся с одинаковыми скоростями (как одно тело с массой равной сумме масс столкнувшихся тел).

В работе изучаются абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары двух сталкивающихся тележек, расположенных на горизонтальном треке с воздушной подушкой. Наличие воздушной подушки позволяет практически исключить трение между тележками и треком.

Схема эксперимента для изучения упругого и неупругого соударений представлена на рис. 5.1. Тележка массы m_1 , двигаясь с постоянной скоростью, налетает на покоящуюся тележку массы m_2 . Пусть до соударения импульс первой тележки - \vec{p}_1 , а после соударения импульсы первой и второй тележек - \vec{p}_1' и \vec{p}_2' соответственно. Выберем ось X вдоль направления движения тележек, а ось Y вертикально вверх (см. рис. 5.1).

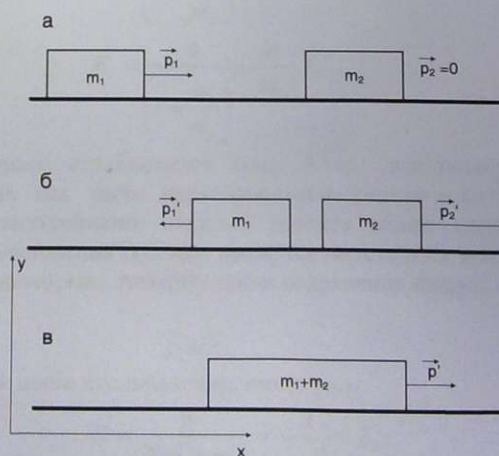


Рис. 5.1

На каждую тележку, движущуюся по треку, действуют сила тяжести, сила реакции опоры и, вообще говоря, сила трения. Проекции силы тяжести и реакции опоры на ось Х равны нулю. Кроме того, поскольку в установке, используемой в работе, сила трения пренебрежимо мала, то проекции всех сил, действующих на движущуюся тележку, на ось Х равны нулю. Следовательно, Х-компонента импульса системы сохраняется как при упругом, так и при неупругом столкновении.

При *упругом* столкновении двух тележек массами m_1 и m_2 (рис. 5.1б) кроме закона сохранения импульса, выполняется закон сохранения механической энергии:

$$\text{ЗСИ: } \vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 \quad (5.1a)$$

$$\text{ЗСЭ: } \frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p_2'^2}{2m_2}. \quad (5.1.6)$$

Решая систему уравнений (5.1) относительно импульсов тележек после столкновения получим следующие зависимости величин p'_1 и p'_2 от соотношения масс тележек:

$$p'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot p_1 = -\frac{1 - \frac{m_1}{m_2}}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \cdot p_1 \quad (5.2.a)$$

$$p'_2 = \frac{2m_2}{m_1 + m_2} \cdot p_1 = \frac{2}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \cdot p_1. \quad (5.2.6)$$

В работе масса и начальная скорость первой тележки не изменяется, поэтому ее начальный импульс и начальная кинетическая энергия – постоянны.

Используя полученные выражения для импульсов тележек после столкновения (5.2), запишем выражения для кинетических энергий тележек до и после столкновения:

$$E_1 = \frac{p_1^2}{2m_1}, \quad (5.3)$$

$$E'_2 = \left(\frac{1 - \frac{m_1}{m_2}}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \right)^2 \cdot E_1 \quad (5.4.a)$$

$$E'_2 = \frac{4}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2} \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot E_1. \quad (5.4.6)$$

При абсолютно *неупругом* столкновении (рис. 5.1в) выполняется только закон сохранения импульса, так как часть первоначальной кинетической энергии первой тележки переходит во внутреннюю энергию тележек после столкновения. После *абсолютно неупругого* столкновения тележки движутся вместе и их можно считать одним телом суммарной массой $m' = m_1 + m_2$, поэтому закон сохранения импульса можно записать в виде:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}', \quad (5.5)$$

тогда энергия двух тележек после столкновения, имеет вид:

$$E' = \frac{p'^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \cdot E_1, \quad (5.6)$$

где E_1 – энергия первой тележки до соударения (5.3).

Таким образом, зная массу и импульс первой тележки до столкновения, по формулам (5.2–5.6) можно определить зависимости импульсов и энергий тележек после столкновения от соотношения их масс.

Описание установки

Упругое и неупругое столкновение изучается на установке, схема которой изображена на рисунке 5.2.

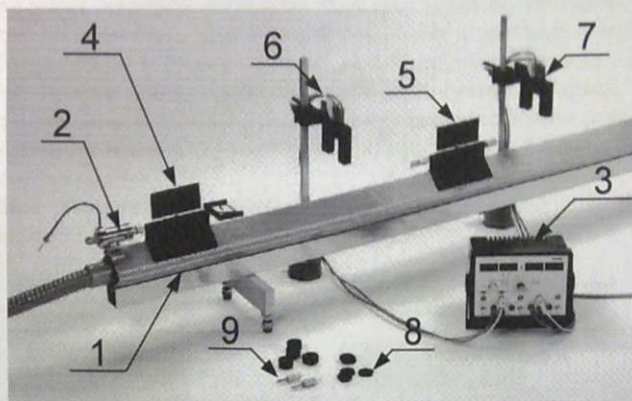


Рис. 5.2



Экспериментальная установка состоит из: воздушного трека 1 пускового устройства 2, электронного секундомера 3, первой тележки 4, второй тележки 5, световых барьеров 6 и 7, набора грузиков 8, насадок для изучения упругого и неупругого соударений 9.


Воздушный трек представляет собой горизонтальный рельс с отверстиями, к которому подключена воздуходувка (на рисунке не показана). При включении воздуходувки поток воздуха подается в рельс и выходит через многочисленные маленькие отверстия на его поверхности, таким образом, создается воздушная подушка для тележек (планеров).

Мощность воздуходувки можно плавно регулировать при помощи ручки, расположенной на передней панели прибора. В процессе работы мощность воздуходувки можно регулировать таким образом, чтобы тележки не сдувало потоком воздуха, но при этом сила трения была пренебрежимо мала. Наличие силы трения можно определить визуально, толкнув тележку и наблюдая, уменьшается ли ее скорость при движении по треку. Если заметно уменьшение скорости тележки, то мощность воздуходувки необходимо немного увеличить. **При работе воздуходувки не устанавливайте на ее шкале значений больше 4!**

Пусковое устройство 2 сообщает импульс первой тележке 4 при нажатии на кнопку тросика. Значение импульса, передаваемого тележке, регулируется положением защелки. Рекомендуется для всех измерений использовать третье положение защелки (перед запуском тележки нажать на защелку влево до упора, при этом будет слышно три щелчка).

При движении тележка проходит через световые барьеры 6 и 7. Сигнал от них подается на электронный секундомер 3. При прохождении через световой барьер экран, прикрепленный сверху на каждую тележку, перекрывает луч барьера, что служит сигналом для запуска таймера на электронном секундомере 3. После выхода экрана из луча светового барьера - таймер останавливается.

Для того, чтобы электронный секундомер запускал таймер при перекрытии луча светового датчика и останавливало его при открытии луча, переключатели выбора режима запуска/остановки таймера должны находиться в следующих положениях: первый – сдвинут влево «»; второй – вправо «».

Электронный секундомер имеет несколько режимов, переключение между которыми осуществляется нажатием кнопки «Mode». Выбранный режим обозначается загоряющейся рядом с пиктограммой лампочкой. В работе рекомендуется использовать четвертый режим, обозначенный на панели счетного устройства пиктограммой «». В этом режиме электронный секундомер фиксирует по два последовательных промежутка времени прохождения каждого светового барьера экраном тележки. В этом режиме световые барьеры должны быть подключены к первому и третьему входам электронного секундомера. Тогда первое и второе табло покажут соответственно промежутки времени первого и второго прохождения экраном тележки через световой барьер, подключенный к первому входу; а третье и четвертое табло покажут соответственно промежутки времени первого и второго прохождения экраном тележки через световой барьер, подключенный к третьему входу.

Перед каждым измерением необходимо сбросить предыдущий результат, нажав несколько раз кнопку «Reset».

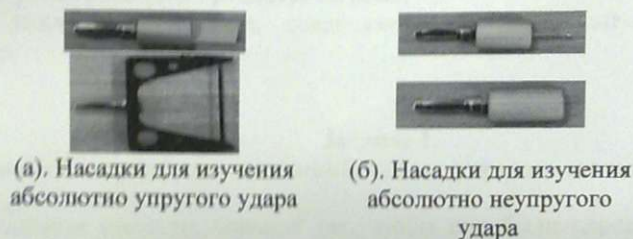


Рис. 5.3

Для изучения упругого соударения на тележки необходимо установить дополнительные насадки, показанные на рис. 5.3(а), а для изучения неупругого соударения – насадки, показанные на рис. 5.3(б).

Масса тележки с насадками определяется при помощи портативных весов. Включение и выключение весов осуществляется нажатием кнопки «ON/OFF».

К установке приложен набор грузов по 50г и по 10г для изменения массы тележек. На каждой тележке имеется два симметрично расположенных шттырька для грузов. Грузы необходимо устанавливать симметричным образом, чтобы суммарная масса грузов на обоих шттырьках одной тележки была одинаковой.

Так как в условиях работы установки, время прохождения экраном каждой тележкой светового барьера t мало, то скорость тележки за это время практически постоянна, поэтому импульс тележки можно рассчитать по формуле:

$$p = m \frac{l}{t}, \quad (5.7)$$

где m – масса тележки вместе с грузиками и насадками, l – длина экрана тележки.

Погрешность импульса рассчитанного по формуле (5.8) определяется по формуле:

$$\Delta p = p \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}, \quad (5.8)$$

где Δl и Δm определяются приборными погрешностями измерения длины экрана и массы тележки, соответственно, а Δt – определяется как максимальная из приборной и случайной погрешностей измерения времени прохождения экраном тележки светового барьера.

Получив, таким образом, импульс тележки можно рассчитать ее энергию по формуле:

$$E = \frac{p^2}{2m}, \quad (5.9)$$

Абсолютная погрешность кинетической энергии рассчитанной по формуле (5.9) имеет вид:

$$\Delta E = E \sqrt{2 \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2}. \quad (5.10)$$


Правила техники безопасности

1. Во время движения тележек не допускайте нахождение посторонних предметов на их пути.
2. Следите за тем, чтобы в процессе выполнения эксперимента не задевать световые датчики, не перемещать их.
3. Не поворачивайте ручку регулятора мощности воздухоудвки, дальше значения «4».
4. При использовании весов, взвешиваемые предметы кладите на них осторожно, не допускайте резкого падения предметов на весы.
5. Не отключайте провода, соединяющие световые датчики и электронный секундомер.

Задание 1.

Экспериментальное исследование абсолютно упругого столкновения тележек.

1. Установите световые барьеры так, чтобы они были перпендикулярны треку, а расстояние между ними составляло приблизительно 40см. Первый барьер установите, например, на отметке 50см, а второй на отметке 90см.

2. Включите электронный секундомер, установите на нем режим измерения времени, обозначенный пиктограммой «» (для этого нужно нажать четыре раза кнопку «MODE»), после чего нажмите кнопку «RESET» несколько раз.

3. Включите воздухоудвку. Для этого сначала переведите ее регулятор мощности в положение «0», а затем включите прибор, кнопкой, расположенной на его задней панели. После этого плавно переведите регулятор мощности в положение «2». Подождите несколько секунд, пока раскрутится электромотор, после чего – плавно переведите регулятор мощности в положение «3».

4. Установите на тележки элементы для изучения упругого столкновения.

5. Измерьте массы тележек с установленными на них элементами для изучения упругого соударения. Для этого включите портативные весы, положите на них тележку. Подождите, пока установится значение на дисплее, показывающее массу тележки. Запишите полученное значение в лабораторный журнал. Выключите весы.

6. Определите скорости тележек до и после столкновения в зависимости от отношения масс тележек. Для этого: при помощи защелки пускового устройства выберите положение, соответствующее максимальному импульсу тележки (три щелчка) и установите первую тележку на трек, так, чтобы она удерживалась пусковым устройством при помощи магнита. Вторую тележку установите между световыми барьерами. На вторую тележку поместите симметрично 4 дополнительных груза массами по 50г (по два на каждый штырек). Запишите массы установленных грузов в таблицу 1.

[illegible]

10. Для каждого соотношения масс тележек рассчитайте экспериментальные значения импульсов и энергий тележек до и после столкновения по формулам (5.7) и (5.9). Найдите сумму проекций импульсов тележек после столкновения на ось x (обратите внимание, что проекция импульса первой тележки после столкновения будет отрицательной), а так же суммарную энергию тележек после столкновения. Определите погрешности экспериментальных значений импульсов и энергий тележек по формулам (5.8), (5.10). Все полученные результаты занесите в таблицу 5.2.

m_1/m_2'				
$p_1, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$p_1'_{\text{эксп.}}, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$p_2'_{\text{эксп.}}, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$p_1'_{\text{теор.}}, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$p_2'_{\text{теор.}}, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$p_1' + p_2'_{\text{эксп.}}, \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$				
$E_1, \text{Дж}$				
$E_1'_{\text{эксп.}}, \text{Дж}$				
$E_2'_{\text{эксп.}}, \text{Дж}$				
$(E_1' + E_2')_{\text{эксп.}}, \text{Дж}$				
$E_1'_{\text{теор.}}, \text{Дж}$				
$E_2'_{\text{теор.}}, \text{Дж}$				

11. Рассчитайте теоретические значения импульсов и энергий тележек после столкновения по формулам (5.2), (5.4) для соотношений масс тележек, измеренных в

эксперименте. Импульс p_1 и энергию E_1 первой тележки до столкновения при расчете примите равными соответствующим экспериментальным значениям, определенным в п. 10.

12. Постройте на одном листе графики зависимости импульса первой тележки до столкновения и экспериментального значения суммарного импульса тележек после столкновения от соотношения масс тележек, отметьте погрешности.

13. Постройте на одном листе графики зависимости энергии первой тележки до столкновения; экспериментального значения суммарной энергии тележек после столкновения от соотношения масс тележек, отметьте погрешности.

14. Сравните экспериментальные и теоретические зависимости, сделайте заключение о выполнении законов сохранения при абсолютно упругом соударении.

Задание 2.

Экспериментальное исследование абсолютно неупругого соударения тележек.

1. Установите на тележки элементы для изучения неупругого соударения.
2. Измерьте массы тележек с установленными на них элементами для изучения неупругого соударения. Для этого включите портативные весы, положите на них тележку. Подождите, пока установится значение на дисплее, показывающее массу тележки. Запишите полученное значение в лабораторный журнал. Выключите весы.
3. Определите скорости тележек до и после столкновения в зависимости от отношения масс тележек. Для этого: при помощи защелки пускового устройства выберите положение, соответствующее максимальному импульсу тележки (три щелчка) и установите первую тележку на трек, так, чтобы она удерживалась при помощи магнита. Вторую тележку установите между световыми барьерами. На вторую тележку поместите симметрично 4 дополнительных груза массами по 50г (по два на каждый штырек). Запишите массы установленных грузов в таблицу 5.3.
4. Запустите первую тележку при помощи пускового устройства. Электронный секундомер покажет промежутки времени, прохождения тележек через световые датчики: двух тележек после столкновения T' (на третьем табло) и первой тележки до столкновения – T_1 (на первом табло). Запишите в таблицу 5.3 результаты измерения. Повторите измерения не менее пяти раз.
5. Повторите измерения, описанные в п.п. 3,4 уменьшая массу грузов, установленных на вторую тележку с шагом 20г до тех пор, пока первая тележка после соударения не перестанет достигать первого светового датчика. После каждого изменения массы грузов на второй тележке необходимо подрегулировать мощность воздуходувки, чтобы вторая тележка могла скользить по треку без трения и при этом не сдувалась потоком воздуха.
6. Для каждой массы грузов на второй тележке найдите: среднее время прохождения тележек через барьеры, а так же погрешность методом Кронфельда. Рассчитайте отношение масс тележек – m_1/m_2' , где m_2' – масса второй тележки с установленными на нее грузиками. Результаты запишите в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

$m_{\text{груза}}, \text{г}$	m_1/m_2'	$T_1, \text{с}$	$\langle T_1 \rangle, \text{с}$	$T', \text{с}$	$\langle T' \rangle, \text{с}$

7. Для каждого соотношения масс тележек рассчитайте экспериментальные значения импульса и энергии первой тележки до столкновения; импульс и энергию двух тележек после столкновения по формулам (5.7) и (5.9). Определите погрешности экспериментальных значений импульсов и энергий тележек по формулам (5.8), (5.10). Все полученные результаты занесите в таблицу 5.4.

Таблица 5.4

m_1/m_2'				
p_1 , кг·м/с				
$p'_{\text{эксп.}}$, кг·м/с				
E_1 , Дж				
$E'_{\text{эксп.}}$, Дж				

8. Рассчитайте теоретические значения энергии двух тележек после столкновения по формуле (5.6) для соотношений масс тележек, измеренных в эксперименте. Энергию E_1 первой тележки до столкновения при расчете примите равной соответствующему экспериментальному значению, определенному в п. 7.

9. Постройте график зависимости значений импульса первой тележки до столкновения от соотношения масс тележек, нанесите на него экспериментальные значения импульса тележек после столкновения $p'_{\text{эксп.}}$, отметьте погрешности.

10. Постройте на одном листе графики зависимости значений энергии тележек после столкновения и энергии первой тележки до столкновения от соотношения масс тележек, нанесите на тот же лист экспериментальные значения энергии тележек после столкновения $E'_{\text{эксп.}}$, отметьте погрешности.

11. Сравните экспериментальные и теоретические зависимости, сделайте заключение.

12. По графику зависимости энергии тележек от соотношения масс до и после соударения оцените, какая доля первоначальной кинетической энергии первой тележки переходит во внутреннюю энергию системы в процессе соударения.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии для системы тел.
2. Сформулируйте закон сохранения импульса для системы тел.
3. Что называется абсолютно упругим и абсолютно неупругим ударом?
4. Сформулируйте законы сохранения импульса и полной механической энергии для абсолютно упругого столкновения двух тележек массами m_1 и m_2 , если вторая тележка до столкновения покоилась.
5. Сформулируйте закон сохранения импульса для абсолютно неупругого столкновения двух сталкивающихся тележек массами m_1 и m_2 , если вторая тележка до столкновения покоилась.
6. Выполняется ли закон сохранения полной механической энергии при абсолютно неупругом ударе?
7. Какой режим работы электронного секундомера используется в работе?
8. Каким образом следует подбирать мощность воздушной подушки в работе?
9. Измерения каких физических величин в данной лабораторной работе являются прямыми, а каких — косвенными?
10. Указать возможные источники систематических погрешностей в лабораторной работе.
11. Если в результате выполнения задания 1 работы не удастся сделать заключение об экспериментальном подтверждении закона сохранения полной механической энергии, какой вывод можно сделать?
12. Каков характер зависимости модулей импульсов тележек после соударения от соотношения их масс при абсолютно упругом столкновении?

13. При каком соотношении масс тележек первая тележка после абсолютно упругого соударения остановится?

14. При каком соотношении масс тележек первая тележка после абсолютно упругого соударения продолжит движение в том же направлении, что и до столкновения?

Литература

1. И.В. Савельев. Курс общей физики, том 1. Механика. М.: Астрель АСТ, 2003.
2. И.Е. Иродов. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Том 1. Механика. М.: Физматлит, 2006.
4. В.В. Светозаров. Элементарная обработка результатов измерений. М.: МИФИ, 2005.