

БНТУ  
Кафедра технической физики

Лабораторная работа №132D

## **ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ, ИМПУЛЬСА И МОМЕНТА ИМПУЛЬСА**

*Авторы программы:*  
*Доцент кафедры «Техническая физика»*  
*Русакевич Дмитрий Александрович*  
*Студенты группы 107215*  
*Овсянников Николай Васильевич*  
*Чепиков Денис Сергеевич*

Минск 2010

## Изучение законов сохранения энергии, импульса и момента импульса

Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса являются фундаментальными законами природы и управляют огромным количеством разнообразных физических явлений. Указанные законы сохранения являются следствием основного уравнения механики – закона Ньютона и свойств симметрии пространства и времени.

**Энергия** – универсальная количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную и др.

Совокупность материальных точек и тел, рассматриваемых как единое целое, называется **механической системой**.

Механическая система тел, на которую не действуют внешние силы, называется **замкнутой** (или **изолированной**)

**Закон сохранения энергии** связан с однородностью времени и говорит о том, что в замкнутой системе при условии, что между телами действуют только консервативные силы (т.е. отсутствуют сила трения, неупругие взаимодействия и т.д.) полная механическая энергия системы сохраняется.

$$E + U = const \quad (1)$$

Здесь  $E$  – кинетическая энергия,  $U$  – потенциальная.

При отсутствии силовых полей сохраняется кинетическая энергия

$$E = \sum E_i = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 = const, \quad (2)$$

где  $E_i$  – кинетическая энергия отдельных частей системы.

Векторная величина  $\vec{P}$ , равная произведению массы  $m$  материальной точки на вектор скорости  $\vec{v}$  её движения, называется **импульсом материальной точки**, т.е.  $\vec{P} = m\vec{v}$ .

Импульс механической системы равен векторной сумме импульсов частей, составляющих эту систему, т.е.  $\vec{P} = \sum \vec{P}_i$ , где  $\vec{P}_i$  – импульсы отдельных частей системы.

**Закон сохранения импульса** связан с однородностью пространства. В замкнутой системе при отсутствии внешних сил полный импульс системы сохраняется.

$$\vec{P} = \sum \vec{P}_i = \sum m_i \vec{v}_i = const \quad (3)$$

Если работа, совершаемая силой, зависит от траектории перемещения тела из одной точки в другую, то такие силы называются **диссипативными**, примером их являются силы трения.

Диссипативные силы, если они являются для системы тел внутренними, на величину полного импульса не влияют.

**Моментом импульса**  $\vec{L}_i$  отдельной частицы тела массой  $m_i$  называется произведение расстояния от оси вращения до частицы  $\vec{r}_i$  на импульс  $m_i \vec{v}_i$  этой частицы:  $\vec{L}_i = [\vec{r}_i \cdot \vec{p}_i] = m_i [\vec{v}_i \cdot \vec{r}_i]$ .

Момент импульса твердого тела относительно оси – векторная сумма моментов импульсов отдельных частиц:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n m_i [\vec{v}_i \cdot \vec{r}_i]$$

**Закон сохранения момента импульса** связан с изотропностью пространства, т.е. с равноправностью всех направлений. В замкнутой системе при отсутствии внешних моментов сил полный момент импульса системы сохраняется.

$$\vec{L} = \sum \vec{L}_i = \sum [\vec{r}_i \vec{p}_i] = const \quad (4)$$

Здесь  $\vec{r}_i$ ,  $\vec{p}_i$  - радиусы векторы тел и их импульсы. Внутренние диссипативные силы на величину момента импульса не влияют.

## 1. Упругие взаимодействия

Законы сохранения энергии и импульса удобно изучать на примере столкновения абсолютно упругих тел.

Абсолютно упругим ударом называется столкновение двух или более тел, в результате которого во взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся механическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в механическую энергию.

При любом взаимодействии двух или большего числа тел происходит передача импульса и энергии от одних тел к другим. Для абсолютно упругого удара выполняется закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

В чистом виде упругое взаимодействие встречается при соударении атомных частиц. Если при этом не происходит возбуждение внутренних степеней свободы, частицы после соударения разлетаются без изменения внутренней энергии. При столкновении макроскопических тел потери энергии на трение и неупругие деформации неизбежны, однако во многих случаях эти потери невелики и упругое столкновение может служить хорошей моделью для изучения взаимодействия реальных тел.

Удобными объектами для изучения законов сохранения в механике являются тела сферической или цилиндрической формы. Простая и универсальная геометрическая форма шаровой или цилиндрической поверхности позволяет легко описывать соударение математически. В то же время столкновение сферически симметричных объектов часто встречается, например, в атомной и молекулярной физике.

Процесс удара можно разделить на две фазы. В первой фазе с момента соприкосновения соударяющихся тел происходит деформация сжатия этих тел, в результате которой возникают силы, тормозящие сближение тел. При этом часть кинетической энергии тел переходит в потенциальную энергию их деформации (частично и в тепловую и другие виды внутренней энергии в случае неупругого удара). В этот момент взаимодействующие тела похожи на сжатые пружины. После этого происходит преобразование потенциальной энергии деформации в кинетическую, возрастающую до тех пор, пока соприкосновение тел не прекратиться. После упругого удара тела восстанавливают свою форму и разлетаются с новыми скоростями. Упругий удар предполагает отсутствие сил трения.

Рассмотрим упругое соударение двух шаров или цилиндров радиусов  $R_1$ ,  $R_2$  с массами  $m_1$ ,  $m_2$ , имеющих первоначальные скорости  $\vec{v}_1$ ,  $\vec{v}_2$  при отсутствии силовых полей (Рис. 1а):

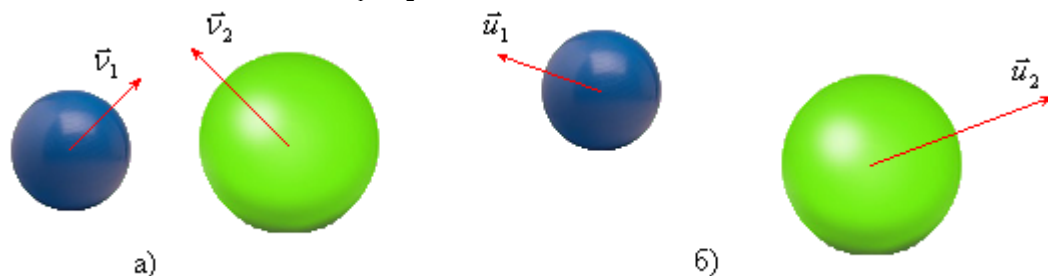


Рис. 1

После столкновения тела приобретают скорости  $\vec{u}_1$ ,  $\vec{u}_2$  (Рис. 1б). Экспериментальное изучение этого, на первый взгляд простого физического явления затруднительно, т.к. не существует простых измерительных систем, позволяющих регистрировать векторные значения скоростей тел после взаимодействия. Математическое же моделирование легко решает эту проблему, а использование в процессе моделирования полной системы уравнений, описывающих явление,

позволяет получить адекватную физическую картину. Законы сохранения импульса и энергии имеют вид (все рассмотрение ведется в нерелятивистском приближении)

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (6)$$

Система уравнений (5) – (6) достаточна для нахождения скоростей  $\vec{u}_1, \vec{u}_2$  после столкновения.

В общем случае анализ и решение системы уравнений (5) – (6) достаточно сложны. Уравнение (5) векторное и должно быть записано в проекциях, (6) – нелинейное.

Обычный метод упрощения задачи столкновения состоит в том, что выбирают систему отсчета, в которой второе тело до соударения покоится. В этом случае  $\vec{v}_2=0$  и в левых частях уравнений (5) и (6) остается по одному члену. Если не изменять обозначения для остальных скоростей система (5) и (6) перейдет в систему

$$m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (8)$$

Решение уравнений (7) – (8) в общем случае достаточно громоздко и без использования компьютеров его анализ затруднителен. Это решение заложено в алгоритм математического моделирования, и на экране монитора Вы можете изучать явление соударения при любых начальных условиях.

## 1.1 Центральное столкновение упругих шаров

Прямая, проходящая через точку соприкосновения тел и нормальная к поверхности их соприкосновения, называется *линией удара*.

**Центр масс системы тел** – воображаемая точка С, положение которой характеризует распределение массы этой системы.

Координаты центра массы системы тел равны:

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_c = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i},$$

где  $m_i$  и  $r_i$  - масса и радиус-вектор  $i$ -той материальной точки.

**Закон движения центра масс:** центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, действующих на систему.

Удар называется *центральным*, если тела до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры массы.

Расстояния между линиями, по которым движутся центры масс шаров, называется прицельным параметром  $\Delta$  (Рис. 2):

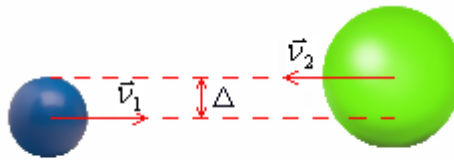


Рис. 2

При центральном упругом ударе скорость налетающего тела  $\vec{v}_1$  направлена вдоль линии центров (прицельный параметр  $\Delta=0$ ) (Рис. 3а). Для простоты предположим, что второй шар покоится, т.е.  $\vec{v}_2=0$ .

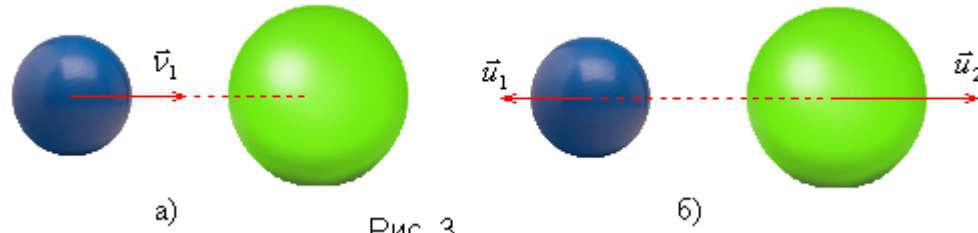


Рис. 3

В этом случае скорости тел после соударения  $\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  также направлены вдоль линии центров (Рис. 3б), уравнение (7) переходит в скалярное и система (7), (8) легко решается.

Запишем для этого случая уравнения (7) – (8), разделив их предварительно на  $m_1$ :

$$v_1 = u_1 + \frac{m_2}{m_1} u_2 \quad (9)$$

$$v_1^2 - u_1^2 + \frac{m_2}{m_1} u_2^2 \quad (10)$$

Возведем уравнение (9) в квадрат и вычтем из него уравнение (10)

$$u_2 \left[ 2u_1 \left( \frac{m_2}{m_1} - 1 \right) u_2 \right] = 0 \quad (11)$$

Случай  $u_2=0$  тривиальный, он соответствует несостоявшемуся соударению. Для  $u_2 > 0$  из (11) следует

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{2m_1} u_2 \quad (12)$$

Подставляя (12) в (9), получим

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (13)$$

Далее из (12) и (13) получаем

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \quad (14)$$

Из формулы (13) и (14) видно, что второй шар всегда движется в сторону направления скорости первого шара  $\vec{v}_1$ , и для первого шара результат зависит от соотношения  $m_1, m_2$ .

## 1.2 Нецентральное столкновение упругих шаров

При нецентральном столкновении упругих шаров ( $\Delta \neq 0$ ) происходит их разлет с углом  $\theta$  (Рис. 4):

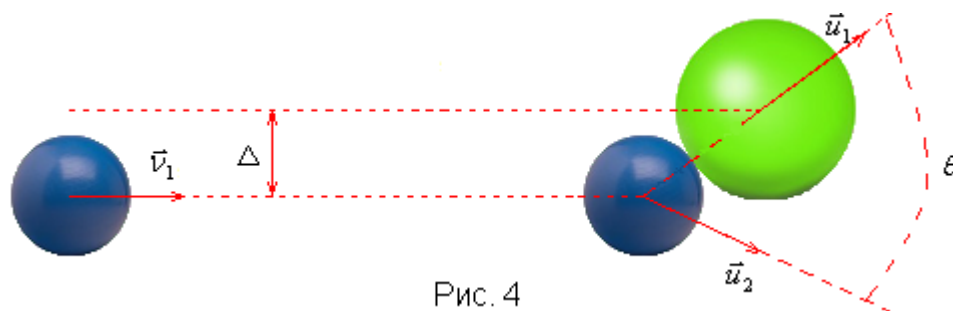


Рис. 4

Для того, чтобы выяснить общий характер поведения шаров после столкновения, воспользуемся законами сохранения импульса и энергии ( $\vec{v}_2 = 0$ ).

Возведем уравнение (7) в квадрат по правилам скалярного умножения векторов

$$m_1^2 v_1^2 = m_1^2 u_1^2 + 2m_1 m_2 \vec{u}_1 \vec{u}_2 + m_2^2 u_2^2 \quad (9.1)$$

а уравнение сохранения энергии (8) умножим на множитель  $2m_1$

$$m_1^2 v_1^2 = m_1^2 u_1^2 + m_1 m_2 u_2^2 \quad (10.1)$$

Вычтя (10.1) из (9.1), получим:

$$u_1 u_2 = \frac{m_1 - m_2}{2m_1} u_2^2 \quad (11.1)$$

Исключая тривиальный случай  $u_2 = 0$  (столкновение не произошло) из (11.1) получаем следующие возможности

$$\begin{aligned} m_1 = m_2 &\Rightarrow \vec{u}_1 \vec{u}_2 = u_1 u_2 \cdot \cos \theta = 0 \Rightarrow \theta = \pi / 2 \\ m_1 > m_2 &\Rightarrow u_1 u_2 \cdot \cos \theta > 0 \quad \Rightarrow \theta < \pi / 2 \\ m_1 < m_2 &\Rightarrow u_1 u_2 \cdot \cos \theta < 0 \quad \Rightarrow \theta > \pi / 2 \end{aligned}$$

Итак, в случае равных масс разлет осуществляется под прямым углом. При столкновении тяжелого тела с легким углом разлета острый и при столкновении легкого тела с тяжелым угол разлета тупой. Все эти случаи наблюдаются в атомной физике при упругом рассеянии атомных частиц.

## 2. Неупругое соударение однородных тел

При неупругом ударе деформации, возникающие при сжатии тел, не исчезают полностью, и часть механической энергии (кинетическая и потенциальная энергия упругих деформаций) переходит в тепловую или другие виды внутренней энергии (электронное возбуждение, колебания молекул и т.д.). Простейшим случаем является абсолютно неупругий удар, т.е. удар, когда в момент выравнивания скоростей силы взаимодействия полностью исчезают и тела движутся дальше как одно целое. Моделью абсолютно неупругих тел могут служить свинцовые и пластилиновые шары, попадание пули в ящик с песком, стоящий на тележке и т.д. В атомной физике неупругие взаимодействия образуют важный класс взаимодействий, когда одна из частиц захватывается другой.

При соударении атомных частиц кинетическая энергия переходит во внутреннюю (электронное, колебательное или вращательное возбуждение).

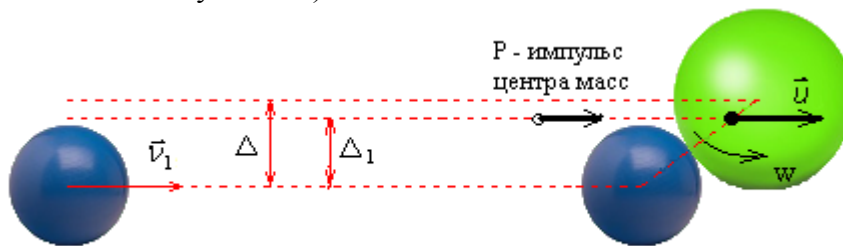


Рис. 5

Так как закон сохранения механической энергии теперь не выполняется, для полного описания движения необходимо привлечь закон сохранения момента импульса. Для столкновения двух тел законы сохранения импульса и момента импульса имеют вид:

$$P_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2 = P = (m_1 + m_2) u \quad (15)$$

$$L_0 = m_1 v_1 \Delta_1 - m_2 v_2 \Delta_2 = L = I \omega, \quad (16)$$

где  $P_0, P$  – импульс до и после столкновения,  
 $u$  – скорость центра масс системы двух шаров,  
 $L_0, L$  – моменты импульсов системы до и после удара,  
 $I$  – момент инерции системы,  
 $\omega$  – угловая скорость вращения.

**Моментом инерции** системы (тела) относительно оси вращения называют физическую величину, равную сумме произведений масс и материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

Уравнения (15) и (16) записаны в скалярном виде, направления векторов скоростей совпадают, а направление вектора угловой скорости  $\omega$  совпадает с направлением вектора момента импульса (Рис. 5).

Момент импульса в (16) выражен через прицельный параметр  $\Delta_1$  - расстояния от линий скорости до центра масс системы, поскольку это расстояние является радиусом вращения системы вокруг центра масс. Момент импульса можно также выразить через обычное прицельное расстояние  $\Delta$ .

$$L_0 = \mu v_1 \Delta, \quad (17)$$

где  $\mu$  – приведенная масса.  
 Если приведенная масса

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (18)$$

то момент инерции  $I$  есть

$$I = I_1 + I_2 + \mu(R_1 + R_2)^2 \quad (19)$$

Где  $I_1$  и  $I_2$  – моменты инерции сталкивающихся тел относительно своих геометрических осей, последний член в (19) появился согласно теореме Штейнера. Моменты инерции сплошного шара равен  $\frac{2}{5}mR^2$ .

Из уравнения (15) находится скорости движения центра масс образовавшейся связанной системы из уравнения (16) угловая скорость вращения. Если скорость  $v_1$  и размеры  $R_1$  и  $R_2$  выражать в соответствующих масштабах ( $m$  – м/с,  $cm$  – см/с, ...) то  $\omega$  будет выражена в радианах в секунду  $c^{-1}$ .

## 2.1 Баланс энергии для неупругого удара

Кинетическая энергия налетающего тела  $E_0 = \frac{1}{2}mv_1^2$  в момент столкновения переходит в тепло  $Q$  и частично в кинетическую энергию образовавшейся связанной системы.

О кинетической энергии каждого из соединенных тел говорить трудно, т.к. оба тела непрерывно обмениваются кинетической энергией. В некоторые моменты времени кинетическая энергия одного из тел может даже обращаться в нуль. В эти моменты это тело останавливается, вся кинетическая энергия переходит к другому телу, которое движется в это время с наибольшей возможной для данного случая скоростью. Этим моментом соответствуют точки излома (пики) на траектории движения (циклоиде).

Вся кинетическая энергия первого тела переходит в три вида энергии:

$$E_k = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)u^2 - \text{поступательная энергия системы,} \quad (20)$$

$$E_w = \frac{1}{2}I\omega^2 - \text{вращательная энергия системы} \quad (21)$$

$$E_s = E_0 - (E_k + E_w) - \text{тепловая энергия } E_s \quad (22)$$

Поступательная энергия от прицельного параметра не зависит и полностью определяется массами тел и начальной скоростью. Соотношение между  $E_w$  и  $E_s$  зависит от прицельного расстояния. При центральном столкновении  $E_w = 0$  и в тепло переходит максимально возможная часть энергии, при касательном столкновении  $E_s$  минимальна.

## 3. Анализ соударений атомных частиц

Изученные Вами типы взаимодействий осуществляются также и при столкновении микрочастиц – молекул атомов, ионов, ядер, электронов, протонов и т.д. Треки заряженных частиц становятся видимыми в специальных устройствах-камерах или при пролете частиц через ядерные фотоэмульсии.

В камере Вильсона газ (воздух, гелий, аргон, азот), насыщенный водяным паром (или смесью паров воды и спирта) внезапно адиабатически расширяется. При этом пар охлаждается и становится перенасыщенным. Конденсации, однако, не происходит, т.к. среда в камере тщательно очищена от пыли. Заряженные частицы, пролетающие в камере, ионизуют на своем пути атомы и молекулы газов в камере, и на образовавшихся ионах сразу же начинается конденсация насыщенного пара. Так образуются треки – туманные следы частиц на темном фоне.

По типу и характерным особенностям треков можно сделать заключение о виде взаимодействия частиц. Если камеру Вильсона поместить в магнитное поле, по искривлению треков можно судить о знаке заряда и скорости частиц. Аналогичные фотографии треков получают также в диффузионных камерах (в которых перенасыщенный пар образуется за счет диффузии из горячей

области камеры в холодную), в пузырьковых камерах (треки проявляются в виде цепочек пузырьков в перегретой жидкости, очищенной от центров парообразования (обычно в жидком водороде)). При этом парообразование вызывают ионы вдоль пути атомной частицы. В искровых камерах треки заряженных частиц становятся видимы, когда они пролетают между пластинами в очень сильном электрическом поле, близком к пробойному. Ионизация газа в небольшой области, находящегося в критическом электрическом поле, приводит к микроскопическому пробою, что регистрируется как небольшая искра. Путь заряженной частицы виден таким образом как цепочка искровых разрядов.

## Литература

1. Т.И. Трофимова «Курс физики», «Высшая школа», 2002
2. И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1, «Мир», 1957
3. Г.А. Зисман «Курс общей физики», «Наука», Москва, 1965
4. И.И. Петровский «Механика», Издательство БГУ, Минск, 1973

## Контрольные вопросы

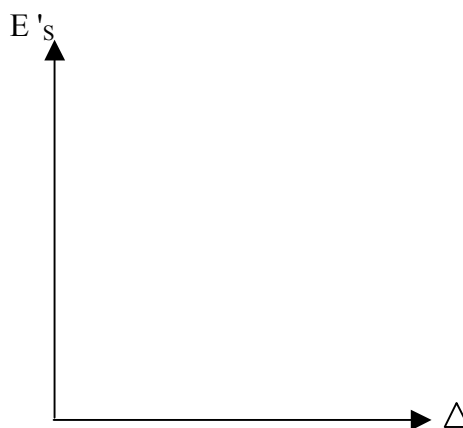
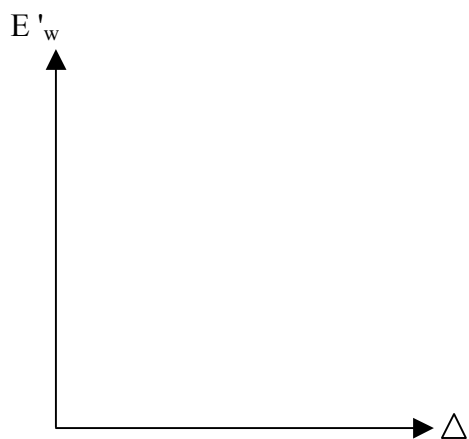
1. Сформулируйте и запишите закон сохранения механической энергии в замкнутой системе в отсутствие диссипативных сил.
2. Запишите закон сохранения энергии для упругого столкновения двух тел при отсутствии силовых полей.
3. Сформулируйте и запишите закон сохранения импульса в замкнутой системе.
4. Запишите закон сохранения импульса для упругого столкновения двух тел.
5. Что такое центр масс и как он определяется?
6. Опишите центральное упругое столкновение двух тел одинаковой массы ( $m_1 = m_2$ ). Как изменяется скорость (по величине и направлению) и кинетическая энергия первого тела? Куда направлена и чему равна скорость второго тела? Какую часть кинетической энергии приобретает второе тело?
7. От чего зависит угол разлета при нецентральной упругом ударе?
8. Сформулируйте и запишите закон сохранения момента импульса в замкнутой системе.
9. Запишите закон сохранения импульса для неупругого соударения двух тел. Что определяет этот закон?
10. Запишите закон сохранения момента импульса для неупругого соударения двух тел. Что определяет этот закон?
11. Запишите закон превращения энергии для неупругого соударения.
12. Какой вид имеют траектории движения тел после неупругого взаимодействия. Можно ли говорить о кинетической энергии каждого из тел после соударения?



4. Таблица результатов эксперимента при неупругом ударе

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$u_1$	$u_2$	$\omega$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	$E'_w$	$E'_s$	Угол разлета
1															
...															
9															

График зависимости энергии вращения системы от прицельного параметра  
 График зависимости тепловой энергии системы от прицельного параметра



Графики выполняются на миллиметровой бумаге.

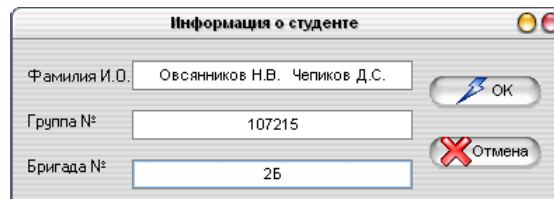
## Порядок выполнения моделирующей компьютерной работы

### «Изучение законов сохранения энергии, импульса и момента импульса»

- Цель работы:**
1. Изучить законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.
  2. Исследовать влияние различных параметров системы, состоящей из двух шаров, на характер упругого и неупругого столкновения.
  3. Построить необходимые графики, сделать выводы.
  4. Подготовить отчет по проделанной работе.

#### Ход выполнения работы

- 1\*. Включите компьютер.
- 2\*. Запустите программу «Soudarenie».
3. Введите в одну строку фамилии студентов, выполняющих работу, номер группы и номер бригады:



Информация о студенте

Фамилия И.О.: Овсянников Н.В. Чепиков Д.С. OK

Группа №: 107215

Бригада №: 2Б Отмена

**Внимание:** очень важно заполнить все данные правильно, т.к. после выполнения работы эти данные будут использованы при печати на принтере.

4. Выполните задания согласно варианту, предложенному преподавателем:

**(Задания и варианты представлены в приложении 1, 2)**

5. После выполнения работы к контрольному занятию подготовить отчет о проделанной работе.

Отчет содержит:

- а) Титульный лист
- б) Цель и задачи работы
- в) Физическая и математическая модель эксперимента
- г) Таблицы результатов, выводы под каждой таблицей по результатам моделирования
- д) Общие выводы в конце работы

6. Распечатать смоделированные программой траектории движения шаров и результаты соударения. Для этого студенту необходимо:

а) Выполнить в программе эксперимент по моделированию соударения шаров. Параметры соударения задать на свое усмотрение.

б) После выполнения эксперимента занести сгенерированную программой данные в одну из 4-х свободных ячеек, расположенных на панели инструментов в верхней части окна программы. Для этого необходимо нажать левой кнопкой мыши по одной из свободных ячеек. Свободные ячейки

подсвечиваются красным цветом:



- в) После нажатия мышкой по свободной ячейке она изменит свой цвет на зеленый:




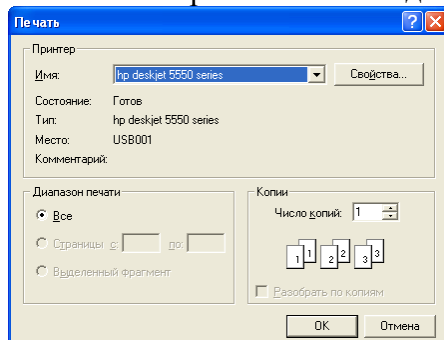
г) После этого можете выполнить следующий эксперимент, но уже с другими параметрами. Всего должно быть выполнено 4 эксперимента, по окончании которых должны быть заполнены все 4

ячейки памяти, т.е. они все должны иметь зеленый цвет:



Содержимое ячеек можно перезаписывать новыми данными повторным нажатием на ней левой кнопкой мыши.

д) После того как будут заполнены все 4 ячейки необходимо нажать на кнопку с изображением принтера . После этого на экране появиться диалог печати:



\* Согласуйте возможность печати на принтере с дежурным инженером в лаборатории, после чего нажмите на кнопку «ОК». После окончания печати заберите свой лист.

**\* - Выполняет дежурный инженер в лаборатории**

## Приложение 1.

### **Задание 1.**

Исследование влияния радиусов шаров на характер центрального упругого и неупругого ударов.

1.1 С помощью клавиатуры и «мыши» установите параметры первого и второго шара до соударения, т.е. задайте массы шаров, их скорость и радиусы; прицельный параметр равен «0». (Рекомендуемые параметры даны в Вашем варианте)

1.2 Задайте тип соударения – «Упругий» («неупругий»).

1.3 Подведите курсор на меню «Начать» и запустите программу

1.4 Занесите полученные данные в заранее подготовленную таблицу согласно Вашего варианта.

1.5 Измените радиус первого шара (при этом остальные параметры не изменяются) и повторите пункты 1.3 – 1.4.

1.6 Занесите полученные данные в таблицу.

1.7 Измените еще несколько раз радиусы первого шара, при этом повторяя пункты 1.3 – 1.4.

1.8 Измените несколько раз радиус второго шара (при этом остальные параметры должны оставаться без изменения) и результаты занесите в таблицу. (Сделайте несколько экспериментов для произвольно выбранных Вами параметров).

1.9 Проанализируйте полученные данные, под таблицей напишите выводы.

### **Задание 2**

Промоделируйте и сделайте выводы, как влияют на результат эксперимента изменение массы первого и второго шара, для упругого и неупругого удара:

2.1 Задайте с помощью клавиатуры и мыши параметры первого и второго шара.

2.2 Задайте тип соударения – «Упругий» («неупругий»).

2.3 Запустите программу.

2.4 Оставляя все остальные параметры постоянными, измените несколько раз массу первого шара и занесите данные в таблицу.

2.5 Повторяйте пункт 2.4, но при этом измените массу второго шара.

2.6 Проанализируйте полученные данные и вывод запишите под таблицей.

### **Задание 3**

Исследование влияния на результат эксперимента изменение прицельного параметра.

3.1 Выберите параметры эксперимента. (согласно Вашему варианту)

3.2 Изменяя несколько раз прицельный параметр и массы шаров, получите результат и занесите его в таблицу.

3.3 Измените несколько раз величину и направление скоростей шаров (при одном и том же прицельном параметре) данные занесите в таблицу и сделайте выводы.

### **Задание 4**

Промоделируйте и проверьте как выполняется закон сохранения момента импульса и закон сохранения полной энергии для неупругого удара. Для чего:

4.1 Задайте параметры первого шара.

4.2 Задайте параметры второго шара. Пусть второй шар покоится.

4.3 Промоделируйте несколько столкновений. Данные занесите в таблицу.

4.4 Проверьте по Вашим данным, по формулам 15- 22 как выполняются законы сохранения импульса, момента импульса и полной энергии.

4.5 Постройте график зависимости  $E_w$  и  $E_s$  от прицельного параметра (при данном исследовании меняется только прицельный параметр, все остальные параметры остаются неизменными).

4.6 Под таблицей результатов сделайте выводы.



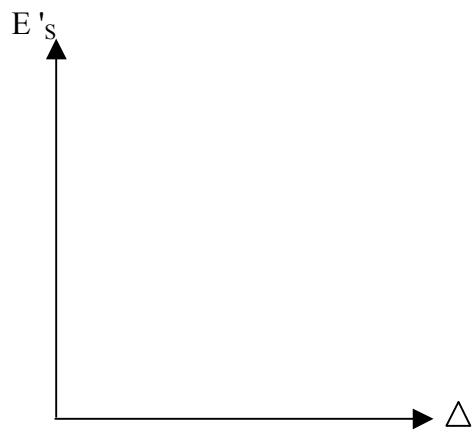
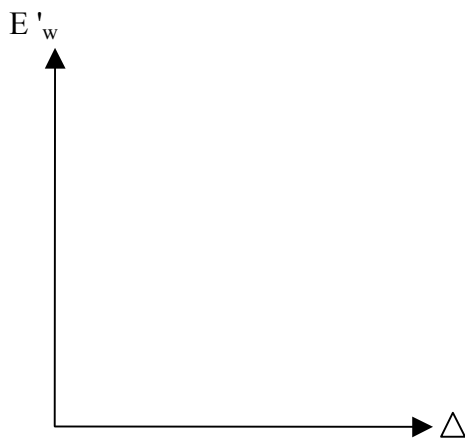




г) Выполните задание 4 для неупругого соударения

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	U	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_w$	$E'_s$
1	5	5	10	5	2	50	0							
2	5	5	20	5	2	50	0							
3	5	5	10	10	2	50	0							
4	5	5	10	20	2	50	0							
5	5	5	10	20	5	50	0							
6	5	5	10	20	6	50	0							
7	5	5	10	20	7	50	0							
8	5	5	10	20	8	50	0							
9	5	5	10	20	9	50	0							

График зависимости энергии вращения системы от прицельного параметра  
 График зависимости тепловой энергии системы от прицельного параметра



Графики выполняются на миллиметровой бумаге.

## Вариант 2

а) Выполните задание 1 для упругого удара.

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	5	4	5	8	0	50	-20							
2	6	4	5	8	0	50	-20							
3	7	4	5	8	0	50	-20							
4	7	5	5	8	0	50	-20							
5	7	4	5	8	0	50	-10							

а') Выполните задание 1 для неупругого удара.

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_{к}$	$E'_s$	$E_w'$
1	5	4	5	8	0	50	-20							
2	6	4	5	8	0	50	-20							
3	7	4	5	8	0	50	-20							
4	7	5	5	8	0	50	-20							
5	7	4	5	8	0	50	-10							

б) Выполните задание 2 для упругого удара.

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	6	6	3	3	0	50	-50							
2	6	6	5	3	0	50	-50							
3	6	6	10	3	0	50	-50							
4	6	6	3	5	0	50	-50							
5	6	6	3	10	0	50	-50							
6	6	6	3	3	0	100	-50							
7	6	6	3	3	0	50	-100							

б') Выполните задание 2 для неупругого удара.

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_s$	$E_w$
1	6	6	3	3	0	50	-50							
2	6	6	5	3	0	50	-50							
3	6	6	10	3	0	50	-50							
4	6	6	3	5	0	50	-50							
5	6	6	3	10	0	50	-50							
6	6	6	3	3	0	100	-50							
7	6	6	3	3	0	50	-100							

в) Выполните задание 3 для упругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	4	4	3	3	0	50	-20							
2	4	4	3	3	2	50	-20							
3	4	4	3	3	7	50	-20							
4	4	4	3	3	2	20	-50							
5	4	4	3	3	2	-20	-50							
6	4	4	3	3	7	-20	-50							
7	4	4	10	3	2	50	-20							
8	4	4	20	3	2	50	-20							
9	4	4	3	10	2	50	-20							
10	4	4	3	20	2	50	-20							

в') Выполните задание 3 для неупругого удара

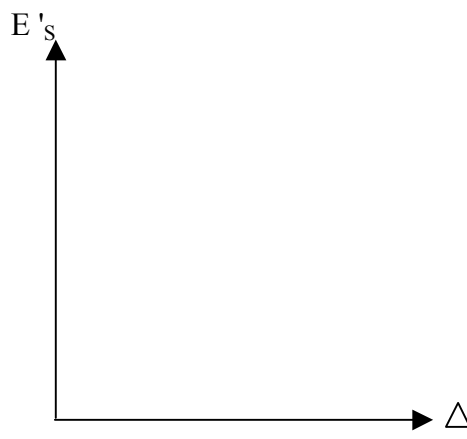
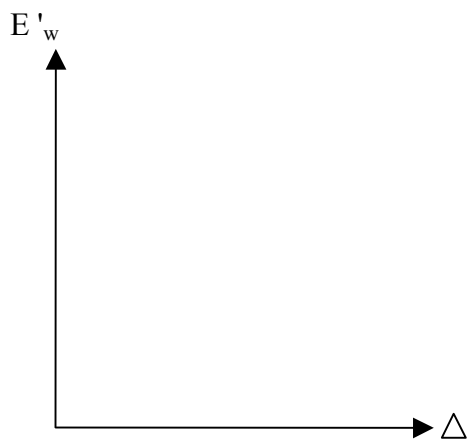
№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_w$	$E'_s$
1	4	4	3	3	0	50	-20							
2	4	4	3	3	2	50	-20							
3	4	4	3	3	7	50	-20							
4	4	4	3	3	2	20	-50							
5	4	4	3	3	2	-20	-50							
6	4	4	3	3	7	-20	-50							
7	4	4	10	3	2	50	-20							
8	4	4	20	3	2	50	-20							
9	4	4	3	10	2	50	-20							
10	4	4	3	20	2	50	-20							

г) Выполните задание 4 для неупругого удара при следующих параметрах

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_w$	$E'_s$
1	4	4	5	8	1	100	0							
2	4	4	10	8	1	100	0							
3	4	4	20	8	1	100	0							
4	4	4	80	30	1	100	0							
5	4	4	8	20	1	100	0							
6	4	4	8	10	1	100	0							
7	4	4	8	10	2	100	0							
8	4	4	8	10	3	100	0							
9	4	4	8	10	5	100	0							
10	4	4	8	10	7	100	0							

График зависимости энергии вращения системы от прицельного параметра

График зависимости тепловой энергии системы от прицельного параметра



Графики выполняются на миллиметровой бумаге.

### Вариант 3

а) Выполните задание 2 для упругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	4	5	10	5	0	20	-20							
2	4	5	20	5	0	20	-20							
3	4	5	30	5	0	20	-20							
4	4	5	5	10	0	-20	-60							
5	4	5	5	20	0	-20	-60							
6	4	5	5	30	0	-20	-60							

а') Выполните задание 2 для неупругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_{к}$	$E'_s$	$E_w$
1	4	5	10	5	0	20	-20							
2	4	5	20	5	0	20	-20							
3	4	5	30	5	0	20	-20							
4	4	5	5	10	0	-20	-60							
5	4	5	5	20	0	-20	-60							
6	4	5	5	30	0	-20	-60							

б) Выполните задание 3 для упругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	6	6	4	4	0	50	-50							
2	6	6	4	4	5	50	-50							
3	6	6	4	4	10	50	-50							
4	6	6	10	4	5	50	-50							
5	6	6	20	4	5	50	-50							
6	6	6	20	4	10	50	-50							
7	6	6	4	10	5	50	-50							
8	6	6	4	20	5	50	-50							
9	6	6	4	4	5	100	-50							
10	6	6	4	4	5	50	-100							

б') Выполните задание 3 для неупругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_{к}$	$E'_s$	$E_w$
1	6	6	4	4	0	50	-50							
2	6	6	4	4	5	50	-50							
3	6	6	4	4	10	50	-50							
4	6	6	10	4	5	50	-50							
5	6	6	20	4	5	50	-50							
6	6	6	20	4	10	50	-50							
7	6	6	4	10	5	50	-50							
8	6	6	4	20	5	50	-50							
9	6	6	4	4	5	100	-50							
10	6	6	4	4	5	50	-100							

в) Выполните задание 1 для упругого удара

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$U_1$	$U_2$	$E'_{к1}$	$E'_{к2}$	Угол разлета
1	10	10	5	5	0	20	-20							
2	2	10	5	5	0	20	-20							
3	3	10	5	5	0	20	-20							
4	10	2	5	5	0	20	-20							
5	2	10	5	5	0	20	-20							
6	10	10	5	5	0	100	0							
7	10	10	5	5	0	100	-50							
8	10	10	5	5	0	-50	-100							

в') Выполните задание 1 для неупругого удара

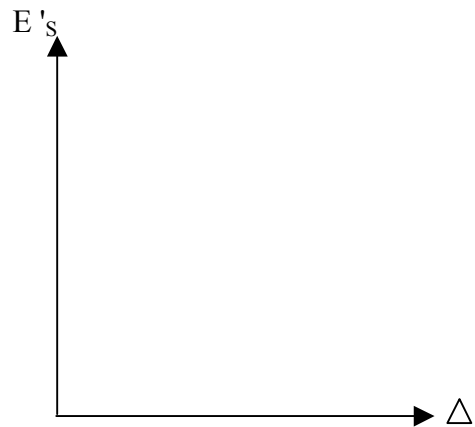
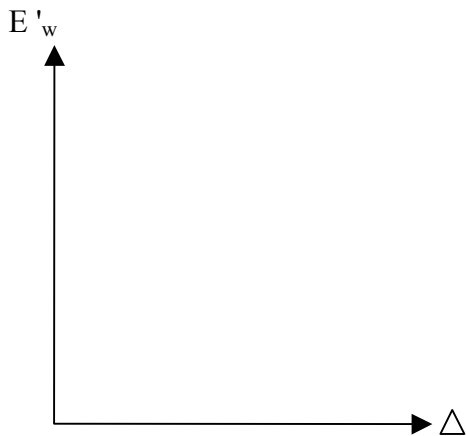
№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_w$	$E'_s$
1	10	10	5	5	0	20	-20							
2	2	10	5	5	0	20	-20							
3	3	10	5	5	0	20	-20							
4	10	2	5	5	0	20	-20							
5	2	10	5	5	0	20	-20							
6	10	10	5	5	0	100	0							
7	10	10	5	5	0	100	-50							
8	10	10	5	5	0	-50	-100							

г) Выполните задание 4 для неупругого соударения

№ п/п	$R_1$	$R_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta$	$v_1$	$v_2$	$\omega$	$U$	$E_{к1}$	$E_{к2}$	$E'_к$	$E'_w$	$E'_s$
1	8	8	10	20	5	40	0							
2	8	8	20	20	5	40	0							
3	8	8	40	20	5	40	0							
4	8	8	60	20	5	40	0							
5	8	8	20	10	5	40	0							
6	8	8	40	10	5	40	0							
7	8	8	40	10	8	40	0							
8	8	8	40	10	10	40	0							
9	8	8	40	10	12	40	0							
10	8	8	40	10	14	40	0							

График зависимости энергии вращения системы от прицельного параметра

График зависимости тепловой энергии системы от прицельного параметра



Графики выполняются на миллиметровой бумаге.