

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Амурский государственный университет

Инженерно-физический факультет  
Кафедра физики

Лабораторный практикум по общей физике  
(Механика)

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-3**  
**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРА**

Благовещенск

2018

*Рекомендовано*  
*учебно-методическим советом университета*

*Рецензент:*

А.Ю. Милинский, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики БГПУ

Козачкова О.В. (составитель)

Лабораторная работа «Изучение закономерностей центрального удара»  
(сост. О.В. Козачкова). – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2018.

Пособие содержит описание и инструкцию по выполнению лабораторной работы раздела «Механика», входящего в общий физический практикум.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 03.03.02. – «Физика», а также для студентов технических направлений подготовки, выполняющих физический практикум.

***В авторской редакции***

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-3

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРА

**ЦЕЛЬ:** исследовать закономерности центрального удара; определить силу удара, потери механической энергии и коэффициент восстановления при центральном ударе шаров.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** установка для исследования процесса удара шаров, набор шаров из различных материалов.

#### *ОСНОВЫ ТЕОРИИ*

Под столкновением двух или большего числа тел, в широком смысле, подразумеваются такие их взаимодействия, при которых между телами возникают кратковременные силы. Величина их столь значительна, что роль всех других, постоянно действующих сил, можно считать несущественной.

Физические закономерности, возникающие при ударе двух тел, широко используются в науке и технике, например, при расчете механизмов и испытании различных материалов и конструкций на прочность, изучении расхода и потерь энергии в подобных процессах. Примеры соударений: удар бильярдных шаров, столкновение машин на дорогах, столкновение молекул и атомов т.д. Изучение столкновений (рассеяний) микрочастиц в ускорителях позволяет определять характер полей, создаваемых ими, и другие важные свойства.

В описании процесса удара важную роль играют законы сохранения импульса и механической энергии.

**Закон сохранения импульса.** В замкнутой системе тел полный импульс с течением времени не изменяется. Происходит лишь обмен импульсами между различными телами системы. На практике закон сохранения импульса применяется и в незамкнутых системах в следующих случаях.

1. Внешние силы малы и действуют короткое время, так что изменением импульса системы можно пренебречь.

2. Равна нулю проекция внешних сил на какое-либо направление. В этом случае сохраняется лишь соответствующая проекция импульса.

**Закон сохранения энергии.** Мерой изменения и превращения энергии в механике является работа. Если в системе действуют неконсервативные силы – силы трения, неупругой деформации, – то происходит превращение части механической энергии во внутреннюю. Работа внешних сил характеризует обмен энергией с другими системами.

Поэтому механическая энергия системы будет сохраняться если отсутствуют диссипативные процессы, (т.е. равна нулю работа неконсервативных сил), а также равна нулю работа внешних сил.

**Процесс удара. Основные определения.** При соударениях друг с другом, тела претерпевают деформации. При этом кинетическая энергия, которой они обладают перед ударом, на короткое время преобразуется в потенциальную энергию деформации или превращается во внутреннюю энергию этих тел. Во время удара имеет место перераспределение энергии между телами.

Различают упругие и неупругие соударения. Предельными идеализированными случаями столкновений являются *абсолютно упругий* и *абсолютно неупругий удары*.

При *абсолютно упругом* ударе механическая энергия тел не переходит в другие, немеханические виды энергии. Деформация тел носит упругий характер, а после удара тела имеют суммарно такую же кинетическую энергию, что и до удара. Абсолютно упругий удар – это физическая абстракция, он в природе не происходит. Следовательно, часть механической энергии всегда превращается во внутреннюю энергию - теплоту, неупругую деформацию и т.п. Но если эти эффекты ничтожны и потерями энергии, в целом, можно пренебречь, то удар называется просто *упругим*.

Если после столкновения внутреннее состояние тел изменяется, например, тела не восстанавливают свою первоначальную форму, или столкновение со-

проводится превращением кинетической энергии тел в другие виды энергии, то такое столкновение называется *неупругим*. При неупругом ударе в телах возникают разнообразные явления: сохраняется остаточная деформация; проявляют себя также силы трения, в телах возбуждаются колебания и волны. Поэтому принято говорить, что при неупругом ударе между телами действуют силы неупругой деформации, имеющие неконсервативный характер.

Если в результате работы этих сил, к моменту окончания удара, скорости тел становятся одинаковыми, и в дальнейшем тела движутся как одно целое, то столкновение тел называется *абсолютно неупругим*. В этом случае имеет место частичная или полная потеря механической энергии вследствие преобразования ее в немеханические формы.

Примерами абсолютно неупругих столкновений являются попадание пули в подвижную мишень, например, в платформу с песком. Пуля, застряв в песке, движется дальше вместе с платформой. Шары из пластилина, воска или глины при столкновении обычно слипаются и затем движутся как единое целое. Аналогичное поведение наблюдается при столкновении двух разноименных ионов, сопровождающееся образованием молекулы, захвате свободного электрона положительным ионом и т.д.

Удар может быть прямым или косым в зависимости от направления векторов скоростей центров масс соударяющихся тел. Удар называется прямым и центральным, если общая нормаль к поверхностям тел в точке касания (линия удара) проходит через их центры масс (рис.1, а). При косом ударе это условие не выполняется (рис.1, б). (В дальнейшем рассматриваются лишь прямые центральные удары).

Рассматривая столкновения, мы также допускаем, что:

- а) исходная система отсчета инерциальная;
- б) система из двух шаров замкнута;
- в) потенциальной энергией взаимодействия шаров (например, гравитационного) и их вращением пренебрегаем.

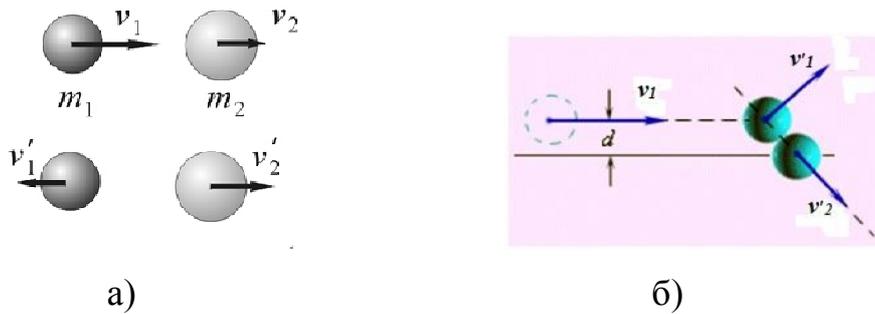


Рис. 1. Центральный (а) и косой (б) удар шаров.

При столкновении изменение импульса каждого шара  $\Delta p$  за время  $\Delta t$  в соответствии со вторым законом Ньютона равно

$$\Delta p = F \Delta t, \quad (1)$$

где  $F$  – средняя за время  $\Delta t$  сила, действующая на шар.

Если система замкнута, между телами происходит лишь обмен импульсами. Полный же импульс системы остается неизменным.

В первой фазе удара силы деформации уравнивают скорости тел. В общем случае, кинетическая энергия относительного движения на короткое время преобразуется в потенциальную энергию упругой деформации и частично – в энергию молекулярного движения (внутреннюю энергию).

Во второй фазе удара форма тел восстанавливается, и потенциальная энергия вновь превращается в кинетическую (тела разлетаются).

При абсолютно упругом ударе отсутствуют неупругие деформации, поэтому во второй фазе удара потенциальная энергия вновь превращается в кинетическую, равную суммарной кинетической энергии шаров до удара. Следовательно, выполняются законы сохранения импульса и механической энергии. Сравнивая состояния до и после удара можно записать:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (2)$$

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

Решение этой системы уравнений позволяет вычислить скорости тел после удара  $v'_1$  и  $v'_2$ .

В случае абсолютно неупругого удара вторая фаза отсутствует, при этом механическая энергия не сохраняется, и тела движутся в одну сторону с одина-

ковой скоростью (не разлетаются):  $v'_1 = v'_2 = v'$ . По закону сохранения импульса

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v' \quad (4)$$

Применяя закон сохранения энергии в случае частично упругого удара, необходимо учесть потери механической энергии, связанные с работой молекулярных сил (сил неупругой деформации):

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} + A \quad (5)$$

### *СХЕМА УСТАНОВКИ*

Лабораторная установка для исследования процесса удара (рис. 2) представляет собой модуль, состоящий из панели (1) с двумя шкалами, на которой установлены две оси (2) для подвесов шаров, арретир (3) с зажимным винтом (4) и с пусковым устройством (5), указатель максимального отклонения (6). Подвес шара содержит пружинный держатель (7) и легкий стержень (8) с крючком для подвешивания на оси панели. В держатель вставляется шар (9). Расстояние центра шара от оси подвеса равно  $300 \pm 1$  мм.

Время удара определяется по времени электрического замыкания шаров при ударе. Для этого кабель (11) подключается к осям подвеса, а с другой стороны к гнезду «5» на задней панели измерительной системы ИСМ-1, расположенной под платформой установки. Схема передней панели ИСМ-1 показана на рисунке 3. Время разрешения таймера устанавливается 0,1 мс. Цифры на экране дисплея указывают время в микросекундах. Тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР» должен быть установлен в позиции «ОДНОКР».

Для проведения эксперимента панель монтируется на колонне (10) стойки. Арретир (3) отклоняется на заданный угол и слегка зажимается винтом (4). Подвес шара отклоняется на несколько больший угол, головка спускового устройства (5) поворачивается так, чтобы соединенный с ней штырь расположился горизонтально, после чего держатель шара опускается на этот штырь. Для опускания шара нужно повернуть головку спускового устройства на  $90^\circ$ , стараясь не вызвать колебания стойки.



Рис. 2. Установка для исследования процесса удара.

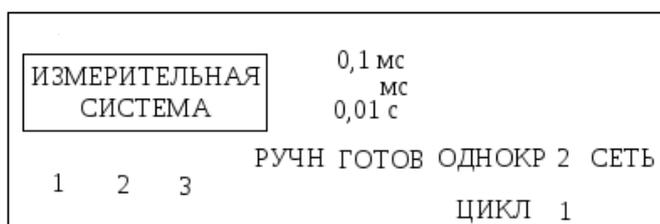


Рис. 3. Передняя панель измерительной системы ИСМ-1.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для осуществления удара необходимо арретир установить на нужный угол начального отклонения подвеса  $\alpha_1$  и зацепить подвес шара за спусковое устройство, затем нажать кнопку «ГОТОВ» на панели измерительной системы. Повернув головку спускового устройства, освободить правый шар. После соударения правого шара с первоначально неподвижным левым шаром, зафиксировать угол  $\alpha'_2$ , на который отклонился левый шар вследствие удара. Время удара прочитать на дисплее таймера измерительного устройства.

Вблизи положения равновесия проекция внешних сил на горизонтальную ось равна нулю. Так как продолжительность удара мала, то в течение процесса

столкновения шары находятся вблизи равновесного положения, поэтому при ударе происходит лишь обмен импульсами между шарами. Суммарный же импульс шаров не изменяется.

Скорость шара  $v$  в нижней точке можно вычислить по его отклонению при помощи закона сохранения энергии. В системе шар – гравитационное поле Земли действует консервативная сила тяжести. Сила натяжения нити работы не совершает. Поэтому на участке разгона потенциальная энергия шара в поле тяжести будет превращаться в его кинетическую энергию (рис. 4).

$$\frac{mv^2}{2} = mgh, \quad (6)$$

где  $h$  – высота подъема шара, связанная с его отклонением.

Тогда  $v = \sqrt{2g \cdot h}$ .

Высоту подъема шара и его скорость можно вычислить по отклонению

$$h = l - l \cdot \cos \alpha = 2l \cdot \sin^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right),$$

$$v = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g \cdot l} \approx \alpha \sqrt{g \cdot l}. \quad (7)$$

Здесь мы учли, что для малых углов  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Такая же формула связывает скорость каждого шара и после удара с его последующим отклонением.

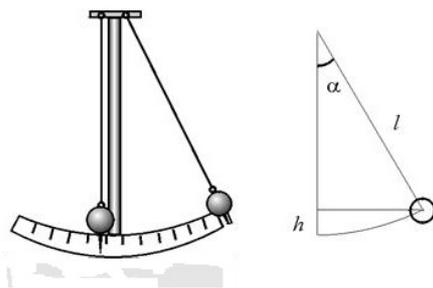


Рис. 4. К расчету скорости шара по углу отклонения.

Поскольку скорость  $v_1'$  правого шара после удара на данной установке нельзя установить с достаточной точностью, исключим ее, используя закон сохранения импульса. При  $m_1 = m_2 = m$  и  $v_2 = 0$  из формулы (2) находим:

$$v_1' = v_1 - v_2. \quad (8)$$

Кинетическая энергия системы до удара определяется скоростью правого шара, так как левый был неподвижен

$$E_k = \frac{mv_1^2}{2} \quad (9)$$

Кинетическая энергия шаров после удара

$$E'_k = \frac{mv_1'^2}{2} + \frac{mv_2'^2}{2} \quad (10)$$

С учетом (8), формулу (10) можно выразить через измеряемые величины  $v_1'$  и  $v_2'$ :

$$E'_k = \frac{m(v_1 - v_2')^2}{2} + \frac{mv_2'^2}{2} \quad (11)$$

Коэффициент восстановления энергии находим как отношение

$$K = \frac{E'_k}{E_k} \quad (12)$$

Подставляя в (12) выражения (10) и (11), после несложных преобразований, получим для коэффициента  $K$  следующее выражение:

$$K = \frac{E'_k}{E_k} = 1 + 2 \left[ \left( \frac{v_2'}{v_1} \right)^2 - \frac{v_2'}{v_1} \right] \quad (13)$$

Работу сил неупругой деформации ( $A$ ) можно найти, выразив ее из формулы (5) с использованием формул (9) и (11). После преобразований приходим к равенству:

$$A = m(v_1 v_2' - v_2'^2). \quad (14)$$

Силу удара целесообразно вычислить по изменению импульса левого шара, так как его скорость до удара  $v_2 = 0$ , а после удара  $v_2'$  - измеряется в ходе эксперимента. В соответствии с формулой (1) получаем

$$F = \frac{\Delta p_2}{\Delta t} = \frac{m(v_2' - v_2)}{\Delta t} = \frac{mv_2'}{\Delta t}, \quad (15)$$

где  $\Delta t$  – время удара.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Подготовьте установку к работе (см. «методика эксперимента»).
2. Заготовьте таблицу:

$\alpha_1$ , град	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$v_1$ , м/с									
$\alpha'_2$ , град									
$v_2$ , м/с									
$\Delta t$ , с									
$A$ , Дж									
$F$ , Н									
$K$									

3. Отведите правый шар на угол  $\alpha_1 = 5^\circ$  от вертикали. Освободите шар, повернув головку спускового устройства, зафиксируйте угол  $\alpha'_2$ , на который отклонился левый шар, время удара  $\Delta t$  считайте с дисплея секундомера. Данные запишите в таблицу.
4. Повторите п.3 для других углов  $\alpha_1$  ( $10^\circ$ - $40^\circ$ , с интервалом в  $5^\circ$ ).
5. Вычислите  $v_1$ ,  $v_2$  по формуле (7), где угол  $\alpha$  необходимо выразить в радианах.
6. Вычислите силу удара  $F$  по формуле (15).
7. Вычислите работу неупругой деформации  $A$  и коэффициент восстановления энергии  $K$  по формулам (14) и (13), соответственно.
8. Постройте графики зависимости  $F = F(\alpha_1)$  и  $A = A(\alpha_1)$ .
9. Проанализируйте характер вышеуказанных зависимостей. Зависит ли коэффициент восстановления энергии  $K$  от исходной механической энергии системы? Сделайте выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие взаимодействия называют столкновением (ударом)?
2. Дайте определение прямому центральному удару, косому удару.
3. В чем заключается закон сохранения импульса? В каких системах он выполняется? Почему он является фундаментальным законом природы?

4. На каком участке траектории в лабораторной установке выполняется закон сохранения импульса? На каком - не выполняется?
5. В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии? Почему он является фундаментальным законом природы?
6. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется? Почему механическая энергия не сохраняется при частично упругом ударе?
7. Какой удар называют абсолютно упругим? Абсолютно неупругим? Какие законы сохранения выполняются в случае таких ударов?
8. Опишите превращения энергии в процессе удара. Какая часть энергии испытывает превращения?
9. Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара? Следствием каких законов являются эти выражения?
10. Как в эксперименте определяется скорость шара до и после удара? Выведите формулу (8).
11. Выведите формулы для работы неупругой деформации  $A$  (14) и коэффициента восстановления энергии  $K$  (13).
12. Как в данной работе определяется сила удара  $F$ ? Какой закон лежит в основе способа ее определения?

### *Литература*

1. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. — 20-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2014. — 560 с. ISBN 978-5-4468-0627-0
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики [Текст] : в 5 т.: учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ Т. 1 : Механика/ Д. В. Сивухин. - 5-е изд., испр. - М. : Физматлит, - 2010. - 560 с. - ISBN 978-5-9221-0715-0.
3. Савельев И.В. Курс физики [Текст] : в 5 т.: учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ Т. 1 : Механика. Молекулярная физика. /И.В.Савельев .– М.: Изд-во: Лань. – 2007. ISBN: 978-5-8114-0685-2
4. Грабовский, Р.И. Курс физики: учеб. пособие. / Р.И. Гробовский.-12-е изд., стер.- СПб.: Лань, 2012.- 608 с.- (Учебники для вузов. Специальная литература) – (ЭБС Лань).

**Козачкова Ольга Владимировна,**  
*доцент кафедры физики АмГУ, канд. пед. наук*

**Лабораторная работа «Изучение закономерностей центрального удара»**

---

Заказ 63.