

*Отчёт должен содержать:*

- фамилию, инициалы и номер группы студента;
- номер работы и её полное название;
- цель работы;
- перечень приборов и принадлежностей с указанием их технических характеристик;
- расчётные формулы и формулы для вычисления погрешностей (без вывода, но с расшифровкой обозначений);
- таблицы результатов измерений;
- графики экспериментальных точек (если требуется по заданию) с указанием доверительных интервалов для каждой точки (если требуется по заданию) и модельной непрерывной прямой, построенной с использованием метода наименьших квадратов;
- средние (наиболее вероятные) значения определяемых величин с указанием доверительных интервалов и относительных погрешностей для них;
- выводы по работе с оценкой достоверности полученных результатов;
- дату оформления отчёта и подпись студента.

Отчёт сдаётся преподавателю и хранится на кафедре.

В ходе защиты отчёта студент получает вопросы (примерный перечень в конце каждого описания в настоящем пособии). Вопросы могут касаться порядка выполнения, устройства и принципа работы установки, теоретических аспектов работы и обработки данных с вычислением погрешностей. В отличие от вопросов допуска вопросы защиты требуют углублённого знания теории, вывода расчётных формул и общего курса физики в рамках семинарских и лекционных занятий по данной теме.

При успешной защите отчёт передаётся преподавателю, в маршрутном листе студента делается соответствующая отметка и проставляется оценка.

**Внимание!** Без соответствующей отметки о сдаче и оценки в маршрутном листе проделанная работа считается не сданной и в общий зачёт не включается.

# Работа М1

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИКИ УДАРА

**Цель работы:** Изучение механики удара на примере прямого центрального соударения шаров с использованием компьютерной модели и натурального эксперимента.

### ВВЕДЕНИЕ

Перед началом работы рекомендуем проработать материал по пособиям [1] - [4]. Список литературы в конце данного описания.

Одним из видов взаимодействия, широко распространённым в природе, является чисто механическое взаимодействие — удар.

Ударом (соударением) движущихся твёрдых тел называется взаимодействие этих тел, проявляющееся при их механическом контакте и сопровождающееся деформацией и изменением характера движения.

В общем случае механическое соударение может наблюдаться у твёрдых тел, элементарных частиц, атомов и молекул и сопровождаться как изменением характера движения, так и их энергетического состояния (поглощение и испускание энергии).

Следствием механического удара может быть остаточная деформация взаимодействующих тел, звуковые колебания, нагревание, изменение их механических свойств (в частности упрочнение материала), химические превращения и др. При скоростях соударения, превышающих критические, происходит разрушение тел при ударе. Критические скорости при ударе для металлов имеют порядок 15 м/с (медь) — 150 м/с (высококачественные стали). В месте удара на площадках контакта за время взаимодействия  $\tau$  ( $\sim 10^{-4} + 10^{-5}$  с) могут развиваться гигантские давления (напряжения) — до  $10^4 + 10^5$  атм ( $10^9 + 10^{10}$  Па).

В качестве меры механического взаимодействия тел вводится импульс ударной силы или ударный импульс

$$S = \int_0^{\tau} F(t) dt = F_{cp} \tau, \quad (1)$$

где  $F(t)$ ,  $F_{\text{ср}}$  — меняющаяся во времени при ударе и средняя за время удара  $\tau$  силы соответственно.

При этом среднее давление, развиваемое на контактной площадке  $s$ ,

$$p_{\text{ср}} = F_{\text{ср}}/s = S/(\tau \cdot s). \quad (2)$$

Удар называется **абсолютно упругим**, если соударяющиеся тела являются абсолютно упругими. При этом кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию упругой деформации и обратно. При абсолютно упругом взаимодействии (ударе) выполняются законы сохранения механической энергии и импульса системы взаимодействующих тел.

Удар называется **абсолютно неупругим**, если соударяющиеся тела являются абсолютно неупругими, при этом кинетическая энергия переходит во внутреннюю энергию соударяющихся тел. Закон сохранения импульса также как и при упругом взаимодействии выполняется, но механическая (кинетическая) энергия не сохраняется\*.

Реальный удар всегда является не абсолютно упругим, или частично упругим (не абсолютно неупругим — частично неупругим).

Если центры масс взаимодействующих тел  $C_1$  и  $C_2$  (см. рис. 1) лежат на линии удара, то удар называется **центральной**, в противном случае — **нецентральной**. Если скорости  $v_1$  и  $v_2$  центров масс первого и второго тела соответственно в начале удара

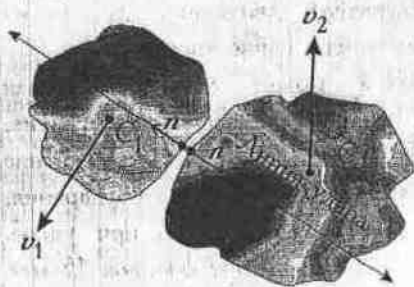


Рис. 1. Косой нецентральный удар двух тел

\* Заметим, что во всех явлениях природы (физических процессах) полная энергия сохраняется всегда. В нашем случае это означает сохранение суммарной механической (кинетической) и внутренней энергии взаимодействующих тел при неупругом ударе.

направлены параллельно линии удара, то удар называется прямым, в противном случае — косым.

Потери механической энергии в реальном ударе характеризует коэффициент восстановления относительной скорости  $K_C$  или коэффициент восстановления энергии  $K_{\mathcal{E}}$ . При прямом центральном ударе двух гладких тел (шаров) без учета их вращения

$$K_C = \frac{|u_1 - u_2|}{|v_1 - v_2|} = -\frac{u_1 - u_2}{v_1 - v_2}, \quad (3)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости первого и второго шара соответственно до удара;  $u_1$  и  $u_2$  — скорости первого и второго шара после удара (см. рис. 2).



Рис. 2. Прямой центральный удар

При неподвижном до удара втором шаре ( $v_2 = 0$ ) с учётом знака скорости

$$K_C = \frac{|u_1 + u_2|}{v_1}, \quad (3')$$

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2}{m_1 v_1^2}, \quad (4)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы первого и второго шара\*.

Для абсолютно упругого удара  $K_C = K_{\mathcal{E}} = 1$ , для абсолютно неупругого —  $K_C = 0$ ,  $K_{\mathcal{E}} = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$ .

Скорости шаров после удара как функции от  $K_C$  можно определить по формулам

$$u_1 = v_1 - \frac{(1 + K_C)m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2), \quad (5)$$

\* Здесь и далее вращательной энергией и трением шаров при движении пренебрегаем.

$$u_2 = v_2 + \frac{(1+K_C)m_1}{m_1+m_2}(v_1-v_2). \quad (6)$$

Импульс ударной силы

$$S = (1+K_C) \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} (v_1-v_2), \quad (7)$$

и изменение кинетической энергии

$$\Delta T^* = \frac{(1-K_C^2)}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} (v_1-v_2)^2. \quad (8)$$

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

В работе нужно определить коэффициент восстановления  $K_C$  и коэффициент восстановления энергии  $K_E$  в реальном центральном ударе шаров равной массы ( $m_1 = m_2$ ), подвешенных на нитях одинаковой длины  $l$  в предположении, что удар абсолютно упругий (задание 1), а также при компьютерном моделировании частично неупругого удара (задание 2). Удар происходит после того, как шар  $m_1$  отклоняется на угол  $\alpha$  и затем отпускается. После удара шар  $m_1$  отклоняется на угол  $\alpha'$  (при абсолютно упругом ударе одинаковых шаров  $\alpha' = 0$ ), а шар  $m_2$  - на угол  $\beta'$  (см. рис. 3).

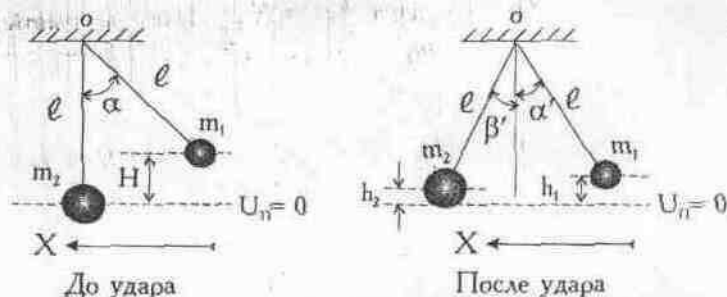


Рис. 3. Схема удара, реализуемая в реальном и компьютерном эксперименте

Для расчётов принимаются следующие условия: нити нерастяжимые, сопротивление воздуха отсутствует,  $v_2 = 0$ .

Из закона сохранения механической энергии\* для скоростей правого (первого) шара до удара:

$$v_1 = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g\ell}, \quad (9)$$

правого шара после удара:

$$u_1 = 2 \sin \frac{\alpha'}{2} \sqrt{g\ell} \quad (10)$$

левого (второго) шара после удара:

$$u_2 = 2 \sin \frac{\beta'}{2} \sqrt{g\ell}. \quad (11)$$

Теперь можно определить  $K_C$  и  $K_{\mathcal{E}}$

$$K_C = \frac{u_1 + u_2}{v_1} = \frac{\sin \frac{\alpha'}{2} + \sin \frac{\beta'}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (12)$$

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2}{m_1 v_1^2} = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha'}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\beta'}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (13)$$

Если допустить равенство масс  $m_1 = m_2 = m$  и малость конечной скорости правого шара  $u_1 \rightarrow 0$  и его угла отклонения после удара  $\alpha' \rightarrow 0$  (что строго выполнимо только для абсолютно упругого удара), то для такого удара\*\* можно определить

$$K_C = \frac{u_2}{v_1} = \frac{\sin \frac{\beta'}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (14)$$

\* За нулевой уровень потенциальной энергии  $U_{\Pi} = 0$  принимается положение центра масс левого шара до удара (см. рис. 3).

\*\* В экспериментальной установке, используемой в данной работе, допускается возможность регистрации только угла отклонения левого шара после удара  $\beta'$ .

$$K_{\text{Э}} = \frac{u_2^2}{v_1^2} = \frac{\sin^2 \frac{\beta'}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} = K_C^2. \quad (15)$$

В этом допущении коэффициент восстановления энергии  $K_{\text{Э}}$  представляет собой относительную долю кинетической энергии системы после удара.

Также импульс ударной силы можно записать в виде

$$S = (1 + K_C) \frac{mv_1}{2} = m\sqrt{gl}(1 + K_C) \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (16)$$

а относительная потеря кинетической энергии при ударе будет

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1 - K_C^2}{2} = \frac{1 - K_{\text{Э}}}{2}. \quad (17)$$

Относительная доля механической энергии, перешедшей во внутреннюю энергию при ударе, определяется как

$$\frac{\Delta U}{T} = 1 - K_{\text{Э}}. \quad (18)$$

## Описание экспериментальной установки и компьютерной модели

Работа выполняется в два этапа: Первый этап (задание 1) предполагает работу с реальной установкой, на которой получают экспериментальные значения  $K_C$  и  $K_{\text{Э}}$ , рассчитывается величина ударного импульса  $S$  и среднее давление  $p_{\text{ср}}$  за время удара  $t$ . На втором этапе (задание 2) выполняется работа на компьютерной модели, имитирующей реальный эксперимент. В результате получают модельные значения  $K_C$  и  $K_{\text{Э}}$  с соответствующими погрешностями измерений.

### Экспериментальная установка

Установка реализует прямой, центральный удар гладких шаров с возможностью фиксации начального угла отклонения одного из них и конечного (угла отскока) другого. В установке также предусмотрено

измерение времени удара, т.е. времени, в течение которого шары находятся в контакте.

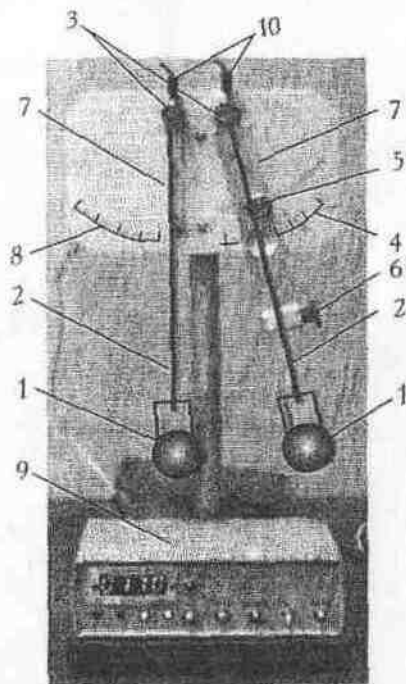


Рис. 4. Экспериментальная установка

Общий вид установки приведен на рис. 4. Шары 1 ( $m_1$  и  $m_2$  на рис. 3) вставляются в пружинные держатели, закреплённые на штангах 2 с крючками. Крючки подвешиваются к осям 3. Расстояние от центра шара до оси подвеса  $l = 300 \pm 1$  мм. Кронштейн 11 отклоняется на заданный угол (считывается по шкале 4) и слегка зажимается винтом 5. Фиксатор начального положения 6 поворачивается против хода часовой стрелки (на себя) так, чтобы удерживающий правый шар ( $m_1$  на рис. 3) штырь расположился горизонтально. После этого штанга правого шара кладётся на этот штырь. Для отпускания шара нужно плавно повернуть головку фиксатора на  $90^\circ$  по ходу часовой стрелки (от

себя).

Начальное положение левого шара ( $m_2$  на рис. 3) фиксируется кронштейном 7, риска которого устанавливается на нулевое деление шкалы 8.

На рисунке также показаны: измерительная система 9, соединённая кабелем с контактными клеммами 10 токопроводящих штанг и держателей шаров 2.

Время удара определяется продолжительностью электрического контакта шаров при ударе — фиксируется измерительной системой и отображается на индикаторной панели (см. рис. 5).



Индикаторная панель 1 при установке переключателя выбора диапазона измерения времени 3 в положение «0.1 мс» показывает время удара в миллисекундах.

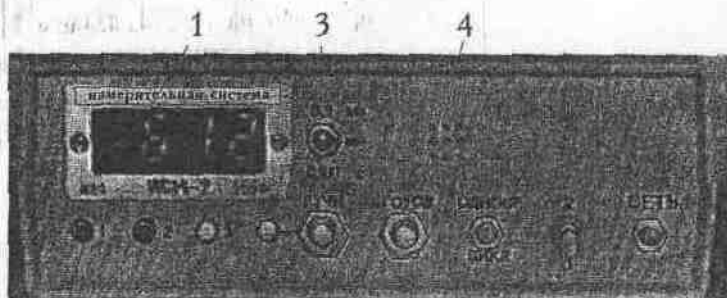


Рис. 5. Панель управления измерительной системы

Лампы 2 и 3 (2 на рис. 5) загораются в момент готовности прибора к измерению времени удара. За панелью прибора в области 1 установлен динамик, дающий звуковой сигнал, в момент соприкосновения шаров при ударе.

### Компьютерная модель

Компьютерная модель представляет собой машинную программу, выполняемую в рамках операционной системы MS DOS и включающую графическую и расчётную части. Программа требует задания условий эксперимента (массы, длина нити, начальные углы), позволяет наблюдать процесс удара, иллюстрирует ход эксперимента и автоматически проводит вычисления средних значений углов отклонения и величин  $K_C$ ,  $K_{\Sigma}$  с соответствующими погрешностями. При выполнении программы нужно строго следовать появляющимся на экране указаниям.

### Задание 1. Экспериментальное изучение процесса столкновения двух одинаковых шаров

Задание выполняется в следующей последовательности:

1. Привести установку в исходное состояние для чего:

- установить переключатели на панели управления (рис. 5) в положения: «0.1 мс-0.01 с» в положение «0.1 мс» (вверх  $\uparrow$ ), «1-2» в «1» (вниз  $\downarrow$ ), «ОДНОКР.ЦИКЛ» в «ОДНОКР» ( $\uparrow$ );

- включить тумблер «СЕТЬ» ( $\uparrow$ ) и нажать кнопки «РУЧН» и «ГОТОВ». При этом загораются индикаторные лампы «3» и «РУЧН», а индикаторное табло обнуляется «000.0».

2. Установить пару стальных шаров 1 в пружинные держатели (рис. 4) и зафиксировать первое значение угла отклонения правого ( $m_1$ ) шара  $\alpha_1 = 10^\circ$  и нулевое положение левого ( $m_2$ ) — риска кронштейна 7 устанавливается на нулевое деление шкалы 8 ( $\beta_1 = 0^\circ$ ).

3. Плавно поворачивая головку фиксатора начального положения против хода часовой стрелки (на себя), освободите правый шар. После удара остановите колебания левого и правого шаров и зафиксируйте показания индикатора (время удара  $\tau_1$ ) и угол отклонения левого шара  $\beta'_1$  по риску кронштейна 7 (рис. 4). Занесите полученные значения  $\beta'_1$  и  $\tau_1$  в табл. 1 (столбцы, соответствующие  $\alpha_1 = 10^\circ$ , строка 1).

4. Верните правый шар в исходное положение на фиксаторе, переведите кронштейн 7 в положение  $\beta_1 = 0^\circ$  (исходное положение) и нажмите кнопку «ГОТОВ» (обнулите индикатор). Теперь установка готова к следующему измерению.

5. Повторите опыт с начальным значением угла  $\alpha_1 = 10^\circ$  ещё 4 раза и заполните оставшиеся 4 строки таблицы для этого значения начального угла.

6. Проведите аналогичные серии измерений для начальных углов  $\alpha_2 = 15^\circ$  и  $\alpha_3 = 30^\circ$ .

7\*. Рассчитайте средние значения углов отклонения левого шара  $\bar{\beta}'_j = \sum_{i=1}^5 \beta'_{ij} / 5$  и среднего времени удара  $\bar{\tau}_j = \sum_{i=1}^5 \tau_{ij} / 5$  для серии из пяти ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) измерений для трёх значений начальных углов отклонения  $\alpha_{1,2,3}$  ( $j = 1 \rightarrow \alpha_1$ ,  $j = 2 \rightarrow \alpha_2$ ,  $j = 3 \rightarrow \alpha_3$ ). Занесите результаты в табл. 1, для окончательного заполнения которой потребуется ещё вычислить абсолютные погрешности отдельных

\* Этот пункт задания можно выполнить вне лаборатории в процессе домашней подготовки отчёта.

## Экспериментальные данные

Таблица 1

$$m_1 = m_2 = 285 \pm 1 \text{ г}$$

Стальные шары

№ опы- та	$\alpha_1 = 10^\circ$				$\alpha_2 = 15^\circ$				$\alpha_3 = 30^\circ$			
	$\beta_1', \circ$	$\Delta\beta_1', \circ$	$\tau_1, \text{с}$	$\Delta\tau_1, \text{с}$	$\beta_2', \circ$	$\Delta\beta_2', \circ$	$\tau_2, \text{с}$	$\Delta\tau_2, \text{с}$	$\beta_3', \circ$	$\Delta\beta_3', \circ$	$\tau_3, \text{с}$	$\Delta\tau_3, \text{с}$
1												
2												
3												
4												
5												
Средние значения	$\bar{\beta}_1' =$		$\bar{\tau}_1 =$		$\bar{\beta}_2' =$		$\bar{\tau}_2 =$		$\bar{\beta}_3' =$		$\bar{\tau}_3 =$	

Таблица 2

$$m_1 = m_2 = 308 \pm 1 \text{ г}$$

Латунные шары

№ опы- та	$\alpha_1 = 10^\circ$				$\alpha_2 = 15^\circ$				$\alpha_3 = 30^\circ$			
	$\beta_1', \circ$	$\Delta\beta_1', \circ$	$\tau_1, \text{с}$	$\Delta\tau_1, \text{с}$	$\beta_2', \circ$	$\Delta\beta_2', \circ$	$\tau_2, \text{с}$	$\Delta\tau_2, \text{с}$	$\beta_3', \circ$	$\Delta\beta_3', \circ$	$\tau_3, \text{с}$	$\Delta\tau_3, \text{с}$
1												
2												
3												
4												
5												
Средние значения	$\bar{\beta}_1' =$		$\bar{\tau}_1 =$		$\bar{\beta}_2' =$		$\bar{\tau}_2 =$		$\bar{\beta}_3' =$		$\bar{\tau}_3 =$	

Таблица 3

$$m_1 = m_2 = 102 \pm 1 \text{ г}$$

Латунные шары

№ опы- та	$\alpha_1 = 10^\circ$				$\alpha_2 = 15^\circ$				$\alpha_3 = 30^\circ$			
	$\beta_1', \circ$	$\Delta\beta_1', \circ$	$\tau_1, \text{с}$	$\Delta\tau_1, \text{с}$	$\beta_2', \circ$	$\Delta\beta_2', \circ$	$\tau_2, \text{с}$	$\Delta\tau_2, \text{с}$	$\beta_3', \circ$	$\Delta\beta_3', \circ$	$\tau_3, \text{с}$	$\Delta\tau_3, \text{с}$
1												
2												
3												
4												
5												
Средние значения	$\bar{\beta}_1' =$		$\bar{\tau}_1 =$		$\bar{\beta}_2' =$		$\bar{\tau}_2 =$		$\bar{\beta}_3' =$		$\bar{\tau}_3 =$	

измерений  $\Delta\beta'_{ij} = |\beta'_j - \beta'_{ij}|$  и  $\Delta\tau_{ij} = |\tau_j - \tau_{ij}|$  (необходимы для вычисления результирующих погрешностей параметров удара  $K_C$ ,  $K_\Sigma$ ,  $S$ ,  $\Delta T/T$  и  $\rho_{cp}$ ).

8. Выполните эксперименты с латунными и алюминиевыми шарами (последовательно заменяя их в пружинных держателях), для чего нужно вернуться к выполнению п.п. 1-7 данного задания. При этом заполняются табл. 2 и 3 соответственно.

9.\* Используя средние значения найденных параметров и из табл. 1 и 3, рассчитайте коэффициенты восстановления  $K_C$ ,  $K_\Sigma$  (формулы (14) и (15)), ударные импульсы  $S$  - (16), относительные потери кинетической энергии  $\Delta T/T$  - (17) и средние за время удара давления  $\rho_{cp}$  (в атм)\*\* - (2) для стальных, латунных и алюминиевых шаров при трёх значениях начальных углов  $\alpha_{1,2,3}$ . Площади контактных площадок при ударе примите равными: для латунных -  $5.0 \text{ мм}^2$ . Полученные данные занесите в табл. 4.

10. Для оценки абсолютных погрешностей  $\Delta K_C$  стальных шаров  $0.2 \text{ мм}^2$ , для алюминиевых -  $2.0 \text{ мм}^2$ , для используйте формулу относительных погрешностей  $\delta_{K_C} = \Delta K_C / K_C = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\beta^2}$ \*\*\*, где  $\delta_\alpha = \Delta\alpha/\alpha$  - относительная погрешность задания начального угла отклонения, полученная в предположении постоянства абсолютной погрешности  $\Delta\alpha = 1^\circ$  для всех  $\alpha$ . Для определения  $\delta_\beta = \Delta\beta'/\beta'$  рассчитайте  $\Delta\beta'_{1,2,3}$  как погрешность среднего по данным табл. 1-3, т.е.

$$\Delta\beta'_{1,2,3} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\beta'_i)^2 / n(n-1)}$$
 для пяти измерений ( $n = 5$ ) при каждом значении начального угла  $\alpha$ .

Для  $\Delta K_\Sigma$  используйте выражение погрешности показательной функции  $\Delta K_\Sigma = 2\Delta K_C$ . Также для  $\Delta(\Delta T/T) = \Delta K_\Sigma$ .

\* См. сноску на с. 15.

\*\* Для пересчёта давления примите  $1 \text{ атм} = 101 \text{ кПа} = 1.01 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$

\*\*\* Строгая оценка даёт сопоставимые с указанными значения погрешностей при более громоздких вычислениях.



## **Задание 2. Изучение процесса столкновения двух шаров на компьютерной модели**

Для выполнения задания необходимо активировать (запустить) программу **f8.exe**, выполняемую под управлением MS DOS, расположенную в директории, указанной лаборантом, и далее:

1. После появления на мониторе компьютера заставки "лабораторный практикум ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ" нажмите любую клавишу клавиатуры.

2. Вы попадаете в окно "Вход в работу", где должны нажать клавишу **F8** в верхнем ряду клавиатурных клавиш (функциональные клавиши).

3. В раскрывшемся окне вы должны ввести номер бригады (любую цифру или символ на клавиатуре) и нажать клавишу **Enter** (Ввод).

4. Попад в окно выбора заданий, вы можете:

- познакомиться с теоретическими основами работы (нажмите **F1** и, последовательно нажимая **F3**, продвигайтесь вперед, а **F1** — назад по тексту). Нажав клавишу **Esc** (Отмена) в левом верхнем углу клавиатуры, вы в любой момент можете вернуться в окно выбора заданий;

- задавать условия эксперимента, моделировать, просматривать результаты эксперимента и др. Все действия осуществляются соответствующим выбором функциональных клавиш (см. указания на экране);

5. Выберите **F2** для задания условий эксперимента, и вы попадете в окно задания исходных данных, где должны ввести с клавиатуры: массу правого ( $m_1$ ) и левого ( $m_2 = m_1$ ) шара в кг (можно указать массы шаров, использованных в реальном эксперименте или получить задание у преподавателя). После ввода значения массы  $m_1$  (десятичный разделитель должен вводиться точкой, а не запятой) следует нажать **Enter** и перейти к вводу  $m_2$ . Далее вводится погрешность  $m_1$  и  $m_2$ , равная 0.001 кг (после ввода нажать **Enter**), длина нити подвеса  $l = 0.3$  м (или значение, указанное преподавателем) и погрешность  $\Delta l = 0.05$  м, а также погрешность

определения угла отклонения  $\Delta\alpha' = \Delta\beta' = 1^\circ$ . Завершение ввода каждого значения отмечается нажатием клавиши **Enter**. После ввода всех данных нужно нажать клавишу **Esc** и вернуться в окно выбора заданий.

6. Приступите к моделированию эксперимента, выбрав функциональную клавишу **F3**.

7. Следуя указаниям на экране монитора, "включите установку", нажав клавишу **F1**, а затем "переведите её в рабочее состояние" — **F2** и проведите эксперимент — **F3** при начальном значении угла отклонения  $\alpha = 4^\circ$  (на экране *an* соответствует  $\alpha$ -начальному — до удара). По завершении "удара" занесите в табл. 5 полученные значения  $\alpha'$  (a) и  $\beta'$  (b) и снова последовательно нажмите **F2** и **F3** ещё четыре раза до завершения серии измерений с данным значением  $\alpha = 4^\circ$  (последующее повторное нажатие **F2**, **F3** только повторяет одно из измерений серии с новым значением случайной погрешности для  $\alpha'$  и  $\beta'$ ). После пяти измерений (полная серия) занесите экспериментальные данные ( $\alpha'$  (a) и  $\beta'$  (b)) в табл. 5 и поменяйте начальный угол  $\alpha$  на  $10^\circ$ , для чего следует:

- нажать **F4** и клавишей со стрелкой  $\downarrow$  установить новое значение угла  $\alpha$  (*an* = 10 град на экране);

- вернуться к проведению экспериментальной серии нажатием **Esc**.

Проведите серию из следующих 5 экспериментов, последовательно нажимая **F2**, **F3**, а затем, изменив  $\alpha$  на  $15^\circ$  (**F4**,  $\downarrow$ , **Esc**), — заключительную серию для  $\alpha = 15^\circ$ . Занесите все экспериментальные данные ( $\alpha'$  (a) и  $\beta'$  (b)) в табл. 5. Рассчитайте средние значения углов отклонения первого и второго шара после удара по пяти опытам для каждого начального угла  $\alpha_{1,2,3}$ . Результаты занесите в табл. 5.

Далее нужно закончить моделирование нажатием **Esc** (появляется вопрос: "Вы хотите закончить моделирование у/п - ?", и после ввода "у" (yes - да)\* нажать **Enter**). При этом вы возвращаетесь в окно

\* Если вместо "у" на экране появляется символ "н", вы должны поменять раскладку клавиатуры (кириллическую на латинскую) с помощью комбинации клавиш, указанной лаборантом.

выбора заданий, после чего можно приступить к анализу экспериментальных данных.

8. В окне выбора нажмите F4. В этом режиме вы можете просмотреть экспериментальные данные, сведённые в три таблицы. В первой открывшейся таблице представлены значения углов отклонения первого шара  $\alpha'_1$  (a1 на экране монитора) и второго шара  $\beta'_1$  (b1) после удара, соответствующего начальному отклонению  $\alpha_1 = 4^\circ$ . Нажатие клавиши Esc переводит вас на следующую страницу, где представлены соответствующие данные для  $\alpha_2 = 10^\circ$ , а повторное нажатие - для  $\alpha_3 = 15^\circ$ .

Сравните эти результаты с вашими данными в табл. 5.

Нажатие Esc после просмотра третьей таблицы снова переводит вас в окно выбора режима.

Таблица 5

## Результаты компьютерного эксперимента

№ опыта	$\alpha_1 = 4^\circ$		$\alpha_2 = 10^\circ$		$\alpha_3 = 15^\circ$	
	$\alpha'_1$	$\beta'_1$	$\alpha'_2$	$\beta'_2$	$\alpha'_3$	$\beta'_3$
1						
2						
3						
4						
5						
Средние значения	$\bar{\alpha}'_1 =$	$\bar{\beta}'_1 =$	$\bar{\alpha}'_2 =$	$\bar{\beta}'_2 =$	$\bar{\alpha}'_3 =$	$\bar{\beta}'_3 =$

9. По формулам (12) и (13) рассчитайте коэффициенты  $K_C$  и  $K_E$ , а по (16) — импульс ударной силы  $S$ . Наконец, используя соотношение (17) получите численное значение относительной потери кинетической энергии при ударе  $\Delta T/T$ . Все результаты занесите в табл. 6.

Используйте рекомендации п. 10 задания 1 (стр. 17), рассчитайте погрешности  $\Delta K_C$ ,  $\Delta K_E$ ,  $\Delta S$ , и  $\Delta(\Delta T/T)$ , завершая заполнение табл. 6.



Таблица 6

Расчётные параметры удара по данным компьютерного эксперимента

$\alpha$	$K_C$	$\Delta K_C$	$K_Э$	$\Delta K_Э$	$S_{H_c}$	$\Delta S_{H_c}$	$\Delta T/T$	$\alpha(\Delta T/T)$
$\alpha_1 = 4^\circ$								
$\alpha_2 = 10^\circ$								
$\alpha_3 = 15^\circ$								

Сравните полученные данные с результатами реального эксперимента (задание 1) и объясните наблюдаемые расхождения.

### Примечание:

По окончании практической части работы вы можете познакомиться с примерами моделирования прямого нецентрального соударения двух частиц в демонстрационной программе PHIZIKA, раздел "Законы сохранения" в части "Механика". Для помощи в работе с программой обратитесь к персоналу лаборатории.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид взаимодействия называется механическим ударом? Какими параметрами оно характеризуется?
2. Какими процессами сопровождается механический удар? Какие виды удара вам известны?
3. Что такое прямой, центральный, косой, упругий и неупругий удар? Чем различаются упругий и неупругий удар в части выполнения законов сохранения?
4. Рассматривая прямой, центральный, неупругий удар двух гладких шаров, получите выражения для скоростей первого и второго шара после удара в общем случае (известны начальные скорости до удара и массы шаров).
5. Рассматривая прямой, центральный, абсолютно упругий удар двух гладких шаров, получите выражения для скоростей первого и

второго шара после удара в общем случае (известны начальные скорости до удара и массы шаров).

6. Как зависят от длины нитей подвеса углы отклонения шаров после упругого или неупругого удара?
7. Как зависят от масс соударяющихся шаров их углы отклонения после удара?
8. Опишите принцип действия экспериментальной установки для изучения удара. Получите соотношения (9)-(11), использованные для получения параметров удара в данной работе.
9. Как различаются характеристики удара для материалов, использованных в данной работе?
10. Каков порядок оценки погрешностей измеряемых параметров в данной работе?
11. Поясните "принцип работы" компьютерной модели, использованной в задании 2 данной работы. В чём преимущества и недостатки компьютерного моделирования?
12. Чем и почему различаются результаты реального экспериментального исследования удара в данной работе и его компьютерного моделирования?

## Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1982. §23. С.75-78, 103-107.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Т.1. М.: Высшая школа, 1973. §2.5. С.49-51, 65-70.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1989. §26. С.154-166.
4. Озеров Р.П. Физика для студентов химико-технологических вузов: 1. Механика. 2. Колебания и волны / МХТИ им. Д.И. Менделеева. М., 1993. §1.4.5. С.66-73.