

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(СИБСТРИН)

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ,
ЭНЕРГИИ, ВРЕМЕНИ СОУДАРЕНИЯ
И СИЛЫ УДАРА ТВЕРДЫХ ТЕЛ.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ
С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО
МАЯТНИКА**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ № 10 и № 10а
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

НОВОСИБИРСК 2018

Методические указания подготовлены
канд. физ.-мат. наук, доцентом П.В. Мокрушниковым,
д-ром физ.-мат. наук, профессором М.С. Соппой

Утверждены учебно-методической комиссией
инженерно-экологического факультета
5 марта 2018 года

Рецензент:

- Л.В. Глазкова, канд. физ.-мат. наук, доцент
кафедры физики НГАСУ (Сибстрин)

© Новосибирский государственный
архитектурно-строительный
университет (Сибстрин), 2018

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Титульная страница отчета о любой лабораторной работе должна содержать: названия вуза, кафедры, лабораторной работы; Ф.И.О. студента, № группы; место для отметки преподавателя; дату и место проведения. Отчет о лабораторной работе должен включать: краткую схему установки с ее описанием, кратко порядок выполнения работы, расчетные формулы, исходные и экспериментальные данные, пример расчета, расчет погрешностей, ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ, ЭНЕРГИИ, ВРЕМЕНИ СОУДАРЕНИЯ И СИЛЫ УДАРА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: изучить законы сохранения в механике.

Оборудование: экспериментальная установка, источник питания, электронный вольтметр.

Краткая теория

Во многих случаях взаимодействия тел мы сталкиваемся с ударом. В частности, в строительстве – это работы по забивке свай, применение пневмоударников и т.д. Поэтому весьма важно изучение физической стороны удара и процессов, происходящих при этом в телах.

Удар – это совокупность явлений, возникающих при кратковременном приложении к телу внешних сил и связанных с изменением его скорости. При этом мерой взаимодействия тел служит изменение импульса (количества движения) тела, связанного с импульсом тела:

$$\int \vec{F} dt = \vec{F}_{cp} t = \Delta(m\vec{v}).$$

Рассеяние механической энергии при ударе характеризуется коэффициентом восстановления скорости K_c или коэффициентом восстановления энергии K_ϵ .

Если шарик ударяется о неподвижную массивную стенку, то коэффициент восстановления скорости определяется как отношение скорости шарика после удара о стенку v_1 к скорости шарика до удара о стенку v (рис. 1):

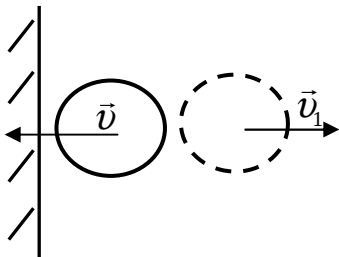


Рис. 1

$$K_c = \frac{v_1}{v}. \quad (1)$$

Коэффициент восстановления энергии зависит от системы отсчета и определяется как отношение суммарной кинетической энергии тел после удара E''_k

к суммарной кинетической энергии тел до удара E'_k :

$$K_s = \frac{E''_k}{E'_k}; \quad K_s = K_c^2. \quad (2)$$

Величины коэффициентов восстановления зависят от физических свойств материалов соударяющихся тел, их формы, массы.

Для абсолютно неупругого удара $K_s = 0$, а для абсолютно упругого $K_s = 1$, для реальных случаев $0 \leq K_s < 1$. Кинетическая энергия шара после удара E''_k уменьшается, поскольку часть кинетической энергии шара до удара ($E'_k - E''_k$) уйдет на работу по преодолению сил упругости шара и стенки во время удара. Эта часть кинетической энергии превращается в тепло (диссипирует).

В представленной работе коэффициенты считаются зависящими только от материала соударяющихся тел, в качестве которых используется шар, подвешенный на проволоке, и массивный стальной куб, где закрепляются пластины из различных металлов (медь, алюминий, свинец и бронза).

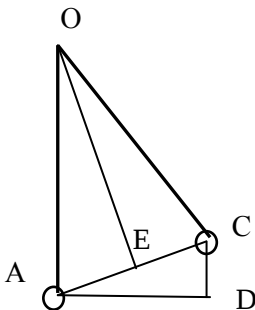


Рис. 2

Пусть O – точка подвеса нити; OA – начальное положение шара на нити (рис. 2); $|OA| = \ell$ – длина подвеса (по перпендикуляру от точки подвеса до центра шара).

Отведем шарик на нити вбок в положение OC так, что угол $\angle AOC = \alpha_0$; $h_0 = |CD|$ – высота подъема шара над начальным положением (см. рис. 2). Построим перпендикуляр

$[OE]$, угол $\angle AOE = \angle EOC = \angle CAD = \frac{\alpha_0}{2}$. Из построения видно,

что $|AC| = 2 \cdot |AE| = 2 \cdot |OA| \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} = 2 \cdot \ell \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2}$. Отсюда

$$h_0 = |CD| = |AC| \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} = 2\ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}. \quad (3)$$

Для отклоненного на угол α_0 шара (поднятого над начальным положением на высоту h_0) (см. рис. 2) можно записать закон сохранения полной механической энергии:

$$E_C = E_A \quad \text{или} \quad \frac{m \cdot v_0^2}{2} = m \cdot g \cdot h_0, \quad (4)$$

где m – масса шара; g – ускорение свободного падения.

Подставив (3) в (4), можно записать, что до первого удара

$$\frac{m \cdot v_0^2}{2} = 2 \cdot m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}. \quad (5)$$

После первого удара о неподвижный куб шар отскочит на угол α_1 , тогда можно получить закон сохранения полной механической энергии после первого удара:

$$\frac{m \cdot v_1^2}{2} = 2 \cdot m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}. \quad (6)$$

Теперь можно по формулам (1) и (2) найти коэффициент восстановления. Уменьшение угла отклонения после первого удара может быть небольшим, если соударение близко к упругому и погрешность результата при этом резко возрастает. Для ее уменьшения целесообразно измерять величину угла после n отскоков шара от куба. Тогда можно записать систему уравнений, дополнительных к (5) и (6), для n ударов:

$$\frac{m \cdot v_2^2}{2} = 2 \cdot m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}, \dots, \frac{m \cdot v_n^2}{2} = 2 \cdot m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_n}{2}. \quad (7)$$

Коэффициент восстановления энергии для первого удара $K_{\alpha_1} = \frac{E_1}{E_0}$, для второго удара $K_{\alpha_2} = \frac{E_2}{E_1}$ и т.д. Запишем коэффициенты восстановления энергии для n ударов, используя (7). Считаем эти коэффициенты одинаковыми. Перемножим эти равенства:

$$K_{\alpha_1} \cdot K_{\alpha_2} \cdot \dots \cdot K_{\alpha_n} = \frac{E_1}{E_0} \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{E_3}{E_2} \cdot \dots \cdot \frac{E_n}{E_{n-1}}.$$

После сокращения получим

$$K_{\alpha_n} = \frac{E_n}{E_0}.$$

Подставим вместо кинетических энергий их выражения из (7):

$$K_{\alpha_n} = \left(\frac{\sin \frac{\alpha_n}{2}}{\sin \frac{\alpha_0}{2}} \right)^{\frac{2}{n}}. \quad (8)$$

Используя (2), можно записать следующую формулу для коэффициента восстановления скорости:

$$K_c = \left(\frac{\sin \frac{\alpha_n}{2}}{\sin \frac{\alpha_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (9)$$

Время соударения тел также зависит от многих факторов: относительной скорости тел, их размеров, упругих свойств материалов и т.д. В случае соударения металлических тел время может быть измерено электрическим методом. Для этого используем схему, приведенную на рис. 3.

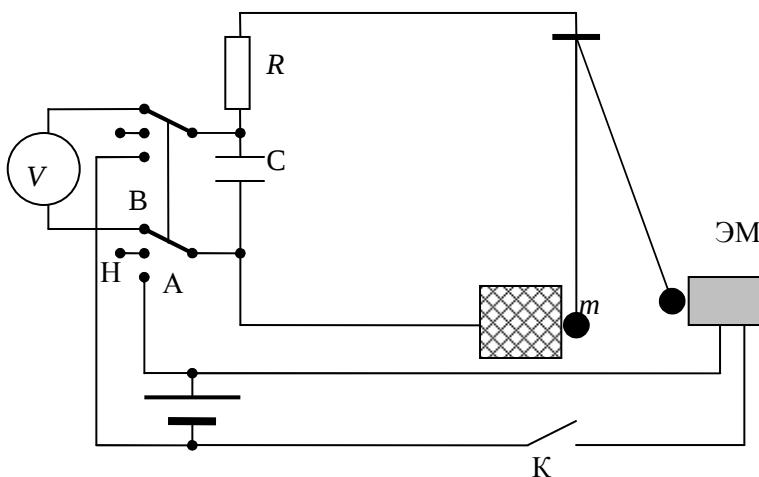


Рис. 3

В положении А («заряд емкости») конденсатор С заряжается до значения напряжения U_0 на нем. Далее нужно перевести переключатель K_2 (см. рис. 4) в положение Н («нейтральное положение»), затем в положение В («измерение») и произвести соударение (отключить электромагнит ЭМ). Во время соударения часть заряда на конденсаторе С нейтрализуется и напряжение на нем станет равным U . Шар должен сделать n ударов о куб. По-

сле этого необходимо успеть задержать шар и замерить вольтметром напряжение U на конденсаторе C (см. рис. 3). Теория электрического разряда в цепи, содержащей омическое сопротивление R и емкость C , которая здесь не рассматривается, позволяет определить время соударения при n соударениях:

$$t = \frac{R \cdot C}{n} \cdot \ln \frac{U_0}{U} . \quad (10)$$

Зная среднее время соударения, можно рассчитать среднюю силу удара за промежутки действия:

$$F_{cp} \cdot t_{cp} = m \cdot (v_0 + v_1); \quad F_{cp} = \frac{m \cdot v_0}{t_{cp}} \cdot (K_c + 1) .$$

Так как

$$v_0^2 = 2 \cdot g \cdot h_0 = 4 \cdot g \cdot \ell \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} ,$$

то

$$F_{cp} = \frac{2 \cdot m \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} \cdot (K_c + 1) \sqrt{g \cdot \ell}}{t_{cp}} . \quad (11)$$

Описание установки

Установка (рис. 4) состоит из массивного основания 1, на котором закреплена стойка 4 с кронштейном 6 и стержнем 5. К стержню на нитях подвешен стальной шар 12. Его можно отводить вдоль шкалы 9 на углы от 0 до 50° от вертикального положения и фиксировать за счет притяжения электромагнита 8, укрепленного на штанге 7. На основании установки размещен куб 3 с закрепленными на нем образцами различных материалов. Куб поворачивается вокруг оси и фиксируется так, чтобы его плоскость была перпендикулярна направлению удара. На горизонтальной поверхности основания расположены клеммы для подключения измерительного прибора, батареи, выключа-

тель электромагнита и переключатель «заряд–нейтральное положение–измерение».

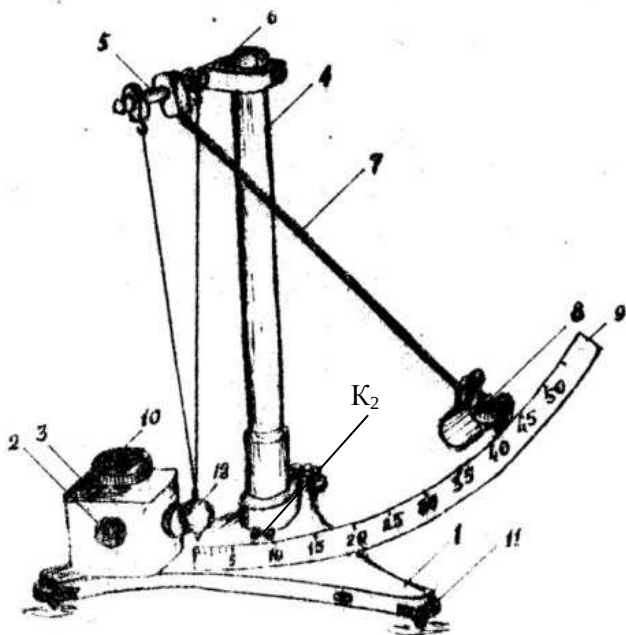


Рис. 4

Порядок выполнения работы

Задание I: определение коэффициентов восстановления энергии и скорости.

1. Записать параметры установки.

Масса шара

$m =$ _____ ;

Длина подвеса

$l =$ _____ ;

Сопротивление

$R =$ _____ ;

Емкость конденсатора

$C =$ _____.

2. Зафиксировать куб на оси так, чтобы с шаром взаимодействовал образец (отвернув и завернув головку 10, см. рис. 4).
3. Включить питание электромагнита (ключ К, см. рис. 3), ввести шар в контакт с электромагнитом.
4. Выключить электромагнит, отсчитать n (3, 4, 5) ударов шара об образец и заметить угол α_n после n -го отскока. Занести результаты в табл. 1.
5. Повторить операции из п. 3 и 4, меняя число ударов. Занести результаты в табл. 1.
6. Повернуть куб вокруг оси так, чтобы с шаром взаимодействовал другой образец (отвернув и завернув головку 10, см. рис. 4).
7. Повторить операции из п. 3, 4, 5. Занести результаты в табл. 1.
8. Рассчитать значения K_c и K_s по формулам (8) и (9), вычислить их средние значения. Данные внести в табл. 1.

Задание II: определение времени соударения и средней силы удара.

1. Включить электромагнит и ввести шар в соприкосновение с ним.
2. Перевести переключатель K_2 (см. рис. 4) в положение «заряд», через несколько секунд в «нейтральное положение», а затем в «измерение». Измерить максимальное напряжение на конденсаторе (U_0).
3. Выключить электромагнит и осуществить n соударений. Ловить шар после n соударений, после этого измеряя напряжение на конденсаторе U . Прodelать несколько раз, меняя n . Результаты занести в табл. 2.
4. Вычислить время удара t_i по формуле (10), среднее время удара t_{cp} (см. табл. 2), среднюю силу удара F_{cp} по формуле (11).
5. Вычислить доверительный интервал для времени удара Δt по табл. 3. Вычислить относительную погрешность измерения ε , записать результат измерения времени в стандартной форме.

Таблица 1

Результаты измерения коэффициентов
восстановления скорости и энергии

Число ударов n	α_0	$\sin \frac{\alpha_0}{2}$	α_n	$\sin \frac{\alpha_n}{2}$	$\frac{\sin \frac{\alpha_n}{2}}{\sin \frac{\alpha_0}{2}}$	K_c	K_e
Материал образца –							
Материал образца –						$K_{с\text{р}} =$	

$$K_{с\text{р}} =$$

Таблица 2

Определение продолжительности и средней силы удара

Число ударов n	Начальное напряжение U_0 , В	Напряже- ние после ударов U , В	Длительность удара t_i , с	Среднее время $t_{ср}$, с	Средняя сила удара $F_{ср}$, Н

Примечание: $t_{ср} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$.

Таблица 3

Расчет погрешности измерения времени соударения

Номер по порядку i	t_i	$\Delta t_i = t_i - t_{cp}$	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\Delta t_i)^2}{3(3-1)}}$	$t_{\alpha,i}$ ($\alpha = 0,95$; $i = 3$)	$\Delta t = t_{\alpha,i} \cdot S$
1				4,3	
2					
3					

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t_{cp}} \cdot 100 \% = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$t = t_{cp} \pm \Delta t = \underline{\hspace{2cm}}.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое радиус-вектор материальной точки, ее средняя скорость, мгновенная скорость, изменение скорости, среднее ускорение, мгновенное ускорение? Запишите формулы, нарисуйте поясняющие рисунки.
2. Что называется импульсом тела? Что такое «сила»?
3. Сформулируйте и запишите три закона Ньютона.
4. Что такое импульс силы?
5. Выведите второй закон Ньютона для системы тел. На его основе выведите закон сохранения импульса.
6. Дайте определение кинетической энергии, консервативной силы, потенциальной энергии. Какие поля называются потенциальными? Запишите выражение для вектора консервативной силы через потенциальную энергию. Что такое неконсервативные силы?

7. Выведите закон сохранения полной механической энергии.
8. Запишите и объясните формулы известных видов механической энергии.
9. Что такое «удар»?
10. Какой удар называется абсолютно упругим? Какой абсолютно неупругим? Как внешне отличить неупругое взаимодействие от упругого?
11. Примените законы сохранения импульса и энергии для обоих типов ударов.
12. Что называется коэффициентом восстановления скорости? Коэффициентом восстановления энергии?
13. Выведите расчетные формулы (8), (9), (11).

Лабораторная работа № 10а
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ
БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

Цель работы: изучить законы сохранения импульса и механической энергии, определить скорость полета пули.

Оборудование (рис. 5а): 1 – пуля; 2 – пушка; 3 – маятник на подвесе; 4 – линейка.

Краткая теория

Пуля массой m вылетает из пушки и со скоростью v врежется в маятник массой M . Маятник с застрявшей в нем пулей приходит в движение со скоростью u . Импульс пули до удара равен импульсу маятника с пулей после удара (закон сохранения импульса для замкнутых систем):

$$mv = (M + m)u , \quad (12)$$

откуда можно выразить скорость пули до удара

$$v = (M + m)u / m . \quad (13)$$

При своем движении вправо маятник одновременно поднимается вверх и останавливается, достигнув максимальной высоты h (рис. 5б).

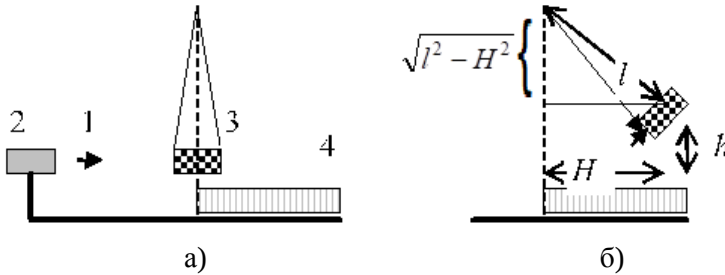


Рис. 5. Схема эксперимента с баллистическим маятником

Согласно закону сохранения механической энергии, начальная кинетическая энергия маятника с пулей полностью переходит в потенциальную энергию сил тяготения:

$$\frac{(M + m)u^2}{2} = (M + m)gh, \quad (14)$$

где g – ускорение свободного падения.

Отсюда

$$u = \sqrt{2gh}. \quad (15)$$

Из геометрических соображений с помощью рис. 5 и теоремы Пифагора можно найти, что высота подъема h связана с величиной отклонения маятника по горизонтали H следующим соотношением:

$$h = \ell - \sqrt{\ell^2 - H^2} \quad \text{или} \quad h = \ell \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{H}{\ell} \right)^2} \right), \quad (16)$$

где ℓ – длина подвеса маятника (размерами самого маятника пренебрегаем).

Из формул (13), (15) и (16) следует, что скорость полета пули равна

$$v = \frac{M + m}{m} \sqrt{2g\ell \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{H}{\ell} \right)^2} \right)}. \quad (17)$$

Порядок выполнения работы

Внимание! Пункт 1 выполняется с участием преподавателя! При стрельбе соблюдать осторожность!

1. Взять три пули разной массой. С помощью элементов установки и регулировки нитей подвеса маятника добиться такого положения маятника, при котором пуля устойчиво застревает в нем после выстрела.
2. Записать значения массы пуль, маятника и длины подвеса (даются преподавателем).

$m_1 =$ _____ кг; $m_2 =$ _____ кг; $m_3 =$ _____ кг;

$M =$ _____ кг; $\ell =$ _____ м.

3. Последовательно произвести по три выстрела каждой пулей. Записать все полученные значения H – смещения маятника по горизонтали (отсчитываются по линейке) – в табл. 4. Если начальное положение маятника соответствует значению S_0 на линейке, а конечное – значению S , то $H = S_0 - S$.
4. С помощью формулы (17) рассчитать для каждой пули значения скорости во всех экспериментах, найти средние скорости по формуле $v_{cp} = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}$ и также занести в табл. 4.

5. Определить для каждой пули абсолютную случайную погрешность измерений (величину разброса) по формуле

$$\Delta v_{абс} = 4,3 \sqrt{\frac{(v_1 - v_{cp})^2 + (v_2 - v_{cp})^2 + (v_3 - v_{cp})^2}{3(3-1)}},$$

а также относительную случайную погрешность

$$\varepsilon = \frac{\Delta v_{абс}}{v_{cp}} \cdot 100 \%.$$

Таблица 4

Определение скорости полета пули

Номер опыта	Расстояние H , м	Скорость v , м/с	Средняя скорость v_{cp} , м/с	Δv_{abs} , м/с	ε
Пуля 1					
1					
2					
3					
Пуля 2					
1					
2					
3					
Пуля 3					
1					
2					
3					

Запишите найденные в опытах оценки скорости полета пуль в виде доверительных интервалов:

$$v_{пули1} \in (v_{cp1} - \Delta v_{абс1}; v_{cp1} + \Delta v_{абс1}) = (\text{_____}; \text{_____}) \text{ м/с};$$

$$v_{пули2} \in (v_{cp2} - \Delta v_{абс2}; v_{cp2} + \Delta v_{абс2}) = (\text{_____}; \text{_____}) \text{ м/с};$$

$$v_{пули3} \in (v_{cp3} - \Delta v_{абс3}; v_{cp3} + \Delta v_{абс3}) = (\text{_____}; \text{_____}) \text{ м/с}.$$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение импульса тела и импульса системы тел. Сформулируйте закон сохранения импульса.
2. Чему равны кинетическая энергия тела и потенциальная энергия в поле силы тяжести? Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
3. Что такое абсолютно упругий и абсолютно неупругий центральный удар двух тел?
4. Примените законы сохранения импульса и энергии для обоих типов ударов.
5. Объясните, почему в данном эксперименте пуля, вылетающая с меньшей скоростью, сильнее отклоняет баллистический маятник? Сравните кинетические энергии пули при вылете.
6. Сделайте вывод формулы (17).

Составители

Павел Валентинович Мокрушников
Михаил Сергеевич Соппа

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ,
ЭНЕРГИИ, ВРЕМЕНИ СОУДАРЕНИЯ
И СИЛЫ УДАРА ТВЕРДЫХ ТЕЛ.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ
С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО
МАЯТНИКА**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ № 10 и № 10а
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

Редактор Е.Л. Корецкая

Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
