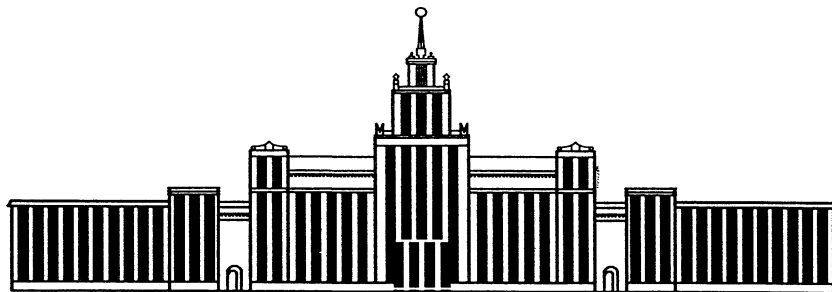

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

53(07)
Б795

КАК ПРАВИЛЬНО ОФОРМИТЬ И ПРЕДСТАВИТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Методические указания

Челябинск
2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Общей и теоретической физики»

53(07)
Б795

**КАК ПРАВИЛЬНО ОФОРМИТЬ И ПРЕДСТАВИТЬ
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ**

Методические указания

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2015

УДК 530.1(075.08)
Б795

*Одобрено
учебно-методической комиссией
физического факультета*

*Рецензент
Коренченко А.Е.*

Б795 **Как правильно оформить и представить результаты лабораторных работ по физике:** методические указания / сост.: Н.А. Болотникова, Т.Ю. Никонова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 34 с.

Данное пособие призвано помочь студентам, приступающим к изучению вузовского курса общей физики, приобрести навыки и опыт в обращении с экспериментальными данными, полученными при выполнении лабораторных работ, с методами и правилами их обработки, интерпретации и представления результатов. На типичных примерах, взятых из реально существующих работ, последовательно прослеживается весь процесс подготовки лабораторного отчета.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения с направлением подготовки «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 530.1(075.08)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Оформление отчета к лабораторной работе «Изучение законов динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека».....	5
2. Оформление отчета к лабораторной работе «Определение ускорения свободного падения с помощью обратного и математического маятников».....	18
3. Оформление отчета к лабораторной работе «Определение отношения теплоемкостей воздуха».....	23
Заключение.....	30
Библиографический список.....	31
Приложения	
Приложение 1.....	32
Приложение 2.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Каждый студент, приступая к выполнению лабораторного практикума по физике, сталкивается с необходимостью познакомиться с методом измерения той или иной физической величины, разобраться с устройством используемого оборудования и конкретным ходом выполнения лабораторной работы. Последний включает в себя этапы получения экспериментальных данных, их обработку и грамотное представление результатов опыта.

Все эти этапы (подготовки к работе и ее выполнения) описаны в соответствующих методических пособиях нашей кафедры [1–3]. Там же приведены общие правила оформления отчетов к лабораторным работам.

Но, как показывает опыт, прочтение правил еще не означает их быстрое освоение и умение точно следовать им в работе.

Авторы данного пособия поставили своей целью – помочь студентам разобраться в тонкостях и премудростях непростого дела – оформления отчетов к лабораторным работам на нескольких конкретных примерах. Для примера выбраны работы из первого цикла лабораторного практикума «Механика и молекулярная физика». Выбор конкретных работ оправдан рядом причин. Так в работе по изучению законов динамики вращательного движения (работа №3 по нумерации в пособии [1]) студенты впервые знакомятся со способом нахождения физических величин по графику линейной зависимости одной величины от другой. Здесь же, как и в работе №12, применяется метод линеаризации физической зависимости и экстраполяции на область значений аргумента, недоступную для эксперимента. В работе №7 студенты знакомятся с методом нахождения искомых параметров графическим способом – по точке пересечения двух графиков. В работе показано, как грамотно записать конечный результат, проведя сравнение полученных данных с известными табличными значениями. Рассмотренные на примере трех работ методы обработки данных применяются во всем лабораторном практикуме.

Надеемся, что разобранные в небольшом по объему пособии примеры дадут позитивный толчок для самостоятельной уверенной работы студентов в лабораториях нашей кафедры.

Включайтесь с нами в работу! Мы начинаем!

1. Оформление отчета к лабораторной работе «ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»

(работа №3 по методическому пособию [1])

Очень важно, приступая к работе, знать, что и как Вы должны делать, чтобы избежать ошибок при проведении эксперимента и успешно отчитаться за проделанную работу. Вот почему начать оформлять отчет желательно уже во время подготовки к работе. Знакомясь по методическому пособию с целью лабораторной работы, описанием установки и метода измерения, можно (и нужно) одновременно заполнять соответствующие позиции в бланке отчета с расшифровкой расчетных формул, описанием деталей – узлов установки. Тогда часть отчета уже будет подготовлена к проверке. А главное, выполнение этой части работы потребует от Вас более внимательного прочтения описания работы, что в свою очередь поможет лучше подготовиться к контрольному опросу перед работой (коллоквиуму) и осознанно выполнить эксперимент.

Это общие правила, настоятельные рекомендации, которых надо придерживаться при подготовке ко всем работам. Не будем повторять эти советы в разговоре об отчетах к другим лабораторным работам. Далее мы будем приводить примеры обработки уже полученных экспериментальных данных.

Начинаем с обработки данных первой части работы №3.

Задание 1. *Изучение законов вращения на примере маятника Обербека. Определение момента инерции маятника.*

Вы заполнили в таблице 1 все позиции, выделенные жирной рамкой (данные вашего эксперимента). Два последних столбца в таблице должны содержать получаемые численными расчетами значения моментов приложенных к маятнику сил M_i и вызываемых этими моментами угловых ускорений α_i маятника Обербека (системы: крестовина плюс укрепленные на ней подвижные грузы).

В этой работе перед табл. 1 (чаще после таблицы) приведены расчетные формулы для нахождения M_i и α_i . Студент показывает пример вычисления одной (обычно первой) пары связанных величин, здесь это M_1 и α_1 . Данный пример поможет преподавателю проверить правильность ваших расчетов.

Заполним вместе первую строку табл. 1. В формулы над таблицей подставим результаты эксперимента, записывая их в СИ (Международная система единиц, используемая в качестве основной при проведении измерений в учебном процессе). При этом все числа в любую расчетную формулу удобно (и принято) представлять в виде $c \cdot 10^{\pm k}$, где c – число из интервала от 0,1 до 99,9. Здесь k – соответствующая степень числа десять, обычно $k \neq 0, \pm 1$.

Согласно сказанному, приведем допустимые формы записи данных при подстановке их в расчетную формулу на примере экспериментальных значений для r_1 и m_1 :

$$r_1 = 9,95 \text{ мм} = 0,995 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 9,95 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 99,5 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$m_1 = 83 \text{ г} = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ кг} = 83 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$$

$$t_1 = 30,4 \text{ с},$$

$$h = 0,58 \text{ м}.$$

Линейное ускорение опускающегося на нити груза при таких значениях параметров:

$$a = \frac{2h}{t^2} = \frac{2 \cdot 0,58}{(30,4)^2} = 0,001255 = 1,255 \cdot 10^{-3} \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

В отчет записываем числовую дробь и конечный результат.

Угловое ускорение вращения маятника

$$\alpha = \frac{2h}{rt^2} = \frac{a}{r} = \frac{1,255 \cdot 10^{-3}}{9,95 \cdot 10^{-3}} = 0,12615 \text{ (рад/с}^2\text{)}.$$

Ввиду того, что в расчетной формуле для момента силы, действующего на маятник $M = m(g - a)r$, $a \ll g$ ($0,001255 \ll 9,801$), допустимо рассчитывать моменты сил по упрощенной формуле $M \approx mgr$. Вносимая при этом погрешность в результат составит не более 0,1%.

$$M \approx mgr = 8,3 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 9,95 \cdot 10^{-3} = 8,091 \cdot 10^{-3} \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Полученные значения заносим в таблицу, округлив до 3–4 значащих цифр (какие цифры надо считать значащими, смотри приложение 1 в конце пособия):

$$\alpha_1 = 0,126 \text{ рад/с}^2, \quad M_1 = 8,09 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ниже позволим себе продемонстрировать получение расчетных величин для **последней** строки таблицы, содержащей данные эксперимента. Это нужно для определения диапазонов изменения величин M и α , что нам совершенно необходимо знать для дальнейшей совместной работы по оформлению отчета.

Исходные данные (**в вашем эксперименте будут другие данные**) в этом случае согласно таблице 1 следующие:

$$r_8 = r_2 = 17,5 \text{ мм} = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$m_8 = 0,231 \text{ кг},$$

$$t_8 = 9,9 \text{ с},$$

$$h = 0,58 \text{ м}.$$

При этих значениях параметров

$$a_8 = \frac{2h}{t_8^2} = \frac{2 \cdot 0,58}{(9,9)^2} = 0,011836 = 1,1836 \cdot 10^{-2} \text{ (м/с}^2\text{)},$$

$$\alpha_8 = \frac{a}{r_8} = \frac{1,1836 \cdot 10^{-2}}{1,75 \cdot 10^{-2}} = 0,674 \text{ (рад/с}^2\text{)},$$

$$M_8 \approx m_8 g r_2 = 0,231 \cdot 9,8 \cdot 1,75 \cdot 10^{-2} = 39,63 \cdot 10^{-3} \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Таблица 1

$h = 0,58 \text{ м}$					
$r, \text{ мм}$	№	$m, \text{ кг}$	$t, \text{ с}$	$M \cdot 10^{-3},$ $\text{Н} \cdot \text{м}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
$r_1 = 9,95$	1	0,083	30,4	8,09	0,126
	2				
	3				
	4				
$r_2 = 17,50$	5				
	6				
	7				
	8	0,231	9,9	39,63	0,674
Координаты средней точки				21,18	0,347

По аналогии заполняются остальные графы таблицы, включая значения **координат средней точки**. Последние находят простым делением на число N (количество опытов) суммы всех рассчитанных значений M_i и α_i соответственно.

$$M_{\text{сред.}} \equiv \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N}, \quad \alpha_{\text{сред.}} \equiv \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N}. \quad \text{В нашем случае } N = 8.$$

Общий множитель 10^{-3} для значений моментов сил M_i удобно вынести в заголовок соответствующего столбца.

Заметим, что в один столбец любой таблицы записываем величины с постоянной точностью (говорят, что последняя значащая цифра у чисел из одного столбца располагается в одном разряде). Как в табл. 1: моменты сил приведены с точностью до сотых, угловые ускорения – до тысячных соответствующих единиц измерения.

Приступаем к построению графика. Начнем с выбора масштаба.

1. Максимально растягивайте масштаб по осям. График по возможности должен занимать все отведенное для него поле. Например, если ожидаемая линия графика – прямая, то она должна располагаться по диагонали поля графика с левого нижнего угла до правого верхнего, как в этой работе, или по другой диагонали, как в работе по определению отношения теплоемкостей воздуха (далее – это работа № 12 по нумерации в методическом пособии [1]). Для этого часто отсчет по осям (или по одной из них) нужно начинать не с нулевых отметок (говорят, осуществляется перенос начала координат). Исключением из этого правила являются следующие ситуации:

- а) когда заведомо известно, что искомая прямая проходит через начало координат и этим, конечно, надо воспользоваться при построении графика;

б) когда полученную линейную зависимость надо экстраполировать на нулевое значение аргумента (как во второй части этой работы и в работе № 12).

2. Отметки по осям (масштабные деления) расставляем равномерно, но не густо (по 3–4 на каждой оси).

3. Но масштаб нужно выбирать еще и так, чтобы с его помощью не сложно было найти на поле графика положение расчетных точек из таблицы и снять с графика координаты любой точки. Удачным в связи с этим надо признать следующий выбор, когда за единицу масштаба по каждой оси принимают отрезок на оси, кратный 1, 2, 4, 5, 10 клеткам, если на поле графика нанесена сетка.

Если график строится на миллиметровой бумаге, то вместо числа клеток надо вести разговор о количестве миллиметров или сантиметров из ряда 1, 2, 4, 5, 10, 50.

Данный отрезок (единица масштаба по оси) соответствует определенному числу или доле единицы измеряемой величины, обычно из ряда 1, 2, 4, 5, 10; 0,1; 0,2. Такой выбор позволяет легко отсчитывать десятые доли единицы масштаба. Следует избегать неудобного, но часто используемого студентами масштаба: 3 или 6 клеток (15 мм или 30 мм для графика на миллиметровой бумаге) на единицу величины.

Например, можно предложить следующий масштаб (см. рис. 1 ниже)

По оси α единица масштаба $0,1 \text{ рад/с}^2$ соответствует двум клеткам оси ординат. Чтобы не наносить слишком много масштабных делений, поставили отметки через одну (0,2; 0,4; 0,6; 0,8).

По оси M (по оси абсцисс) масштабные деления расставлены через пять клеток. Одна клетка соответствует $2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Десятичный множитель 10^{-3} , указанный возле единицы измерения моментов сил, позволяет записывать отметки по оси M без лишних нулей для более легкого прочтения графика.

Обратите внимание, что при выборе масштаба не плохо, если последние отметки по осям будут чуть больше (с запасом) максимальных значений M_i и α_i в табл. 1.

На рисунке 1 отмечены возможные положения шести точек, координаты которых не представлены в таблице. Вы свои данные наносите четкими точками, чтобы их можно было легко разглядеть на графике.

Строим прямую через среднюю точку, которую выделяем особо, например, обведя кружком, в виде ромба (как на нашем рисунке) и т. п. При этом точки, построенные по данным таблицы (эксперимента), могут не лежать на этой прямой вовсе. Важно лишь, чтобы **разброс экспериментальных точек (суммарное отклонение в миллиметрах точек от проведенной прямой линии) выше и ниже прямой был примерно одинаков**.

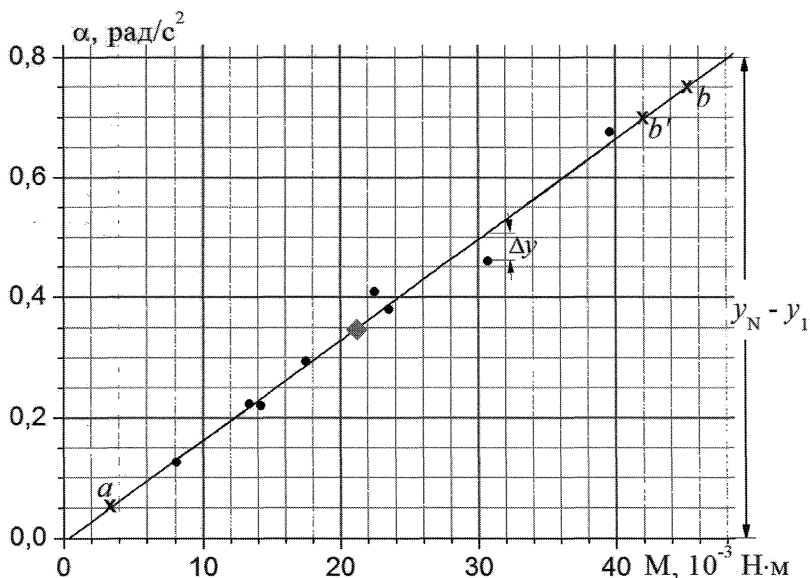


Рис. 1. Зависимость углового ускорения маятника от приложенного к нему момента внешних сил

Далее идет работа **ТОЛЬКО** с графиком.

Целью многих лабораторных работы является нахождение углового коэффициента построенной прямой (см. приложение 2 в конце пособия), то есть тангенса угла наклона прямой по отношению к оси абсцисс или оси ординат (как в этой части работы).

Заметим, что использовать при этом транспортир категорически не годится, так как результат будет зависеть от выбранного вами масштаба по осям для величин разной размерности, чего быть не должно.

По отношению к какой оси находить тангенс угла наклона прямой связано с конкретной физической величиной, искомой в работе. Нас интересует момент инерции маятника I . Согласно закону динамики вращательного движения

$$M = I\alpha.$$

С каким бы ускорением α не вращался маятник под воздействием любого момента сил M , величина I маятника при неизменном положении грузов на крестовине (как в первой части этой работы) поменяться не может. Следовательно, если изменять момент приложенных к маятнику сил в диапазоне ΔM (от M_a до M_b), то изменится и угловое ускорение маятника на величину $\Delta\alpha$ (от α_a до α_b). Это положено в основу расчета момента инерции I , точнее его среднего значения.

При $I = \text{const}$

$$\Delta M = I \Delta \alpha,$$

тогда

$$I = \bar{I} \equiv I_{\text{ср}} = \frac{\Delta M}{\Delta \alpha} = \frac{M_b - M_a}{\alpha_b - \alpha_a}. \quad (1)$$

Здесь $\alpha_a, \alpha_b, M_a, M_b$ – координаты точек a и b , обязательно лежащих на вашей прямой. На нашем рисунке положения этих точек отмечены крестиками (можно отметить иначе). Координаты точек записываем не из данных таблицы, а снимаем с графика с разумной точностью, которую позволяет масштаб. При выборе точек a и b на графике прямой придерживайтесь следующих правил:

1. Точки a и b должны располагаться друг от друга на возможно большем удалении. Это уменьшает погрешность расчетов, т.к. при малых ΔM и $\Delta \alpha$ незначительные ошибки в определении координат точек a и b , которые присутствуют всегда (например, в связи с ограниченной точностью снятия данных с графика), приводят к ощутимому изменению искомой величины.

2. Не принято в качестве точки a или b выбирать среднюю точку в согласии с тем, о чем сказано выше под цифрой 1.

3. Обычно значение аргумента для точки a меньше, чем для точки b ($\alpha_a < \alpha_b$).

4. По возможности координаты α_a и α_b (для величин, стоящих в знаменателе расчетной формулы (1)) должны содержать малое число значащих цифр (одну или две), чтобы при делении на $(\alpha_b - \alpha_a)$ мы делили на достаточно простое, легко определяемое число, как в нашем примере:

$$\begin{aligned} \alpha_a &= 0,05 \frac{\text{рад}}{c^2}, & \alpha_b &= 0,75 \frac{\text{рад}}{c^2}, & \alpha_b - \alpha_a &= 0,7 \frac{\text{рад}}{c^2}. \\ I &= \frac{\Delta M}{\Delta \alpha} = \frac{M_b - M_a}{\alpha_b - \alpha_a} = \frac{(45,1 - 3,5) \cdot 10^{-3}}{0,75 - 0,05} = 0,05943 = \\ &= 5,943 \cdot 10^{-2} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \end{aligned}$$

В отчет приводим сразу числовую дробь и конечный результат, пропуская первые две дроби, которые представляют собой общее правило расчета углового коэффициента прямой. Преподаватель поймет вас, если вы не забудете отметить на графике положение точек a и b , выбранных для расчета.

Примечание. Интересно заметить следующее: на верхнем краю нашей прямой одна точка попала в перекрестье клеток. Бывает, что таких точек две: одна в начале, другая – в конце прямой. Но, как видим, так бывает не всегда. Эту точку мы назвали b' . Снимать координаты таких точек, пожалуй, проще. Про-

верим качество предыдущего расчета, подставив в формулу для I координаты точек a и b' .

$$I = \frac{\Delta M}{\Delta \alpha} = \frac{M_{b'} - M_a}{\alpha_{b'} - \alpha_a} = \frac{(42 - 3,5) \cdot 10^{-3}}{0,7 - 0,05} = 0,05923 = 5,923 \cdot 10^{-2} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Совпадение результатов двух вычислений момента инерции в пределах 0,3 %, что значительно меньше погрешности проведенных измерений (4,6 %), которую мы вскоре оценим. Это позволяет утверждать, что координаты точек a и b сняты с графика вполне успешно.

При выборе точек a и b приходится лавировать между тем, что, с одной стороны, координаты точек, находящихся в перекрестье клеток, определять легче, а, с другой стороны, точки a и b должны находиться на максимально возможном удалении друг от друга. Здесь есть о чем подумать, чему поучиться!

Итак, нахождение момента инерции I динамическим методом (с использованием основного закона динамики вращательного движения), предложенным в работе, эквивалентно нахождению величины, обратной угловому коэффициенту прямой $\alpha(M)$ – зависимости углового ускорения маятника от момента приложенных сил. Здесь по оси абсцисс откладываются моменты сил M , которые являются причиной ускорения α (M – аргумент, значения которого задаются экспериментатором; α – функция).

Следующим этапом в оформлении работы является расчет погрешности проведенных вычислений. Построенный график позволяет оценить **относительную погрешность** δI найденного момента инерции. Для этого с графика снимают значения двух величин:

1) **отклонения Δy для экспериментальной точки, наиболее удаленной от прямой** (в нашем примере $\Delta y = \Delta \alpha$);

2) **всего диапазона изменения ординаты $(y_N - y_1)$ в пределах поля графика** (см. рис. 1).

$$\delta I = \frac{\Delta y}{y_N - y_1} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_N - \alpha_1} = \frac{3 \text{ мм}}{65 \text{ мм}} = 0,046 = 4,6 (\%)$$

В отчете опять пишем для δI только числовую дробь и конечный результат, не забыв на графике отметить Δy и $(y_N - y_1)$.

При подготовке этого пособия страницы текста, включая графики, распечатывались в формате А4. После уменьшения страниц до формата методического пособия, которое вы держите в руках, уменьшились и графики. Это привело к тому, что числа (в миллиметрах) для величин Δy и $(y_N - y_1)$ пропорционально уменьшились до приведенных здесь значений. Советуем не обращать

на это большого внимания, так как результат расчета δI , если и изменился, то весьма незначительно.

Примечание для практического применения. Так определять $(y_N - y_1)$, что весьма удобно, можно только при грамотном выборе масштаба по осям с учетом возможных переносов начала осей, когда прямая, построенная по экспериментальным точкам, занимает все поле графика. Этому соответствует расположение прямой линии графика по диагонали отведенного для нее поля. В противном случае за $(y_N - y_1)$ правильно взять только интервал изменения ординаты для опытных точек. Напомним, что для графика $\alpha(M)$ этой работы таких точек восемь.

Обращаем ваше внимание, **величина относительной погрешности** для любой величины, полученной в эксперименте, **всегда безразмерная**. В частности, она (δI) безразмерная и для момента инерции, так как **размерности числителя и знаменателя** в последней формуле **всегда одинаковы**, совпадают с размерностью величины, откладываемой по оси ординат (например, для графика на рис.1 – это рад/с²), и **при делении сокращаются**. Поэтому данные Δy и $(y_N - y_1)$ **удобно измерять вдоль оси ординат в миллиметрах**, с помощью обычной линейки (при записи числовой дроби обязательно запишите единицы измерения, выбранные вами, как показано в расчете δI).

Внимание! Но, **нельзя измерять в миллиметрах ΔM и $\Delta \alpha$ при вычислении углового коэффициента прямой** по формуле (1). Здесь размерности числителя и знаменателя (у величин $(y_b - y_a)$ и $(x_b - x_a)$) всегда, т.е. при любой зависимости друг от друга разнородных величин x и y разные и при делении сократиться не могут. Например, в этой работе ΔM и $\Delta \alpha$ снимаются с графика с учетом соответствующих масштабов в Н·м и рад/с², а угловой коэффициент прямой имеет размерность момента инерции – кг·м².

С найденной по графику $\alpha(M)$ относительной погрешностью δI связана абсолютная погрешность момента инерции ΔI (она же ширина доверительного интервала)

$$\Delta I = \delta I \cdot I = 0,046 \cdot 5,943 \cdot 10^{-2} = 0,273 \cdot 10^{-2} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Пора записать окончательный ответ в виде:

$$I = I_{cp} \pm \Delta I, \quad P = 1 - (1/2)^{N-1}.$$

Здесь N – число экспериментальных точек на графике $\alpha(M)$ (число опытов, выполненных в первой части работы), а P – доверительная вероятность, с которой получен результат.

$$I = (5,94 \pm 0,27) \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad P = 99,2 \%,$$

То есть, с вероятностью близкой к 100 % истинное (оно же искомое) значение момента инерции маятника лежит в пределах приведенного интервала шириной ΔI возле среднего значения $I_{\text{ср}}$ согласно правилам записи доверительного интервала и принятым правилам округления (см. приложение 1 в конце данного пособия).

Задание 2. Исследование зависимости момента инерции (МИ) составного тела от распределения массы относительно оси вращения.

Маятник Обербека представляет собой составное тело, собранное из крестовины с моментом инерции относительно оси вращения $I_{\text{кр}}$ и закрепленных на ней 4-х (или 2-х) подвижных грузов. Последние в нашей задаче предложено считать материальными точками при расчете их момента инерции. Это приближение возможно, если экспериментальные данные по динамическому способу нахождения МИ I при построении графика $I(l^2)$ обнаружат линейную зависимость.

Поясним еще раз, что динамическим называется способ поиска интересующей вас величины с использованием законов динамики.

Пусть вы получили экспериментальные данные, выделенные жирной рамкой в табл. 2 (**в вашем эксперименте будут другие данные**); привели пример расчета момента инерции по методу, предложенному в описании лабораторной работы, заполнили все графы в таблице, включая расчет координат средней точки.

Таблица 2

$h = 0,57 \text{ м}; \quad m = 0,1445 \text{ кг}; \quad r = 17,5 \text{ мм}$				
№	$l, \text{ см}$	$t, \text{ с}$	$l^2, \text{ см}^2$	$I \times 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$
1	26	12,4	676	57,12
2	24			
3	22			
4	20			
5	18			
6	16			
7	14	8,8	196	28,75
Координаты средней точки			422	41,72

Напоминаем, что в этой части работы проверяется факт линейной зависимости МИ I составного тела от квадрата расстояния l от центра каждого груза до оси вращения. Для этого расстояние l одновременно изменяют для всех подвижных грузов на одну и ту же величину при нахождении зависимости $I(l^2)$. Прямую, которая должна получиться, можно трактовать, как проявление свойства аддитивности момента инерции (момент инерции составного тела относительно оси равен сумме моментов инерции отдельных частей тела относительно той же оси).

К тому же прямолинейная зависимость $I(l^2)$ позволяет дать оценку массам подвижных грузов, если рассчитывать МИ каждого груза по формуле для МИ материальных точек, полагая, что вся масса груза $m_{гр}$ сосредоточена в его центре масс на расстоянии l от оси вращения, а именно:

$$I_{гр} = m_{гр}l^2$$

Тогда момент инерции всего маятника можно рассчитать как

$$I = I_{кр} + 4ml^2 \quad (2)$$

Последняя формула записана в предположении, что на крестовине в работе было закреплено четыре подвижных груза.

Нетрудно провести аналогию между использованной в работе формулой (2) и уравнением прямой линии в стандартных формах записи:

$$y = y_0 + kx,$$

если положить $x = l^2$, $y = I$.

В качестве $I_{кр}$ выступает начальная ордината y_0 прямой $I(l^2)$, то есть точка пересечения прямой с осью I при $l = 0$. Для этой точки (в согласии с (2)) момент инерции маятника $I = I_{кр}$. Состояние системы с таким значением I реализовать в работе не представляется возможным. Грузы нельзя расположить на крестовине так, чтобы их центры масс находились на оси вращения. Именно это соответствовало бы нулевому значению параметра l . Поэтому для нахождения $I_{кр}$ в работе снимаем экспериментальные данные с реальными значениями l . А полученную прямую $I(l^2)$ продляем до пересечения с осью I . Правильно говорить: **экстраполируем прямую линию на нулевое значение аргумента l^2** . Сказанное означает, что **масштаб по оси l^2 обязательно надо начинать с нулевой отметки. Для оси I желательно осуществить перенос начала координат.**

Угловым коэффициентом k полученной прямой $I(l^2)$ совпадает с величиной $4m$:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta I}{\Delta(l^2)} = 4m.$$

Последний факт и позволяет дать оценку массе каждого груза.

Рекомендуем: При подготовке к построению графика $I(l^2)$ исходим из того, что положение искомой прямой на поле графика должно быть близким к диагональному. Для получения такого результата нужно «предугадать» точку пересечения построенной прямой с осью y (здесь это ось I), чтобы правильно выбрать начальную отметку при нанесении масштаба по оси моментов инерции. Последняя должна быть чуть меньше искомого значения $I_{кр}$. Произведем

оценку величины $I_{кр}$. Для этого выполним простые математические действия. Обратимся еще раз к уравнению (2)

$$I = I_{кр} + kl^2.$$

По данным для l^2 и момента инерции системы I из первой и последней строк таблицы 2, которые будут координатами двух достаточно удаленных друг от друга точек на прямой, можно оценить угловой коэффициент прямой k и учесть возможное положение любой из этих двух точек на будущей прямой. Так, для точки, соответствующей первой строке таблицы, получается:

$$I_1 = I_{кр} + kl_1^2. \quad (3)$$

(Вместо (3) можно использовать равенство $I_8 = I_{кр} + kl_8^2$).

Запишем (3) в числовых данных согласно таблице. Эти числа можно округлить до двух значащих цифр. В таком оценочном расчете допустимо не загромождать запись указанием множителя 10^{-3} для моментов инерции; необязательно переводить значения l^2 в СИ, а именно:

$$57 \approx I_{кр} + \frac{57 - 29}{68 - 20} \cdot 68 \approx I_{кр} + 40.$$

Отсюда $I_{кр} \approx 17 \times 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Результат для $I_{кр}$ будет близок к этому значению. Полного совпадения может не быть, так как точки, координаты которых мы использовали в оценочном расчете, возможно, не попадут на прямую $I(l^2)$ точно. Напомним еще раз, что прямую мы проводим через среднюю точку, подбирая положение этой прямой таким, чтобы разброс экспериментальных точек относительно нее был минимальным. Делаем вывод: масштаб по оси I начнем с $(14 - 15) \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (немного отступим от оценочного значения в меньшую сторону). **Не потеряйте степень!**

Замечание. Проверим правильность своих действий по предложенному округлению чисел из таблицы. Подставим в последнюю формулу значения координат первой и последней точек с точностью, с которой они внесены в таблицу, без учета общего множителя 10^{-3} для моментов инерции

$$57,12 \approx I_{кр} + \frac{57,12 - 28,75}{676 - 196} \cdot 676 \approx I_{кр} + 39,955.$$

В результате получим для момента инерции крестовины $I_{кр} \approx 17,165 \times 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Расчеты в этом случае сложнее, а разница в ответах с тем, что найдено выше, для выбора масштаба несущественна.

Обращаем ваше внимание еще раз, что вы получите другие экспериментальные данные, но и для них несложно произвести подобные вычисления.

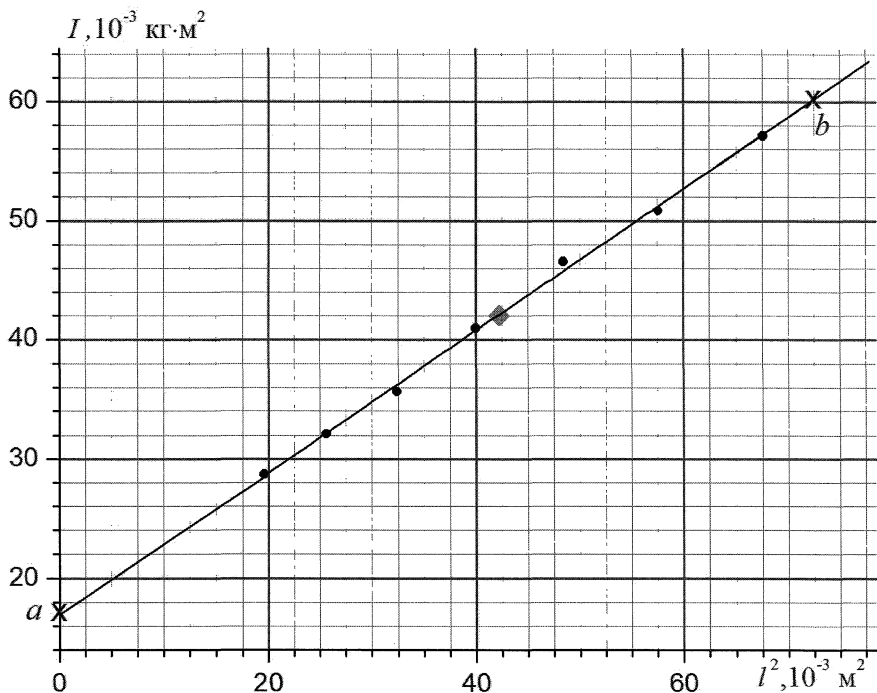


Рис. 2. Зависимость момента инерции маятника Обербека от квадрата расстояния между центрами подвижных грузов и осью вращения

Из графика $I = f(l^2)$ определяем:

момент инерции крестовины

$$I_{\text{кр.}}(\text{экс.}) = ? \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

масса подвижных грузов

$$m_{\text{гр.}} = \frac{(I_b - I_a)}{4 \cdot (l_b^2 - l_a^2)} = ? \text{ (кг)}. \quad (4)$$

Обратите внимание, что при построении графика табличные значения для l^2 были переведены в СИ. Например:

$$l^2 = 676 \text{ см}^2 = 67,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

При оценочных расчетах $I_{\text{кр}}$ для правильного выбора начала оси момента инерции это не было обязательным. Подумайте почему?

В расчетной формуле (4) для $m_{\text{тр}}$ используются координаты точек a и b на прямой $I(l^2)$ (четыре числа, снятые с графика), правильный выбор которых мы обсуждали при работе с графиком в первой части отчета. Например, не единственным, но вполне удачным видится выбор положения точек a и b , предложенный на нашем рисунке.

Вывод к данной работе может содержать ответ на ряд вопросов.

1. Говорит ли линейный характер полученной зависимости $I(l^2)$ о возможности расчета момента инерции (МИ) подвижных грузов как МИ материальных точек? В случае утвердительного ответа на этот вопрос попробуйте пояснить, чем это вызвано?

2. Как изменяется МИ составного сложного тела от распределения массы относительно оси вращения, то есть при удалении от оси или при приближении подвижных грузов к оси вращения?

Вывод, согласно графику $\alpha(M)$, можно дополнить оценкой величины моментов сил трения, действующих в системе во время эксперимента. Обратите внимание, что момент сил M уже не равен нулю, а угловое ускорение α все еще имеет нулевое значение. Это наблюдается до тех пор, пока момент приложенных к маятнику внешних сил не превысит момент сил трения в исследуемой системе.

В нашем примере $M_{\text{тр}} \approx 0,5 \times 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$, т.е. величина действительно малая по сравнению с моментами прилагаемых к маятнику внешних сил (см. данные табл. 1 и график $\alpha(M)$). Этим мы воспользовались в работе, не принимая во внимание моменты сил трения в расчетах.

2. Оформление отчета к лабораторной работе
**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ОБОРОТНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МАЯТНИКОВ»**

(работа № 7 по методическому пособию [1])

При выполнении данной лабораторной работы перед нами стоит задача определения ускорения свободного падения (в дальнейшем – g). Предлагается найти g , используя поочередно два маятника – математический и физический. Для чего два маятника? В результате проведенных опытов рассчитаем два значения ускорения свободного падения и сравним их с известным значением $g_{\text{чел}}$ для нашего региона. На основании полученных данных попробуем сделать вывод о том, для какого из маятников экспериментально найденная величина ускорения свободного падения окажется ближе к его табличному значению.

Вначале вспомним, что математическим маятником может служить любое тело небольших размеров по сравнению с длиной нерастяжимой, невесомой нити l , на которой оно подвешено и совершает колебательные движения в однородном поле сил тяготения (в этом случае $l = \text{const}$ и $g = \text{const}$).

Формула для ускорения свободного падения выведена из известного выражения для периода колебаний математического маятника:

$$g_{\text{мат}} = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Рассчитывая g по этой формуле, необходимо знать две величины: период одного колебания маятника T и длину нити l . Длина нити известна (приведена на установке), определим период одного колебания маятника T , измеряя время 10-ти или 5-ти его колебаний (по указанию преподавателя). Все опытные данные заносим в выделенную жирной рамкой строку табл. 1.

Таблица 1

$l, \text{м}$	$t, \text{с}$	N	$T, \text{с}$
2,16	29,30	10	?

Найдем значение периода одного колебания маятника T , используя результаты измерений:

$$T = \frac{t}{N} \quad (1)$$

где t – время N колебаний.

В нашем случае

$$T = \frac{29,30}{10} = 2,930 \text{ (с)}.$$

Определим ускорение свободного падения, используя расчетную формулу, приведенную выше:

$$g_{\text{мат}} = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 2,16}{(2,930)^2} = 9,923 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Найденное значение $g_{\text{мат}}$ записываем с точностью до 3-х знаков после запятой, так как далее должны сравнить его с табличным ($g_{\text{чел}} = 9,801 \text{ м/с}^2$) значением. Сравнить между собой можно величины одной размерности (однородные), представленные с одинаковой точностью, то есть когда последняя значащая цифра в их значениях расположена в одном и том же разряде.

Приступим к обработке результатов измерений **второй** части лабораторной работы, выполненных с обратным (**физическим** маятником). Напомним, что физическим маятником называется твердое тело, способное совершать колебания вокруг оси, не проходящей через его центр масс.

Работаем с экспериментальными данным, занесенными вами в табл. 2.

Таблица 2

1	2	3	4	5	6	7
$t_1, \text{с}$	$T_1, \text{с}$	№	$l, \text{см}$	$t_2, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	
13,0	1,30	1	46	12,0	1,20	
		2	45	12,2	1,22	$N = 10$
		3	44	12,4	1,24	
		4	43	12,7	1,27	$l_0 = ?$
		5	42	13,2	1,32	
		6	41	13,7	1,37	$T_0 = ?$
		7	40	14,5	1,45	
		8	39	15,6	1,56	
		9	38	17,0	1,70	
		10	37	19,1	1,91	
		11	36	22,9	2,29	
		12	35	30,1	3,50	
13,0	1,30					

Колонка **1** таблицы содержит время t_1 10-ти или 5-ти полных колебаний маятника (по указанию преподавателя), ось вращения маятника при этом проходит через одиночное отверстие **2** (см. рисунок в бланке отчета). В этом положении маятника измерение времени t_1 проводилось в начале опыта и повторилось в конце.

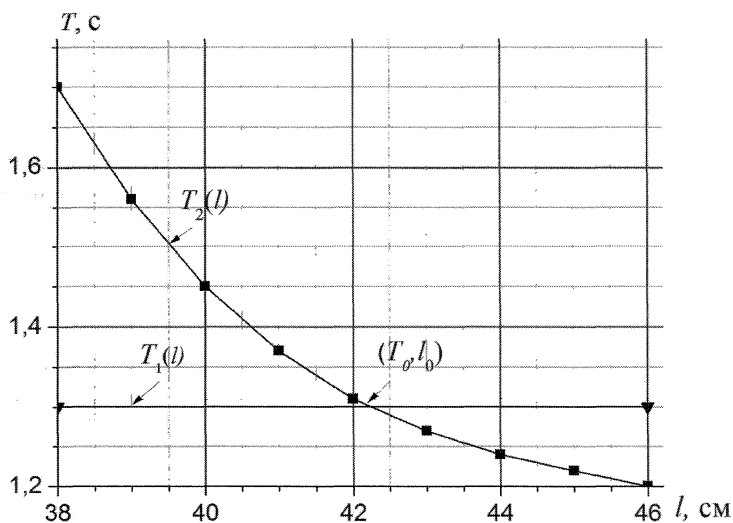
Двух измерений времени t_1 достаточно, чтобы убедиться в его постоянстве (в пределах погрешности измерений) и использовать этот результат при нахождении величин T_0 и l_0 , для расчета значения $g_{\text{физ}}$.

Данные в колонках **2** и **6** (**периоды одного колебания маятников**) снова рассчитываются по формуле (1).

Значения T_0 и l_0 определяем, построив **на общем поле в одном диапазоне аргумента l оба графика: $T_1(l)$ и $T_2(l)$** . Графики пересекутся в точке с координатами T_0, l_0 . При этих значениях T и l одинаковы периоды колебаний в начальном (T_1) и «перевернутом» (T_2) положениях маятника (поэтому маятник назван обратным!).

Напомним, что l – расстояние между осями вращения оборотного маятника во время его колебаний в начальном (ось колебаний проходит через одиночное отверстие) и «перевернутом» положениях.

Задачу по нахождению значений T_0 и l_0 будем решать графически. Поэтому экспериментальным графикам отводится главная роль в работе. Надеемся, что дальнейшие действия станут понятнее, если сначала привести графики, а затем подробно разобрать весь ход их построения.



Зависимости периодов колебаний физического маятника в первоначальном $T_1(l)$ и перевернутом $T_2(l)$ положениях от расстояния l между осями вращения

Отметим сразу, очень важно правильно выбрать рабочий диапазон значений для периода T_2 . Чтобы точнее определить по графику координаты искомой нами точки, нужно максимально «растянуть» масштаб по оси T . Это означает, что для построения зависимости $T_2(l)$ следует использовать не все значения T_2 из таблицы. Используем только те из них, которые находятся вблизи значения периода колебаний маятника в начальном положении на одиночном отверстии (у нас $T_1 = 1,3$ с). В колонке 6 таблицы 2 ближайшее к этому T_1 значение $T_2 = 1,32$ с. При построении графика $T_2(l)$ вполне достаточно взять из этой колонки по 3–4 точки выше и ниже от этого значения T_2 (в таблице они выделены темным фоном). Выбранному интервалу для T_2 (от 1,2 с до 1,7 с) соответствуют l от 38 см до 46 см. Ось времени следует начать со значения $T = 1,2$ с, отсчет параметра l – с 38 см.

Наносим экспериментальные точки для зависимостей $T_1(l)$ и $T_2(l)$ на поле графиков и проводим линии графиков. При этом линия для $T_1(l)$ – прямая, параллельная оси l при **усредненном** значении T_1 . **В нашем** случае оба значения $T_1 = 1,3$ с, ваши измеренные значения T_1 *могут слегка различаться*. Координаты точки пересечения графиков $T_1(l)$ и $T_2(l)$ будут искомыми в работе. В показанном примере графики пересекаются в точке с координатами $T_0 = 1,3$ с и $l_0 = 42,2$ см.

Подставляя полученные значения l_0 и T_0 в расчетную формулу для $g_{\text{физ}}$, не забудьте перевести значения всех величин в СИ.

$$g_{\text{физ}} = \frac{4\pi^2}{T_0^2} l_0 = \frac{4 \cdot (3,14)^2 (42,2 \cdot 10^{-2})}{1,3^2} = 9,847 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

В подзаголовках «Математический маятник» и «Физический маятник» оцениваются погрешности измерений. Оценку погрешностей производим, сравнивая расчетные значения $g_{\text{мат}}$ и $g_{\text{физ}}$ с табличным $g_{\text{чел}}$.

Абсолютная погрешность ускорения для случая **математического** маятника:

$$\Delta g_{\text{мат}} = |g_{\text{чел}} - g_{\text{мат}}| = |9,801 - 9,923| = 0,122 \text{ (м/с}^2\text{)},$$

относительная погрешность:

$$\delta g_{\text{мат}} = \frac{\Delta g_{\text{мат}}}{g_{\text{чел}}} = \frac{0,122}{9,801} = 0,0125 = 1,25 \text{ (\%)}.$$

Абсолютная погрешность ускорения для случая **физического** маятника:

$$\Delta g_{\text{физ}} = |g_{\text{чел}} - g_{\text{физ}}| = |9,801 - 9,847| = 0,0470 \text{ (м/с}^2\text{)},$$

относительная погрешность:

$$\delta g_{\text{физ}} = \frac{\Delta g_{\text{физ}}}{g_{\text{чел}}} = \frac{0,047}{9,801} = 0,0048 = 0,48 \text{ (\%)}.$$

Чтобы записать окончательный результат для $g_{\text{экс}}$, следует из двух найденных в работе значений $g_{\text{мат}}$ и $g_{\text{физ}}$ выбрать наиболее близкое к табличному ($g_{\text{чел}} = 9,801 \text{ м/с}^2$). А именно: **искомым** будет значение g , **относительная погрешность** которого **меньше**. Поясним это на примере расчетов в нашей работе. Выяснено, что относительные погрешности для g в двух случаях связаны следующим образом: $\delta g_{\text{физ}} < \delta g_{\text{мат}}$. Это означает, что, хотя погрешность результатов в обоих методах измерения небольшая (0,48 % и 1,25 %), но в **рассмотренном нами случае** физический маятник позволил получить более точное значение для ускорения свободного падения. Отразите это в выводе к лабораторной работе.

Записываем окончательный результат, найденный в эксперименте с физически маятником, в виде доверительного интервала, **не забывая правила округления** (см. приложение 1 к данному пособию!):

$$g = (9,85 \pm 0,05) \text{ м/с}^2.$$

Еще раз напоминаем, что ширина доверительного интервала совпадает с абсолютной погрешностью результата измерения.

На рассмотренном примере показан стандартный образец подхода к оформлению многих работ лабораторного практикума:

— если существует табличное значение искомой величины, найденный результат сравнивается с ним;

— если искомая в работе величина находилась **несколькими методами**, то при записи конечного результата в качестве ответа приводим тот, у которого *относительная* погрешность минимальна. Сравнимые погрешности определяются по отношению к известному (табличному) значению.

Следует понимать, что ваши результаты, а вместе с ними и выводы по работе, могут (и будут!) отличаться от приведенных в пособии. Свою задачу авторы издания видят в том, чтобы показать последовательность выполняемых расчетов и рассуждений.

3. Оформление отчета к лабораторной работе «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА» (работа №12 по методическому пособию [1])

Таблица 1 заполняется студентом до выполнения экспериментальной части работы. Она отражает степень подготовки студента к эксперименту и меру его понимания процессов, которые необходимо осуществить над газом (у нас над воздухом) в методе Клемана – Дезорма для нахождения отношения теплоемкостей газа.

Содержание таблицы отвечает диаграмме $P - V$, представленной в бланке отчета к лабораторной работе. Для описания процессов, происходящих с газом в стеклянном баллоне, используем два параметра газа. Это давление P и температура T воздуха. При заполнении таблицы студент должен не только указать название соответствующего процесса, но и разобраться с тем, как соотносятся параметры воздуха в лаборатории (P_n, T_n) и в баллоне (P_i, T_i) в начале и в конце каждого из происходящих с газом изопроцессов.

Заполним вместе первую строку табл. 1. В состоянии **1** (смотрим диаграмму процесса в бланке отчета) газ пришел не сразу. Сначала в баллон накачивается воздух до избыточного, по сравнению с атмосферным, давления. Рост давления газа в сосуде постоянного объема сопровождался повышением температуры воздуха. Затем 2-х–3-х минут достаточно для того, чтобы в результате теплообмена с окружающей средой через стенки сосуда, система пришла в состояние равновесия – состояние **1**. За это время газ остывает до температуры $T_1 = T_n$. Давление воздуха в баллоне остается выше лабораторного, то есть $P_1 > P_n$. Последнее видно из показаний водяного манометра. Данный прибор позволяет, снимая H , определить избыток давления в баллоне по сравнению с атмосферным, а именно: $P_1 = P_n + \rho g H$. Здесь H – разность уровней жидкости в капиллярах манометра в миллиметрах водяного столба, ρ – плотность воды, а g – ускорение свободного падения. Из этого состояния (при открывании крана, соединяющего воздух в баллоне с атмосферой) начинается адиабатический процесс расширения газа. Газ частично выходит из баллона. На диаграмме $P - V$ переход обозначен как процесс **1–2**. Открываем кран на указанный в работе интервал времени: давление быстро падает до атмосферного, газ переходит в состояние с $P_2 = P_n$. Адиабатическое расширение газа всегда сопровождается его охлаждением. Поэтому процесс **1–2** завершается при температуре $T_2 < T_n$.

Дальнейшее заполнение таблицы выполняется студентом самостоятельно. Примите во внимание рассуждения, приведенные выше, продолжите анализ диаграммы процессов, производимых над газом в данной лабораторной работе!

Обратите внимание, что при заполнении таблицы окончание одного процесса является началом следующего!

Таблица 1

Процесс	Название процесса	Направление процесса (сжатие– расширение, нагревание – охлаждение)	Соотношение параметров воздуха в баллоне P_i и T_i и в лаборатории P_L и T_L			
			начальные		конечные	
1–2	Адиабатический	расширение охлаждение	$P_1 > P_L$	$T_1 = T_L$	$P_1 = P_L$	$T_1 < T_L$
2–3						
3–1					$P_1 > P_L$	$T_1 = T_L$

Обсудив качественно процессы, происходящие с газом в работе, обратимся к количественным результатам выполненного эксперимента. Последние содержатся во второй строке табл. 2 и выделены жирным шрифтом. **Ваши результаты будут отличаться от приведенных в таблице.**

Таблица 2

$H=210$ мм	t, c	5	10	15	20	25	0	Координаты средней точки
	$h, мм$	47				16		$\bar{t} = ?$
	$\ln h$	3,85				2,77		$\overline{\ln h} = ?$

Для заполнения 3-ей строки используем таблицы логарифмов или калькулятор. Рассчитайте (по данным первой и третьей строк) и внесите в таблицу (вместо знаков «вопрос») координаты средней точки \bar{t} и $\overline{\ln h}$. Пустые ячейки таблицы будут заполнены после построения графика $\ln h(t)$.

Напомним, что время t в таблице – это время, на которое воздух в баллоне соединяется с атмосферой в процессе **1–2**, h – разность (в миллиметрах водяного столба) уровней жидкости в трубках манометра в состоянии **3** на диаграмме процесса.

Основной задачей работы является определение значения h , соответствующего бесконечно малому времени соединения газа в баллоне с атмосферой, в пределе для $t = 0$ с (далее обозначается как h_0). Это наиболее полно соответствует адиабатическому переходу газа из состояния **1** в состояние **2** (диаграмма $P-V$ в отчете). Поясним: адиабатический процесс должен быть быстрым по времени протекания ($t \rightarrow 0$ с) для минимизации затрат по теплообмену с внешней средой. Используемая система «баллон – воздух» не теплоизолированная. Кран, соединяющий воздух в баллоне с атмосферой, невозможно реально открыть на столь короткий промежуток времени $t = 0$ с. Учтем вышесказанное и поставленную задачу (найти $h = h_0$) будем решать графически методом экст-

раполяции **линейной зависимости** $\ln h(t)$ на нулевое значение аргумента (нахождения значения функции $\ln h(t=0)$).

Поэтому, продолжением работы является построение графика на основе опытных данных. График будем строить в координатах $\ln h$ и t . Почему? Ведь нас интересует значение h_0 ?! Как мы его найдем? И откуда появляется линейная зависимость $\ln h(t)$?

Для ответа на эти вопросы дадим некоторые пояснения. Опытным путем установлено, что результаты экспериментов по выявлению зависимости $h(t)$ хорошо описываются формулой

$$h = h_0 e^{-\alpha t}, \quad (2)$$

где α – некая положительная константа ($\alpha > 0$). Из формулы (2) видно, что при $t = 0$ с значение $h = h_0$.

Имея зависимость такого вида, для нахождения значения параметра h_0 графически часто применяется **метод линеаризации**. Чтобы им воспользоваться, достаточно взять логарифмы от левой и правой частей равенства (2) и приравнять результаты логарифмирования. Получаем выражение:

$$\ln h = \ln h_0 - \alpha t. \quad (3)$$

Если функция h в (2) убывала с ростом параметра t по экспоненте, то функция $\ln h$ линейно изменяется с изменением аргумента t . *В этом и заключается метод линеаризации зависимости* (2). Заметим (для нас это важно), что и из уравнения (3) следует: при значении аргумента $t = 0$ $\ln h = \ln h_0$, а значит, соответствующее $h = h_0$. Вот почему уравнение (3) лежит в основе графического способа нахождения h_0 . План дальнейшей работы определен.

Уравнение (3) тождественно уравнению прямой линии

$$y = y_0 + kx,$$

если положить $y = \ln h$, $y_0 = \ln h_0$, $k = -\alpha$, $x = t$.

Для нашего случая (см. (3)) угловой коэффициент прямой $\ln h(t)$ отрицательный ($k = -\alpha < 0$, т.к. $\alpha > 0$).

Именно линейная зависимость $\ln h(t)$ позволяет, выполнив эксперимент при реальных значениях параметра t , построив график $\ln h(t)$, продлить полученную линейную зависимость на недоступную для эксперимента область значений аргумента. В интересующем нас случае экстраполируем график на нулевое значение аргумента ($t = 0$ с).

Разобрались с идеей «реализации» адиабатического процесса в реальной не теплоизолированной системе. Следующим этапом в работе будет построение графика $\ln h(t)$, и здесь очень важно **грамотно выбрать масштаб** по осям. Исходим из следующих соображений:

1) из приведенного выше, ясно, что ось времени обязательно начинаем со значения $t = 0$ с, максимальное значение $t = 25$ с;

2) для повышения точности считывания по графику искомого значения $\ln h_0$, следует за начало отсчета по оси ординат (вместо нуля) взять значение $\ln h$ чуть меньше минимального из экспериментально полученных значений в табл. 2 ($\ln h_{\text{мин}} = 2,77$). О такой ситуации при построении графика говорят, что **осуществлен перенос начала координат** по оси $\ln h$. За начало данной оси неплохо принять $\ln h = 2,7$;

3) чтобы *искомая точка пересечения графика с осью ординат попала на поле графика*, нужно последнюю отметку по оси безразмерной величины $\ln h$ выбрать больше максимального из экспериментальных значений (по табл. 2 – это $\ln h = 3,85$). Оценить величину последней отметки по оси $\ln h$ поможет следующее примечание.

Примечание. *Чтобы не ошибиться при выборе масштаба по оси $\ln h$ и оценить положение точки, в которой построенная вами прямая линия пересекается с указанной осью, следует произвести ПРОСТЫЕ математические действия. В уравнении прямой линии (3)*

$$\ln h = \ln h_0 + kt$$

угловой коэффициент $k = -\alpha$ (см. выше) рассчитаем по координатам двух известных нам из табл. 2 наиболее удаленных друг от друга точек на ожидаемой прямой со значениями аргумента $t = 5$ с и $t = 25$ с, соответственно. А для одной из них (например, для точки при $t = 5$ с) учтем, что она «должна» попасть на строящуюся прямую линию. Тогда в координатах этих двух точек последнее соотношение можно переписать так:

$$3,85 \approx \ln h_0 + \frac{2,77 - 3,85}{25 - 5} \cdot 5.$$

Отсюда

$$\ln h_0 \approx 3,85 + 0,27 = 4,12$$

Исходя из проведенных расчетов, выбираем за максимальную отметку по оси $\ln h$ значение 4,2 (с запасом по отношению к полученному оценочному значению $\ln h_0$).

Обратите внимание: результаты эксперимента, полученные вами, наверняка, будут отличны от приведенных в пособии. Выполните аналогичные действия со своими данными.

Наносим экспериментальные точки на поле графика, включая **среднюю** точку из таблицы, выделяя ее особо (ромб серого цвета).

Последняя, на нашем графике, практически совпала с одной из экспериментальных точек (средняя точка в сером цвете практически перекрыла собой экспериментальную точку при $t = 15$ с). Через отмеченную среднюю точку проводим прямую линию (с минимальным разбросом экспериментальных точек относительно этой прямой).

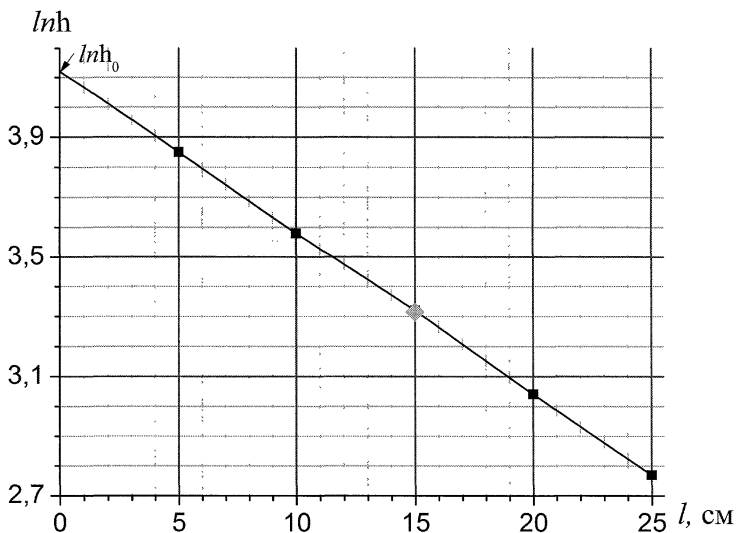


График зависимости $\ln h(t)$

Продолжаем линию графика до пересечения с осью $\ln h$, т.е. экстраполируем ее на нулевое значение аргумента. Подобный прием уже применялся нами при оформлении первого отчета к работе в нашем пособии. Определяем значение $\ln h_0$ и заносим в табл. 2.

Искомое h_0 находим, пользуясь таблицей логарифмов. В нашем случае по графику определено значение $\ln h_0 = 4,12$, откуда $h_0 = 62$.

Авторы пособия были немного удивлены практически полному, до 3-го знака, совпадению **оценочного** и **полученного** значений $\ln h_0$. Такое совпадение связано с тем, что экспериментальные точки замечательно «легли» на прямую линию. Это является следствием успешно выполненного эксперимента и на практике случается далеко не всегда.

Поставленная ранее задача определения h_0 по результатам серии опытов, проведенных при одном и том же начальном значении H , выполнена. Эти параметры (H и h_0) определяют в работе искомую величину γ – отношение молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме.

Расчёт **отношения теплоемкостей** $\gamma_{\text{экс}}$ выполняется в методе Клемана-Дезорма по формуле:

$$\gamma_{\text{экс}} = \frac{H}{H - H_0}.$$

Опытные данные приводят к следующему значению $\gamma_{\text{экс}}$:

$$\gamma_{\text{экс}} = \frac{210}{210 - 62} = 1,4189.$$

Применив в работе метод Клемана-Дезорма, экспериментальным путем было найдено значение $\gamma_{\text{экс}}$. Насколько полученный результат хорош, и как можно оценить достоверность принятого предположения в работе о составе воздуха?

Напомним, что участвующий в эксперименте воздух предлагалось считать состоящим только из двухатомных молекул. Воспользовавшись этим, можно определить γ теоретически, через понятие числа степеней свободы. Для двухатомных газов характерно наличие у молекул пяти степеней свободы (трех – поступательного и двух – вращательного движения), т.е. $i = 5$.

Напомним, что зная i , даже не выполняя эксперимента, теоретически, возможно рассчитать значение $\gamma_{\text{расч}}$:

$$\gamma_{\text{расч}} = \frac{i+2}{i}. \quad (4)$$

Например, для двухатомного газа:

$$\gamma_{\text{расч}} = \frac{5+2}{5} = 1,4.$$

Но дело в том, что воздух, как многие реальные газы, представляет собой смесь газов (N_2 , O_2 , Ar , CO_2 , H_2 , H_2O , Kr ,...). Поэтому указать для смеси газов определенное значение i не представляется возможным. А, следовательно, нельзя напрямую воспользоваться формулой (4) для нахождения параметра γ . Метод Клемана–Дезорма, с которым вы познакомились в данной лабораторной работе, является одним из способов решения этой задачи.

Пора подвести итоги. Как правило, значение $\gamma_{\text{экс}}$, полученное при проведении эксперимента, отличается от $\gamma_{\text{расч}}$. Для записи окончательного результата сравниваем между собой эти значения γ .

Для нашего примера абсолютная погрешность результата работы рассчитывается как:

$$\Delta\gamma = 1,4189 - 1,4 = 0,0189,$$

тогда относительная погрешность:

$$\delta\gamma = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{|1,4-1,419|}{1,4} \cdot 100 \% = 1,36 (\%).$$

Полученная нами низкая погрешность говорит в пользу предположения о составе воздуха. Применяя правила округления (см. приложение 1 к данному пособию), запишем окончательный результат для значения отношения теплоемкостей воздуха:

$$\gamma = 1,419 \pm 0,019.$$

Далее, в поле бланка отчета, отведенном для вывода, приведите расчеты значений $\gamma_{\text{расч}}$ для *одноатомного* и *многоатомного* газов по формуле (4) с учетом числа степеней свободы молекул i для указанных газов. Сравнивая найденные вами $\gamma_{\text{расч}}$ с результатом эксперимента $\gamma_{\text{эксп}}$, можно предположить, что воздух в лаборатории содержит кроме двухатомных молекул в достаточном (немалом) количестве одно- или многоатомные молекулы, соответственно. Для такого вывода **достаточно заметить**, в сторону какого из рассчитанных вами значений $\gamma_{\text{расч}}$ (для одноатомного или многоатомного газа) смещено найденное в работе $\gamma_{\text{эксп}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью этого методического пособия авторы ставили разъяснение самых трудных для студентов моментов, встречающихся при оформлении отчетов к лабораторным работам. Обсуждение велось на конкретных примерах отчетов к работам по первому циклу дисциплины «Общая физика».

Приступая к лабораторному практикуму в следующих семестрах, откройте это пособие еще раз. Содержание пособия составлено в расчете на то, что оно будет помогать студентам в означенной выше работе на протяжении всего курса общей физики. Приемы и методы обработки и представления экспериментальных данных, наработанные вами в результате знакомства с содержанием пособия, применимы и в дальнейшей вашей работе.

Здесь речь идет о выработке следующих навыков и умений:

1. Нахождение физических величин по расчетным формулам и данным выполненного эксперимента. Знакомство с правилами заполнения рабочих таблиц.
2. Построение графиков и работа с ними, включая:
 - а) выбор масштабов по осям с возможным переносом начала отсчета по осям, чтобы график заполнял все отведенное для него поле; проведение прямой графика через среднюю точку, если исследуемая зависимость линейная;
 - б) нахождение углового коэффициента прямой;
 - в) оценка погрешности проведенного эксперимента по разбросу экспериментальных точек относительно построенной прямой линии.
3. Использование метода линеаризации физических зависимостей с последующей аппроксимацией полученных (в новых координатах) линейных зависимостей на нужное значение аргумента.
4. Представление окончательного результата в виде доверительного интервала с учетом принятых правил округления.
5. Умение сравнить полученный результат с известными экспериментальными или теоретическими данными.
6. Умение сформулировать выводы по работе в соответствии с поставленной в ней целью, с учетом особенностей полученных результатов.

Желаем вам успехов!

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Механика и молекулярная физика: учебное пособие к выполнению лабораторных работ / В.К. Герасимов, А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов и др.; под ред. В.П. Бескачко – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 96 с.
2. Электричество и магнетизм: учебное пособие к выполнению лабораторных работ по курсу физики / Л.Ф. Гладкова, А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов, Т.Н. Хоменко и др.; под редакцией А.Е. Гришкевича – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. – 111 с.
3. Оптика. Учебное пособие к выполнению лабораторных работ / А.Е. Гришкевич, Г.П. Пызин, В.Г. Речкалов, А.Е. Чудаков; под редакцией В.П. Бескачко – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. – 60 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Как правильно записать ответ для найденной в лабораторной работе величины x .

Пусть целью работы было определение величины x . Ответ представляем в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x.$$

При записи ответа придерживайтесь следующих правил:

1. Нашли среднее значение искомой величины \bar{x} ее абсолютную погрешность Δx . Вплоть до окончательного представления результата все рассчитываемые величины записываются в виде чисел с (3 – 4) значащими цифрами. Напомним, что **значащими цифрами называются** все цифры в десятичном представлении числа, кроме нулей, стоящих в начале числа. Например, в числе 0,004020 первые три нуля не являются значащими. Они служат только для установления десятичных разрядов остальных цифр. Нули после цифр «4» и «2» значащими являются.

Позволим себе привести еще два примера:

а) в числах 1,23 и 0,0123 – по три значащих цифры и первая из них единица;
б) в числах 0,3210 и 32,10 – по четыре значащих цифры и последняя из них цифра ноль (0). Записав ноль в конце числа, вы уверяете, что после единицы (в приведенных примерах) идет именно ноль.

2. Записывая ответ, сначала смотрим на значение Δx . Если первая значащая цифра в Δx 1 или 2, то при записи ответа **в числе Δx оставляем две значащие цифры**. В остальных случаях (если первая значащая цифра в числе Δx из ряда цифр 3,4,...9), **Δx записываем в виде числа с одной значащей цифрой**.

3. Округлив правильно Δx , в значении величины \bar{x} последнюю значащую цифру оставляем в том разряде, в каком последняя цифра погрешности Δx .

Примеры:

если $\bar{x} = 1,23456$, а $\Delta x = 0,123$, то $x = 1,23 \pm 0,12$
 $\Delta x = 0,321$ $x = 1,2 \pm 0,3$
 $\Delta x = 0,0279$ $x = 1,234 \pm 0,028$
 $\Delta x = 0,0072$ $x = 1,234 \pm 0,007$
 $\Delta x = 0,000516$ $x = 1,2346 \pm 0,0005$;

если $\bar{x} = 5,7168$, а $\Delta x = 0,128$, то $x = 5,72 \pm 0,13$
 $\Delta x = 0,746$ $x = 5,7 \pm 0,7$
 $\Delta x = 0,0235$ $x = 5,717 \pm 0,024$
 $\Delta x = 0,0245$ $x = 5,717 \pm 0,024$.

В двух последних примерах показано правило округления (см. за величиной Δx), когда за последней цифрой, которую надо оставить в числе, идет цифра 5 и она последняя в этом числе. Тогда:

а) или последнюю значащую цифру в Δx округляют до ближайшего четного, как в приведенных примерах;

б) или точнее (с большим числом значащих цифр) надо рассчитывать округляемое число.

Например: если $\bar{x} = 5,7168$, а $\Delta x = 0,02452$, то $x = 5,717 \pm 0,025$.

4. Не забудьте числовой результат для $\bar{x} \pm \Delta x$ взять в круглые скобки, так как далее вам обязательно надо указать для \bar{x} и Δx их общую размерность. По необходимости, **перед размерностью надо** вынести **одинаковый** общий множитель для искомой величины и ее абсолютной погрешности в виде числа десять в целой степени ($10^{\pm k}$).

Примеры:

$$I = (5,63 \pm 0,28) \times 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$R = (10,4 \pm 1,1) \times 10^6 \text{ Ом} = (10,4 \pm 1,1) \text{ МОм}.$$

Доверительный интервал (ДИ) и доверительная вероятность (ДВ)

Окончательный результат работы по возможности записывают в виде доверительного интервала, не меняя правила его представления, описанные выше, если существует возможность дать оценку величине доверительной вероятности P . Последняя представляет собой вероятность, с которой можно утверждать, что искомая в работе величина x попадает вовнутрь найденного интервала, то есть

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x.$$

Существует ряд способов определения ширины доверительного интервала Δx (она же абсолютная погрешность величины x) и соответствующей этой ширине доверительной вероятности P .

1. Можно ознакомиться с оценочным упрощенным методом (метод Корнфельда). В этом методе Δx определяют по разнице (или ее половине) между максимальным и минимальным значениями величины x , полученными в серии **измерений x числом N при одинаковых условиях эксперимента**. Такая оценка ширины ДИ приводит к значению доверительной вероятности P , мало отличающемуся от единицы при большом числе опытов N :

$$P = 1 - (1/2)^{N-1}.$$

2. В первой части работы №3 по определению момента инерции маятника был использован **графический способ оценки ширины доверительного интервала Δx** . И в этом случае для величины P предлагается использовать предыдущую формулу, так как **опыты повторялись в схожих условиях**, а именно: грузы не перемещались по крестовине, следовательно, искомый момент инерции маятника не менялся.

Более точные статистические способы определения Δx с соответствующей величиной доверительной вероятности P будут использованы в лабораторном практикуме по общей физике в последующих разделах курса. Желающие могут уже сейчас ознакомиться с ними по методическому пособию к выполнению лабораторных работ.

Приложение 2

Прямая линия: уравнение, разрешенное относительно ординаты («с угловым коэффициентом»)

Всякую прямую, не параллельную оси координат, для функции $y(x)$ можно представить уравнением вида:

$$y = y_0 + kx. \quad (1)$$

Здесь k – тангенс угла α (рис. П1), образованного прямой с положительным направлением оси абсцисс (ось аргумента). То же самое можно сказать еще и так: k – это тангенс угла наклона прямой по отношению к оси абсцисс.

$$k = \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{tg} \angle L'S.$$

А число y_0 по абсолютному значению равно длине отрезка OM , отсекаемому прямой линией на оси ординат. Число y_0 положительно или отрицательно в зависимости от направления отрезка OM относительно начала координат. Если прямая проходит через начало (т. O), то $y_0 = 0$ (рис. П2).

Величину k называют **угловым коэффициентом прямой**, y_0 – **начальной ординатой**.

Величину, обратную k , можно трактовать, как тангенс угла наклона прямой по отношению к оси ординат ($\operatorname{tg} \beta$ на рис. П2). Поясним:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \operatorname{tg} \beta.$$

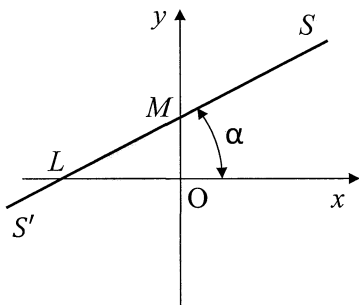


Рис. П1

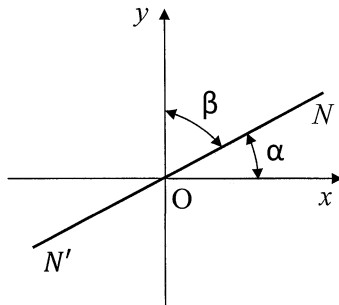


Рис. П2

КАК ПРАВИЛЬНО ОФОРМИТЬ И ПРЕДСТАВИТЬ
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Методические указания

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 02.11.2015. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,09. Тираж 50 экз. Заказ 603/707.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика
в типографии Издательского центра ЮУрГУ,
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.