

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРАКТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Направление подготовки 03.03.02 Физика
Направленность (профиль)
«Фундаментальная и прикладная физика»

**Ставрополь
2026**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 (расчетная).	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 (расчетная).	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 (расчетная).	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 (расчетная).	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 (расчетная).	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 (расчетная).	49
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ	57
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. МЕТОДЫ РАБОТЫ С ОПТИЧЕСКИМ МИКРОСКОПОМ	66
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. ТОЧНОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ	84
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	92
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПО КРИВОЙ РАЗРЯДА	106
Методические указания для обучающихся по организации и проведению самостоятельной работы.....	113
ВВЕДЕНИЕ	115
ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	117
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность учебной дисциплины «Практическая физика» обусловлена необходимостью формирования у будущих бакалавров теоретико-методологических компетенций, практических умений на которых базируется профессиональная деятельность в физике. В современных условиях важнейшим элементом подготовки бакалавров в области физики является формирование у них самостоятельности и культуры научного мышления, способности вести научную и профессиональную деятельность, навыков постановки целей, задач при решении проблемных ситуаций.

Целью лабораторных занятий является формирование профессиональных компетенций бакалавра по направлению 03.03.02 Физика, связанных со способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.

Основные задачи дисциплины:

- ознакомление студентов с основами теории ошибок;
- овладение навыками работы с простейшими измерительными приборами (штангенциркуль, микрометр, сферометр, технические и электронные весы, оптический микроскоп, электроизмерительные приборы),
- овладение методами статистической обработки результатов эксперимента и их наглядного представления.

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

ИД-1_{ПК-2}

владеет навыками работы с современным приборным оборудованием для проведения научных исследований в своей профессиональной деятельности;

ИД-2_{ПК-2}

владеет навыками применения современных информационных технологий для проведения, анализа и обработки результатов научных экспериментов (в том числе в автоматизированном режиме).

ИД-3_{ПК-2}

анализирует результаты научно-

исследовательской деятельности, сопоставляет их с известными аналогами, и представляет в виде отчетных материалов;

ИД-4_{ПК-2}

готовность грамотно представлять результаты исследований в том числе в виде докладов и публикаций на научных конференциях различного уровня.

ИД-2ПК-5

умеет обрабатывать и анализировать полученные данные с помощью современных информационных технологий.

Цель данного практикума – описание последовательности, основного содержания, методики выполнения лабораторных занятий по учебному курсу и (или) самостоятельной подготовки к ним. Занятия проводятся в форме лабораторной работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 (расчетная).

ЗАПИСЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ. НОРМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЧИСЛА.

1. Приведите примеры, в которых одна и та же физическая величина может иметь несколько буквенных обозначений.
2. Приведите примеры, в которых одной и той же буквой могут обозначаться разные физические величины.
3. Приведите примеры прямых и косвенных измерений.
4. Сколько значащих цифр содержится в каждом из следующих чисел:
а) 12,0; б) 30; в) $120 \cdot 10^3$; г) $0,514 \cdot 10^4$; д) 0,0056.
5. Округлите каждое из следующих чисел до четырех значащих цифр:
а) 5644835; б) $2,3678 \cdot 10^3$; в) 45870; г) 0,00238866; д) $0,54 \cdot 10^6$
6. Перепишите следующие ответы в наиболее наглядном виде с нужным числом значащих цифр:
а) измеренная высота $h=5,03 \pm 0,04329$ м;
б) измеренное время $t=19,5432 \pm 1$ с;
в) измеренный заряд $q=-3,21 \cdot 10^{-19} \pm 2,67 \cdot 10^{-20}$ Кл;
г) измеренная длина волны $\lambda=0,000000563 \pm 0,00000007$ м;
д) измеренный импульс $p=3,267 \cdot 10^3 \pm 42$ г·см/с.
2. Студент измеряет плотность жидкости пять раз и получает следующие результаты (в г/см³): 1,8; 2,0; 2,0; 1,9; 1,8. Что вы могли бы предположить о наилучшей оценке и погрешности, основываясь на его экспериментах. Табличное значение плотности данного вещества равно 1,85 г/см³. Каково различие между наилучшей оценкой и принятым значением? Значимо ли оно? Подберите подходящее вещество по данным задачи.
3. Рассчитайте погрешности в процентах для пяти измерений, приведенных в задаче 6 (не забудьте округлить до разумного числа значащих цифр).
4. Калькулятор студента показывает результат 123,123. Если студент решил, что это число в действительности имеет только три значащие цифры, оцените, каковы его абсолютная и относительная погрешности. Сделайте то же для числа 0,123123 и числа 321,321.
5. С помощью деревянной линейки можно произвести отсчет с точностью до миллиметра, а с помощью штангенциркуля - до 0,1 мм. Предположим, вы хотите измерить длину 2 см с точностью 1%. Можно ли сделать это при помощи линейки и штангенциркуля?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Проиллюстрируйте принцип физического познания природы.
2. Что такое наблюдение и опыт, в чем общее и различие.
3. Эксперимент, основные типы.
4. Проведите классификацию экспериментов по различным основаниям.
5. Перечислите основные принципы физического эксперимента.
6. Каков план подготовки к лабораторной работе.
7. Опишите типы физических величин, приведите примеры.
8. Что такое нормальное представление числа? Какие цифры называются значащими и незначащими? Приведите примеры.
9. Как оценить абсолютную и относительную погрешности измерений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 (расчетная).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.

1. В эксперименте по проверке закона сохранения момента импульса студент получил результаты для начального L и конечного L' моментов импульса вращающейся системы, которые представлены в таблице 1. Добавьте к таблице дополнительные столбцы для разности $L-L'$ и её погрешности. Согласуются ли полученные результаты с законом сохранения момента импульса?

Таблица 1.

Начальный момент импульса L , кг·м ² /с	Конечный момент импульса L' , кг·м ² /с
3,0±0,3	2,7±0,6
7,4±0,5	8,0±1
14,3±1	16,5±1
25±2	24±2
32±2	31±2
37±2	41±2

6. Используя данные предыдущей задачи, постройте график зависимости конечного момента импульса L' от начального L для описанного там эксперимента. Нарисуйте горизонтальные и вертикальные черточки ошибок. Отчетливо разметьте оси, выберите разумный масштаб, таким образом, чтобы график включал начало координат. Лежат ли точки на ожидаемой кривой с учетом экспериментальных погрешностей?
7. а) Студент измеряет две величины a и b и получает $a=11,5\pm0,2$ см и $b=25,4\pm0,2$ см. Затем он вычисляет произведение $q=a\cdot b$. Получите его ответ и приведите значение абсолютной и относительной погрешности.
б) повторите действия задания а) для $a=10\pm1$ см и $b=27,2\pm0,1$ с.
в) повторите действия задания а) для $a=0,8\text{ м}\pm8\%$ и $b=1,5\text{ кг}\pm2\%$.
8. Время 10 оборотов диска проигрывателя измеряется путем фиксирования моментов времени начала и конца вращения при помощи низкокачественных ручных часов с последующим вычитанием одной величины из другой. Если время начала и конца вращения имеют погрешность ± 1 с, то какова погрешность времени 10 оборотов, одного оборота?
9. Если камень бросить вверх со скоростью v , то он должен подняться до высоты h , определяемой уравнением $v^2=2gh$. Т.е. величина v^2 должна быть пропорциональна h . Для проверки этого проведены семь измерений и полученные результаты представлены в таблице 2. Постройте график зависимости v^2 от h , включая вертикальные и горизонтальные черточки ошибок. Определите значение ускорения свободного падения g . Наклон графика должен быть равен $2g$. Чтобы найти наклон, проведите наилучшую, по вашему мнению, прямую через начало координат и все остальные точки и затем определите её наклон.

Таблица 2.

v^2 , м ² /с ²	h , м ($\pm 0,05$ м)
7±3	0,4
17±3	0,8

25 ± 3	1,4
38 ± 4	2,0
45 ± 5	2,6
62 ± 5	3,4
72 ± 6	3,8

Используя график найдите погрешность в измерении ускорения свободного падения. Для этого проведите наиболее крутую и наименее крутую прямые ещё разумно совпадающие с точками. Наклоны этих прямых дадут наибольшее и наименьшее значения наклона. Согласуются ли ваши результаты с табличным значением g ?

10. Чтобы рассчитать ускорение тележки, измеряют её начальную и конечную скорости v_1 и v_2 и вычисляют разности $(v_1 - v_2)$. Данные для двух независимых испытаний (в см/с) приведены в таблице 3. Все четыре результата измерений характеризуются погрешностью в 1%.

- вычислите абсолютные погрешности всех четырех измерений, найдите разности $(v_1 - v_2)$ и её погрешность для каждого испытания;
- вычислите погрешность в процентах для каждого из двух значений $(v_1 - v_2)$.

Таблица 3.

	v_1	v_2
Первое испытание	14,0	18,0
Второе испытание	19,0	19,6

11. Используя компьютерную обработку результатов измерения выполните задание по вариантам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Что означает различие между результатами измерений?
- Каковы основные правила построения графиков по экспериментальным данным?
- Сформулируйте правила действий с приближенными числами. Приведите примеры.
- Как определить погрешности произведения, частного, суммы и разности?

Задание по вариантам.

Вариант 1

Построить график и вычислить температурный коэффициент сопротивления металла по экспериментальным данным. Сопротивление зависит от температуры по линейному закону:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ) = R_0 + R_0 \alpha t^\circ$$

Свободный член определяет сопротивление R_0 при температуре 0°C , а угловой коэффициент ($R_0 \cdot \alpha$) – произведение температурного коэффициента α на сопротивление R_0 . Результаты измерений и расчетов приведены в таблице (для нахождения R_0 график нужно продолжить до пересечения с осью R в точке 0°C).

№	$t, ^\circ\text{C} (\pm 5\%)$	$R, \text{Ом} (\pm 2\%)$
1	23	1,242
2	59	1,326
3	84	1,386
4	96	1,417
5	120	1,512
6	133	1,520

Вариант 2

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось угловое ускорение ε некоторого тела. Постройте график зависимости $\varepsilon = f(M)$ и определите по нему момент инерции этого тела J .

№	$M, \text{Н}\cdot\text{м} (\pm 5\%)$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2 (\pm 5\%)$
1	1,44	0,52
2	3,12	1,06
3	4,59	1,45
4	5,90	1,92
5	7,45	2,56

Вариант 3

Измеренные значения тока I и соответствующие им значения падения напряжения U приведены в таблице. Постройте график зависимости силы тока от напряжения и убедитесь в том, что выполняется закон Ома для участка цепи ($I = U/R$). Из углового коэффициента графика определите сопротивление R (угловым коэффициентом линейной зависимости $I = f(U)$, проходящей через начало координат, будет обратное сопротивление R^{-1})

№	$I, \text{mA} (\pm 10\%)$	$U, \text{В} (\pm 3\%)$
1	13,2	11
2	16,9	19
3	25,3	29
4	44,3	36

5	46,1	47
6	62,7	57

Вариант 4

При помощи машины Атвуда исследуется ускоренное движение некоторого тела. Постройте по экспериментальным данным график зависимости $S = S(t^2)$, убедитесь, что график будет иметь вид прямой линии. По тангенсу угла наклона прямой линии вычислите ускорение, с которым движется тело (воспользуйтесь уравнением $S = S_0 + \frac{at^2}{2}$).

№	S_i , см ($\pm 3\%$)	t_i , с ($\pm 2\%$)	t_i^2 , с ²
1	20	1,24	
2	30	1,58	
3	40	1,84	
4	50	2,01	
5	60	2,26	

Вариант 5

Расплавленный свинец помещен в стальную кювету, его температура измеряется с помощью температурного датчика. Измеряют зависимость температуры жидкого металла от времени. Постройте по экспериментальным данным график зависимости температуры от времени, определите по нему скорость остывания свинца ($\Delta T / \Delta t$, °C в секунду)

№	t_i , с ($\pm 4\%$)	T_i , °C ($\pm 1\%$)
1	0	191
2	30	186
3	60	180
4	90	176
5	120	172
6	135	169

Вариант 6

Для определения ЭДС аккумулятора проводят измерения напряжения на его клеммах при различном токе через нагрузку. Экспериментальные данные представлены в таблице. Постройте график зависимости $U=f(I)$. Проведите прямую, которая наилучшим образом проходит через экспериментальные точки. Найдите пересечение прямой с осью напряжений и определите по нему ЭДС аккумулятора. По закону Ома для полной цепи напряжение на зажимах источника определяется уравнением $U = \varepsilon - Ir$, где ε - ЭДС, а r - внутреннее сопротивление источника.

№	U , В ($\pm 10\%$)	I , А ($\pm 5\%$)
1	19,1	1,2
2	15,5	1,5
3	12,9	2,0
4	11,5	2,4
5	10,1	3,1
6	4,3	4,0

Вариант 7

Для определения величины постоянной Планка h проводят исследование внешнего фотоэффекта. Измеряют зависимость максимальной энергии фотоэлектронов eU (в электрон-вольтах) от частоты падающего света ν (в Герцах). Согласно закону Эйнштейна для фотоэффекта эта зависимость имеет вид: $eU = h\nu - A_{\text{вых}}$, где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода фотоэлектронов (энергия, которую необходимо затратить, чтобы вырвать электрон из металла). Постройте график зависимости $eU = f(\nu)$ и определите по тангенсу угла наклона значение постоянной Планка (табличное значение $h = 4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с).

№	eU , эВ ($\pm 5\%$)	ν , 10^{15} Гц ($\pm 5\%$)
1	0,8	0,6
2	1,1	0,7
3	1,4	0,8
4	2,0	0,9
5	2,2	1,1

Вариант 8

С помощью машины Атвуда, исследовалось основное уравнение динамики поступательного движения $a = F/m$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях силы измерялось ускорение некоторого тела. Постройте график зависимости $a = f(F)$ и определите по нему массу тела.

№	F , Н ($\pm 5\%$)	a , м/с ² ($\pm 10\%$)
1	0,2	1,9
2	0,3	3,2
3	0,4	4,4
4	0,5	5,1
5	0,6	6,7
6	0,7	7,3

Вариант 9

С помощью математического маятника, исследовалась зависимость периода колебаний от длины ($T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$). Постройте график зависимости квадрата периода колебаний математического маятника от его длины и определите ускорение свободного падения тела.

№	l , м ($\pm 2\%$)	T , с ($\pm 2\%$)	T^2 , с ²
1	1,5	2,45	
2	1,6	2,53	
3	1,7	2,62	
4	1,8	2,67	
5	1,9	2,78	

6	2,0	2,82	
---	-----	------	--

Вариант 10

Зависимость дальности полета тела, брошенного под углом к горизонту дается выражением $l = \frac{v_0^2}{g} \sin^2 2\alpha$. Изменяя начальную скорость бросания, студент получил

значения максимальной дальности полета (для угла 45°), приведенные в таблице. Постройте график зависимости максимальной дальности полета шарика от квадрата начальной скорости, определите ускорение свободного падения тела.

№	v_0 , м/с	l , м ($\pm 10\%$)	v_0^2 , м/с ($\pm 5\%$)
1	2,0	0,43	
2	2,5	0,61	
3	3,0	0,93	
4	3,5	1,22	
5	4,0	1,65	
6	4,5	2,11	

№	M , Н·м ($\pm 3\%$)	ε , рад/с ² ($\pm 4\%$)
1	1.58	0.62
2	3.43	1.27
3	5.05	1.74
4	6.49	2.30
5	8.20	3.07

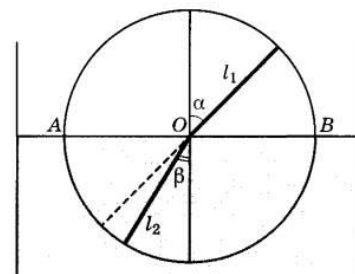
Вариант 11

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось угловое ускорение ε некоторого тела. Постройте график зависимости $\varepsilon = f(M)$ и определите по нему момент инерции этого тела J .

Вариант 12

Греческий астроном Клавдий Птолемей (около 130 г. н. э.) – автор замечательной книги, которая в течение почти 15 столетий служила основным учебником по астрономии. Однако кроме астрономического учебника Птолемей написал ещё книгу «Оптика», в которой описал, в частности, явление преломления света. С явлением преломления света Птолемей столкнулся, наблюдая звёзды. Он заметил, что луч света, переходя из одной среды в другую, «ломается». Поэтому звездный луч, проходя через земную атмосферу, доходит до поверхности Земли не по прямой, а по ломаной линии, то есть происходит рефракция (преломление света). Искривление хода луча происходит из-за того, что плотность воздуха меняется с высотой.

Чтобы изучить закон преломления, Птолемей провел следующий эксперимент. Он взял круг и укрепил на нем две подвижные линейки l_1 и l_2 (см. рисунок). Линейки могли вращаться около центра круга на общей оси О.



Птолемей погружал этот круг в воду до диаметра АВ и, поворачивая нижнюю линейку, добивался того, чтобы линейки лежали для глаза на одной прямой (если смотреть вдоль верхней линейки). После этого он вынимал круг из воды и сравнивал углы падения α и преломления β . Он измерял углы с точностью до $0,5^\circ$. Числа, полученные Птолемеем, представлены в таблице. На основании данных Птолемея

проверьте справедливость закона преломления $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ ($n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный

показатель преломления среды) и определите относительный показатель преломления воды, используемой в его эксперименте.

№	$\alpha, (\pm 0,5^\circ)$	$\beta, (\pm 0,5^\circ)$	$\sin \alpha (\pm 0,005)$	$\sin \beta (\pm 0,005)$
1	10	8,0		
2	20	15,5		
3	30	22,5		
4	40	28,0		
5	50	35,0		
6	60	40,5		
7	70	45,0		
8	80	50,0		

Вариант 13

Студент измерил силу тока I и соответствующие им значения падения напряжения U , значения которых приведены в таблице. Постройте вольт-амперную характеристику (ВАХ) и убедитесь в том, что выполняется закон Ома для участка цепи ($I = U/R$). Из углового коэффициента графика определите сопротивление R (угловым коэффициентом линейной зависимости $I=f(U)$, проходящей через начало координат, будет обратное сопротивление R^{-1})

№	$I, \text{mA} (3\%)$	$U, \text{V} (5\%)$
1	15,2	24
2	14,7	36
3	23,2	60
4	41,3	69
5	47,4	91
6	60,7	118

Вариант 14

С помощью воздушной дорожки исследуется ускоренное движение некоторого тела. Постройте по экспериментальным данным график зависимости $S = S(t^2)$, убедитесь, что график будет иметь вид прямой линии. По тангенсу угла наклона прямой линии вычислите ускорение, с которым движется тело (воспользуйтесь уравнением $S = S_0 + \frac{at^2}{2}$).

№	S_i , м ($\pm 0,01$)	t_i , с ($\pm 2\%$)	t_i^2 , с ²
1	0,20	1,26	
2	0,30	1,62	
3	0,40	1,82	
4	0,50	2,03	
5	0,60	2,24	
6	0,70	2,41	

Вариант 15

С помощью физического маятника исследовалась зависимость периода колебаний от расстояния между центром тяжести и осью качания. Период колебаний физического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$, где J – момент инерции маятника относительно оси качания, l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника. Например, для физического маятника, имеющего вид однородного стержня, колеблющегося вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной стержню, формула периода приобретает вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l^2 + d^2 / 12}{l \cdot g}},$$

где d – длина стержня, l – расстояние от оси качаний до центра тяжести стержня. Постройте график зависимости $T^2 l = f(l^2)$ и определите ускорение свободного падения тела и длину стержня.

№	l , м ($\pm 1\%$)	T , с ($\pm 2\%$)	l^2 , м ²	$T^2 l$, с ² м
1	0,50	1,69		
2	0,45	1,63		
3	0,40	1,61		
4	0,35	1,62		
5	0,30	1,62		
6	0,25	1,63		
7	0,20	1,67		
8	0,15	1,87		

Вариант 16

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось

угловое ускорение ε некоторого тела. Постройте график зависимости $\varepsilon=f(M)$ и определите по нему момент инерции этого тела J .

№	$M, \text{Н} \cdot \text{м} (\pm 4\%)$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2 (\pm 3\%)$
1	1,37	0,35
2	3,02	0,98
3	4,62	1,35
4	5,97	1,72
5	7,49	2,34

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 (расчетная).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В MS EXCEL

Введение.

Перед выполнением данной лабораторной работы необходимо создать папку, в которой будут храниться все полученные результаты. Она создается в папке *Мои документы/Практическая физика физ-б-о*. В этой папке создается папка с фамилией исполнителя. Файлам данных присваивается номер модели (например, *Модель 1.xlsx*).

Задача заключается в заполнении таблиц исходными данными, расчетными формулами и построении требуемых графиков.

В подготовку к лабораторной работе входит ознакомление с теорией рассматриваемого в ней вопроса (в начале каждой работы приводятся лишь краткие сведения) и аналитическими формулами, лежащими в основе рабочих (так называемых *расчетных*) формул, которые в дальнейшем заносятся в соответствующие ячейки таблицы (их необходимо продумывать и составлять заранее, в процессе подготовки к занятию); а также выделение исходных (начальных) параметров процесса и разделение всех данных на два типа: переменные величины и постоянные (это необходимо для определения вида ссылок на эти величины в расчетных формулах).

Для моделей работы имеются готовые *шаблоны*, содержащие заготовки таблиц, а также основные формулы (выполненные в редакторе формул *MS Equation*), лежащие в основе вычислений (т.е. расчетных формул), и задача заключается в заполнении таблиц исходными данными, расчетными формулами и построении требуемых графиков.

Прежде, чем приступить к работе с таблицей, следует подробно разобрать ее строение, расположение исходных данных на листе и основные формулы, используемые в расчетах, а также определить количество точек, необходимых для построения графиков, которое зависит от сложности задачи и вида самого графика. Так, например, для моделирования линейной зависимости по *аналитическим (точным)* формулам требуется минимальное количество точек ($20 \div 30$); для более сложных процессов, графики которых имеют точки перегиба или участки минимумов и максимумов, и особенно в тех случаях, когда построение ведется на основе *приближенных* формул, получаемых, например, при численном решении дифференциальных уравнений, их число может колебаться в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч.

Помимо указанных формул в процессе вычислений используются и некоторые дополнительные для вычисления промежуточных величин (таких как интервалы времени, приращение координаты, перевод градусной меры в радианы и наоборот, вычисление тригонометрических функций и т.д.). Занесение формулы в ячейку начинается с ее *объявления*: нажатия клавиши "=" на клавиатуре. В качестве аргументов формул могут быть использованы ссылки (относительные и абсолютные) на ячейки, содержащие нужные числовые данные, а также числа (например, показатель степени, коэффициенты при аргументах и т.д.).

Знаки математических операций (+ (сложение); - (вычитание); * (умножение); / (деление); ^ (возведение в степень)) набираются с клавиатуры. Кроме того, в ряде моделей применяются встроенные функции *MS Excel*, работа с которыми проводится с помощью *Мастера функций*, и будет частично объясняться по ходу выполнения. Ввод ссылок в формулу можно проводить "вручную" с клавиатуры (в английской раскладке) или с помощью мыши (для этого достаточно щелкнуть мышкой в соответствующей ячейке, и ее адрес появится в создаваемой формуле, или протаскиванием выделить необходимый диапазон ячеек). При создании абсолютной ссылки используется символ "\$": его можно набирать с клавиатуры (в английской раскладке) или с помощью функциональной клавиши **F4**, которую следует нажимать до тех пор, пока не будет достигнута нужная расстановка символов доллара в адресе ячейки, фиксирующая тот или иной параметр (существует три возможных варианта: так, например, для ячейки C4 это - \$C\$4 (запись означает, что при различных действиях (таких как копирование, перемещение) с формулой, содержащей абсолютную ссылку на ячейку фиксируются (не изменяются) оба параметра – название столбца и номер строки), \$C4 (фиксируется только название столбца, номер строки при копировании может изменяться), C\$4 (номер строки фиксирован, название столбца может изменяться)).

Содержимое *текущей* (выделенной) ячейки отображается в поле ввода строки формул.

Поскольку формулы, описывающие физические процессы, устанавливают связь между двумя величинами (переменными), то для графического представления результатов моделирования используется только один тип диаграммы – *Точечная*, вид же диаграммы зависит от условия задачи. Для построения диаграммы необходимо получить, как минимум, один набор (*ряд*) данных – совокупность значений двух взаимосвязанных величин. При этом изменение одной из них (как правило, *аргумента*) задается самим исполнителем через выбранный или рассчитанный им интервал – *шаг*

изменения данной величины; другая же (*значение функции*) получается расчетным путем для соответствующих значений аргумента.

В конце каждой модели приводится список обязательных заданий, выполняемых после заполнения таблиц и построения графиков. Некоторые из заданий посвящены определению границ применимости данной модели (в первую очередь это касается тех моделей, формулы для которых получены численным методом); другие прослеживают влияние начальных параметров или других величин, входящих в формулы, на вид диаграммы. Разработка таких вопросов проводится на этапе подготовки к лабораторной работе и окончательно оформляется на отдельных листах, добавляемых в книгу.

Модель № 1.

Моделирование равномерного движения тела.

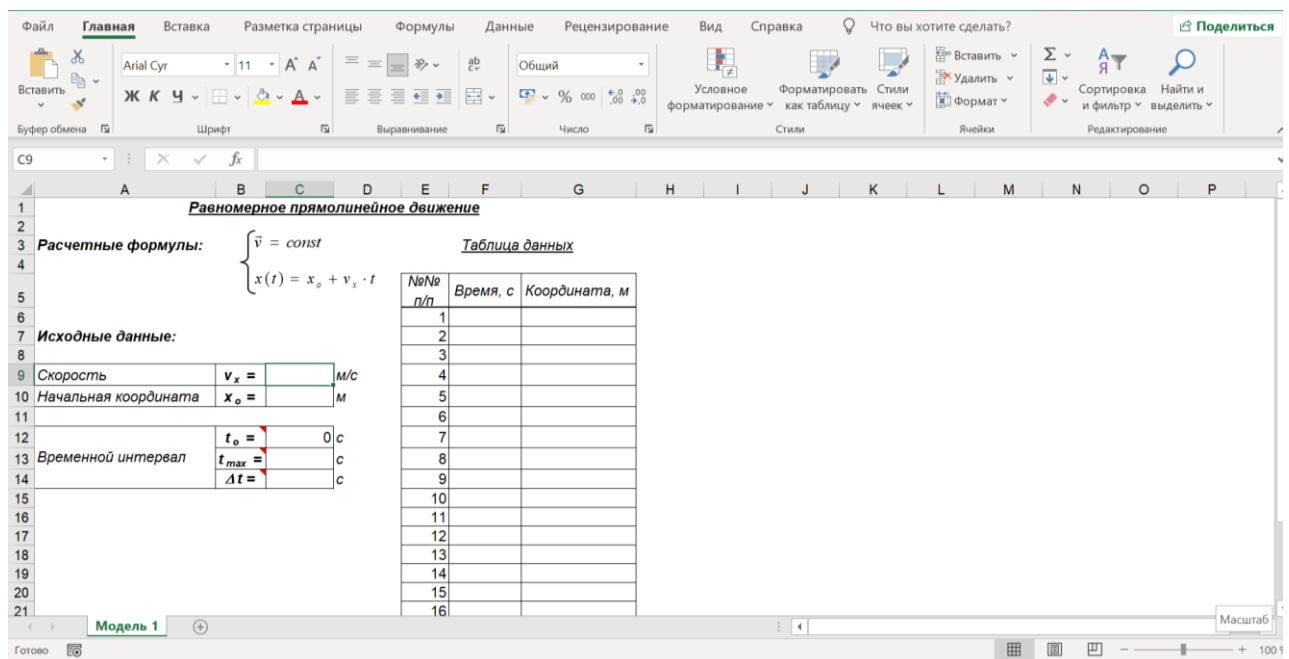
Рассмотрим моделирование такого физического процесса, как движение тела с некоторой постоянной скоростью $\vec{v} = const$. Поскольку ни одна из характеристик скорости (направление и величина) не изменяется, движение будет происходить вдоль прямой линии, т.е. является прямолинейным. Совместим с этой прямой ось Ох. Каждую секунду координата x тела будет получать одно и то же приращение, поэтому в любой момент времени может быть найдена как

$$x = v_x \cdot t,$$

где v_x - проекция вектора скорости на ось Ох. Если в начальный момент времени ($t_0 = 0$) положение тела не совпадало с началом отсчета, то уравнение будет иметь вид: $x(t) = x_0 + v_x \cdot t$. Проекция вектора скорости – величина алгебраическая, т.е. она может быть и положительной, и отрицательной в зависимости от того, какой угол α образует вектор скорости с направлением оси Ох. Если $\alpha = 0^\circ$, $v_x > 0$ (т.е. в этом случае $v_x = v$, где $v = |\vec{v}|$ = - модуль вектора скорости);

если $\alpha = 180^\circ$, $v_x < 0$ (и, следовательно, $v_x = -v$).

Графическое моделирование процесса равномерного прямолинейного движения будет заключаться в построении графика зависимости $x = f(t)$ при различных значениях и направлениях скорости.



Загрузка файла таблицы.

1. Запустить Excel.

2. Открыть шаблон документа *model_1.xlt*.

Судя по уравнению движения тела, исходными данными для данной модели будут:

- 1) начальное положение (координата) тела,
- 2) проекция скорости на выбранную ось,
- 3) временной интервал (задаваемый начальным и конечным моментом времени), в течение которого рассматривается движение (время протекания процесса).

Переменные величины: время и координата тела; постоянные – проекция скорости на ось Ох (это означает, что ее числовое значение в процессе движения не изменяется). Для

построения графика $x = f(t)$ необходимо получить определенное число точек $(t; x)$. Следовательно, необходимо задать **шаг изменения переменной** $t - \Delta t$, рассчитываемый через временной интервал и число точек или подинтервалов, на которые разбивается весь

$$\text{интервал: } \Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n}$$

Если в данной формуле n означает количество подинтервалов, на которое разбивается выбранный промежуток времени $t_{\min} \div t_{\max}$, то таблица будет содержать $n + 1$ точек. Если же n – это количество точек, то число подинтервалов будет на единицу меньше, а именно $n - 1$.

Заполнение таблицы.

1. Занести исходные числовые данные в ячейки C9, C10 и C13. Начальный момент времени (ячейка C12) принимается равным нулю! Для примера выбрать следующие значения:

$$v_x = 5 \text{ м/с}; x_0 = 0 \text{ м}; t_0 = t_{\min} = 0 \text{ с}; t_{\max} = 10 \text{ с}.$$

2. В ячейке C14 рассчитать шаг изменения времени для 20 подинтервалов.

3. Заполнить таблицу данных.

1) В ячейку F6 занести начальный момент времени из ячейки C12 способом копирования с установлением связи между этими ячейками.

2) Данные, расположенные в столбце F в нижележащих ячейках, представляют собой моменты времени, отличающиеся друг от друга на величину шага Δt ($t_1 = t_0 + \Delta t$; $t_2 = t_1 + \Delta t$; ...). Поэтому в ячейку F7 вводится формула, рассчитывающая следующий (после начального) момент времени: $=F6+\$C\$14$, после чего ее следует скопировать в остальные ячейки колонки таблицы с заголовком "Время, с".

В этой формуле необходимо использовать абсолютную ссылку на ячейку C14, содержащую шаг изменения времени, чтобы при копировании она не изменялась.

3) Ячейку G6 связать с ячейкой C10, содержащей начальную координату тела. В этом случае при изменении данных в ячейке C10 автоматически изменится и содержимое связанной с ней ячейки G6.

4) Составить и занести в ячейку G7 формулу, позволяющую рассчитать координату в соответствующий ей момент времени.

Примечание: При составлении формул не забывайте использовать абсолютные ссылки для постоянных величин.

5) Скопировать формулу из ячейки G7 в диапазон ячеек G8:G26.

4. Изменить имя листа, содержащего таблицу (в шаблоне он назван Модель 1) на новое, назвав его, например, Равномерное движение.

Построение графика зависимости $x(t)$.

Данные для построения графика зависимости координаты равномерно движущегося тела от времени находятся в диапазоне ячеек F6:G26 созданной таблицы. Значения в столбце F (диапазон F6:F26) будут откладываться по горизонтальной оси (Ось X (категорий)), значения в столбце G (диапазон G6:G26) – по вертикальной оси (Ось Y (значений)).

1. Выделить диапазон данных.

2. Выбрать команду Вставка-Диаграмма...

3. С помощью мастера диаграмм провести построение и оформление графика.

Основные требования:

- тип диаграммы - Точечная;
- имя ряда данных Зависимость x от t (вводится с клавиатуры в соответствующее поле);
- название диаграммы и наименование осей координат с указанием единиц измерения величин, откладываемых по этим осям, задать в виде:

"Название диаграммы" - График равномерного движения;

"Ось X (категорий)" – Время t , с;

"Ось Y (значений)" – Координата x , м;

- выключить основные линии сетки по каждой из осей;
- отключить легенду, т.к. в данной задаче используется только один набор (ряд) точек;
- формат области построения сделать прозрачным;
- провести линию тренда и указать на графике уравнение кривой и величину достоверности аппроксимации.

Сохранить данные в файле (Модель_1.xlsx) в папке со своей фамилией.

Задание:

1. Отформатировать числовые данные в таблице, назначив диапазону F6:G26 числовой формат с двумя десятичными знаками после запятой.
2. Проследить, влияет ли шаг программы (величина Δt) на вид графика.
3. Изменяя начальные данные в ячейках C9, C10, C13 и C14, проследить за изменением вида графика.
4. Задать отрицательное значение проекции скорости. Каков смысл знака "-" в значении проекции скорости? в значении координаты?
5. Изменить вид графика на *Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями без маркеров* через контекстное меню непосредственно по данному графику (а не по области построения!) и провести добавление контрольной точки (т.е. точки с заданными параметрами $x_{\text{контр}}$ и $t_{\text{контр}}$). Для этого в одной из ячеек столбца **В** (например, в B16) указать момент времени (в интервале от t_0 до t_{max}), а в следующей ячейке рассчитать координату в этот момент по основной формуле. В столбце **А** добавить комментарий к этим ячейкам: *Контрольная точка*. Считая полученную пару значений новым рядом данных, добавить ее на имеющуюся диаграмму, указав название ряда (*Контрольная точка*), и вывести легенду, удалив в ней элемент *Зависимость x от t* .

Примечание: Отчет по работе (задания №№ 1-5) оформить на отдельном листе.

Модель № 2.

Моделирование равноускоренного движения тела.

Рассмотрим прямолинейное равноускоренное движение ($\vec{a}=\text{const}$). Поскольку движение происходит вдоль прямой, то для его описания достаточно одной координаты. Пусть тело движется вдоль оси Oy. Согласно определению ускорения

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

где в числителе стоит изменение скорости, а в знаменателе - промежуток времени, за который это изменение произошло. Отсюда $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$. Поскольку движение равноускоренное, каждую секунду скорость получает одно и то же приращение. Перепишем это выражение в проекции на выбранное направление оси Oy:

$$v_y = v_{0y} + a_y t$$

Проекции скорости и ускорения могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от взаимного направления векторов $\vec{v}$, $\vec{v}_0$, $\vec{a}$, и оси Oy. При этом если $a_y > 0$ скорость получает положительное приращение, т.е. с течением времени она увеличивается (ускоренное движение); если $a_y < 0$, скорость с течением времени уменьшается (замедленное движение). Координата тела при этом будет изменяться по закону:

$$y(t) = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}$$

где y_0 - начальное положение тела, т.е. его координата в момент времени $t_0=0$

Графическое моделирование будет заключаться в построении графиков зависимостей $v_y = f(t)$ и $y = f(t)$ при различных значениях a_y , v_{0y} .

Загрузка файла таблицы.

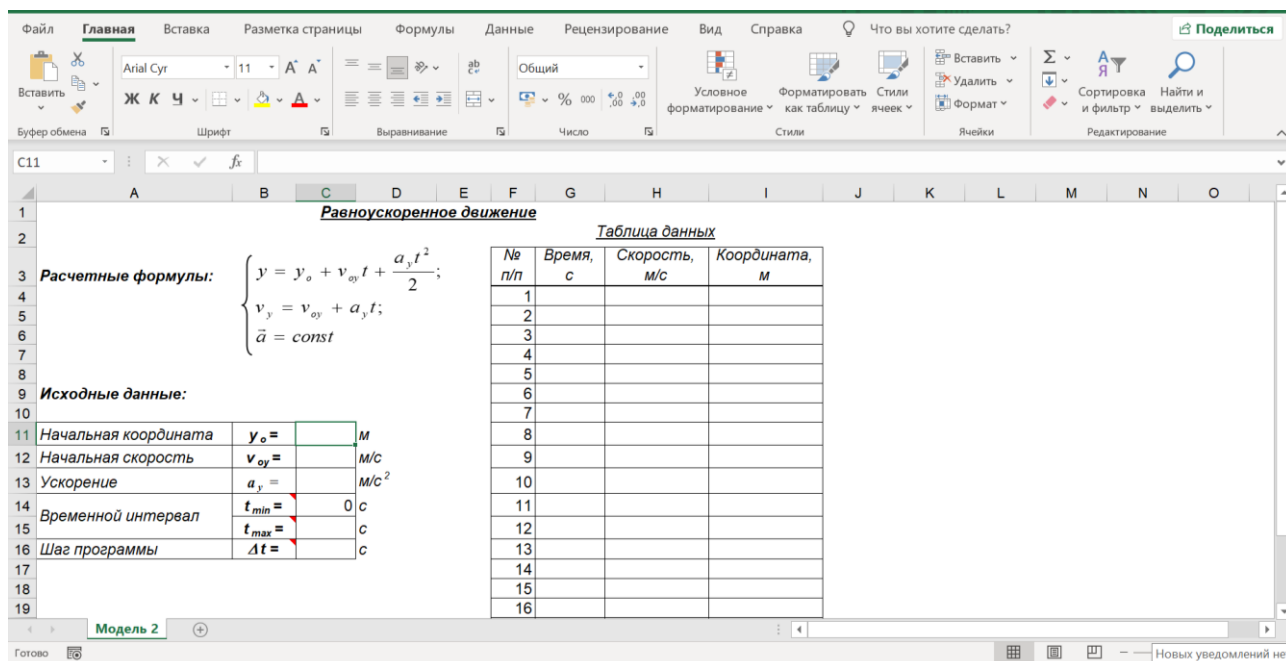
1. Запустить Excel.

2. Открыть шаблон *model_2.xlt*.

Анализ формул показывает, что исходными данными в нашей модели будут:

- 1) координата тела y_0 в момент времени, принимаемый за нулевой;
- 2) проекция начальной скорости на выбранную ось v_{0y} ;
- 3) проекция ускорения на выбранную ось a_y ;
- 4) временной интервал $t_{\min} \div t_{\max}$, в течение которого рассматривается движение.

Переменные величины – время, скорость и координата (они изменяются в процессе движения); постоянные – проекции ускорения и начальной скорости на выбранную ось (в процессе движения остаются неизменными).



Заполнение таблицы.

1. Заполнить таблицу исходных данных. Для примера взять следующие значения:
 $y_0 = 0$ м; $v_{0y} = 5$ м/с; $a_y = 2$ м/с²; $t_0 = t_{min} = 0$ с; $t_{max} = 10$ с.
2. В ячейке C16 рассчитать шаг Δt для $n=20$ подинтервалов, на которые разбивается выбранный промежуток времени $t_{min} \div t_{max}$. Таким образом, таблица должна содержать $n + 1 = 21$ точек.
3. Заполнить таблицу "Время-Скорость-Координата". Столбец G (колонка Время, с) содержит значения времени, в которые определяются скорость тела (столбец H, колонка Скорость, м/с) и его координата (столбец I, колонка Координата, м). При этом ячейки G4 (начальный момент времени), H4 (проекция начальной скорости) и I4 (координата в начальный момент времени) должны быть связаны с соответствующими ячейками таблицы исходных данных (C14, C12 и C11). В ячейки G5÷I5 таблицы необходимо занести расчетные формулы и скопировать их в нижележащий диапазон ячеек G6:I24.

Примечание: При составлении формул не забывайте использовать абсолютные ссылки для постоянных величин.

4. Выделить диапазон ячеек G4:I24 и задать для него наиболее подходящий формат чисел (числовой или экспоненциальный).
5. Изменить имя листа, содержащего таблицу (в шаблоне он назван Модель 2), например, на Равноускоренное движение.

Построение графиков зависимости $v(t)$ и $x(t)$.

1. Построить графики зависимости скорости от времени (диапазон данных G4:H24) и координаты от времени (диапазон (G4:G24;I4:I24)) на отдельных диаграммах, следуя указаниям Мастера диаграмм. Так как данные для построения графика изменения координаты располагаются в двух несмежных диапазонах ячеек, то при их выделении необходимо удерживать клавишу Ctrl.

Основные требования:

- тип диаграмм Точечная;
- диаграммы должны иметь заголовок (название графика) и подписи каждой из осей с указанием условного обозначения и единиц измерения величин, откладываемых по этим осям;
- выключить основные линии сетки по каждой из осей;

- отключить легенду, т.к. в данной задаче используется только один набор (ряд) точек;
- формат области построения сделать прозрачным;
- провести линию тренда и указать на графике уравнение кривой и величину достоверности аппроксимации.

Задание:

1. Проверить, влияет ли шаг изменения времени (т.е. количество временных подинтервалов) на вид графиков.
2. Изменяя начальные данные в ячейках C11, C12, C13 и C15, проследить за изменением вида графиков. Каков физический смысл отрицательных значений величин u_0 , v_{0y} , a_y ?
3. Сравнить движение тел с разным ускорением. Для этого необходимо:
 - 1) провести вставку ячеек *над* диапазоном A13:D13 для задания второго значения ускорения;
 - 2) ввести в ячейку C13 еще одно значение ускорения движения тела, отличающееся от имеющегося, и оформить соответствующим образом диапазон ячеек B13:D14;
 - 3) добавить две колонки таблицы (столбцы J и K листа) и провести в них расчет скорости и координаты для второго значения ускорения;
 - 4) для каждой из диаграмм провести добавление нового ряда данных и задать имя *каждому из двух рядов данной диаграммы*. В качестве имени ряда удобно выбрать соответствующее ему значение ускорения, введя в поле "*Имя ряда*" ссылку на диапазон B14:D14 (первый ряд) и B13:D13 (второй ряд данных);
 - 5) вывести легенду;
 - 6) отформатировать данные в таблице (диапазоны H3:H24, I3:I24, J3:J24 и K3:K24), назначив цвет шрифта в этих диапазонах в соответствии с цветом графиков.
4. Провести расчет контрольной точки (т.е. значений $v_{\text{контр}}$ и $u_{\text{контр}}$) для заданного момента времени $t_{\text{контр}}$ и каждого значения ускорения. Добавить эти точки на диаграммы в виде отдельных рядов данных, изменив предварительно вид графиков каждой из диаграмм на Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями без маркеров.
5. На отдельном листе решить графически задачу: из пункта А выехал грузовик с постоянной скоростью 72 км/ч. Одновременно с ним из пункта В, отстоящего от А на расстоянии 1,5 км, начал двигаться мотоциклист. Считая движение мотоциклиста равноускоренным с $a=2 \text{ м/с}^2$, определить с помощью соответствующих графиков время, через которое мотоциклист догонит грузовик, и путь, пройденный каждым из них до встречи.

Совет: Для более точного определения величин по графику рекомендуется включить, помимо основных, промежуточные линии сетки.

Сохранить данные в файле Модель_2.xlsx.

Модель № 3.

Моделирование колебательного движения на примере математического маятника.

Если тело совершает свободные незатухающие колебания, то его координата с течением времени изменяется по закону косинуса или синуса:

$$x = x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

где $x_{\max}$ - амплитуда, $(\omega_0 t + \varphi)$ - фаза колебаний, φ - начальная фаза, ω_0 - собственная циклическая (круговая) частота колебаний. Скорость (первая производная координаты по времени) и ускорение (вторая производная координаты по времени) при этом также будут изменяться по гармоническому закону:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = x' = x_{\max} \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) = x_{\max} \omega_0 \cdot \sin\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = x'' = -x_{\max} \omega_0^2 \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi) = x_{\max} \omega_0^2 \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi + \pi).$$

Для преобразования выражений мы воспользовались формулами приведения. Отсюда видно, что скорость опережает смещение по фазе на $\pi/2$, а ускорение - на π , т.е. находится в противофазе со смещением.

Одной из самых простых и распространенных моделей колебательных систем является математический маятник: материальная точка массы m , подвешенная на нерастяжимой нити длиной L и совершающая колебания в вертикальной плоскости. Круговая частота колебаний в этом случае принимается равной

$$\omega_0 = \sqrt{g/L}$$

период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{L/g}$$

Примечательно, что в случае свободных колебаний круговая частота и период колебаний определяются свойствами самой системы и не зависят от начальных условий (начального смещения или, что то же самое, начальной фазы).

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы построить графики зависимости $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ и проследить за их изменением при изменении параметров системы.

Загрузка файла таблицы.

1. Запустить Excel.
 2. Открыть шаблон Model_3.xltx.
- Очевидно, исходными данными являются:
- 1) амплитуда (максимальное смещение) $x_{\max}$;
 - 2) начальная фаза φ ;
 - 3) длина нити L ;
 - 4) временной интервал.

Постоянные величины: амплитуда, начальная фаза, длина нити, период (частота) колебаний. Переменные – смещение тела в каждый момент времени (координата x), скорость и время.

4. Заполнить Таблицу данных (Время-Координата-Скорость-Ускорение).

1) Столбец G должен содержать значения времени, отличающиеся на величину Δt , при этом ячейку G8 необходимо связать с C14, чтобы отслеживать изменения значения начального момента времени. В следующую ячейку столбца вводится формула, которая затем копируется в диапазон G10:G108.

2) В столбцах H, I, J вычисляются значения координаты, скорости и ускорения в соответствующие моменты времени из столбца G.

Примечание: При составлении формул не забывайте использовать абсолютные ссылки для постоянных величин.

5. Изменить имя листа, содержащего таблицу (Модель 3), например, на Колебания маятника.

Построение графиков.

По результатам расчетов необходимо построить три графика: $x(t)$, $v(t)$ и $a(t)$. Поскольку во всех случаях по оси Oх откладывается одна и та же величина (время), все три зависимости можно представить в одной системе координат. Такой способ построения применяется в тех случаях, когда необходимо провести сравнение нескольких различных (неоднородных) величин или исследовать поведение некоторой величины в зависимости от начальных условий или условий проведения эксперимента. Однако он имеет и недостатки: он применим только тогда, когда сравниваемые величины имеют один и тот же порядок.

Диапазон данных для построения диаграммы – блок ячеек G8:J108. Программа Excel автоматически будет рассматривать этот диапазон как три ряда данных, а именно: 1-ый ряд – (G8:H108) (зависимость координаты от времени), 2-ой ряд – (G8:G108; I8:I108) (зависимость скорости от времени) и 3-ий ряд – (G8:G108; J8:J108) (зависимость ускорения от времени), причем первая колонка (диапазон G8:G108) будет общей для всех остальных.

Дальнейшее построение ведется по стандартному плану. Основные требования:

- вид диаграммы – Точечная или Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями, или Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями без маркеров;
- имя рядов данных: Смещение, Скорость и Ускорение (вводится с клавиатуры в соответствующее поле);
- название диаграммы и наименование осей координат с указанием единиц измерения величин, откладываемых по этим осям, задать в виде:
"Название диаграммы" - Графики колебательного процесса;
"Ось X (категорий)" – Время t, с;
"Ось Y (значений)" – Координата (м); Скорость (м/с); Ускорение (м/с²);
- включить основные линии сетки по одной или обоим осям;
- включить опцию вывода легенды и указать ее размещение на диаграмме;
- расположить диаграмму на отдельном листе.

Задание:

1. Изменяя начальные данные (начальное смещение и фазу, длину маятника), проследить за изменением вида графиков.
2. Разобрать вопрос о соотношении величин $x_{\max}$ и L.
3. Определить сдвиг фаз между колебаниями каждой пары величин. Это удобно выполнить для случая, когда начальная фаза колебаний равна нулю.
4. Задать для диапазона G8:J108 соответствующий формат числовых данных (числовой или экспоненциальный с определенным количеством десятичных знаков после запятой).
5. Изменяя момент времени $t_{\max}$ (и, тем самым, - интервал Δt), определить границы применимости данной модели.

6. Добавить в таблицу исходных данных контрольные точки для заданного момента времени и вывести их на всех графиках.
7. Найти среди встроенных функций MS Excel такие тригонометрические функции, как тангенс, арксинус, арккосинус, арктангенс. Выписать их синтаксис и назначение. Почему среди перечисленных функций нет котангенса? Помимо подсказки, которая выводится в каждом диалоговом окне Мастера, можно дополнительно получить развернутую справку по любой из выбранных функций нажатием функциональной клавиши F1.
8. Кроме функции РАДИАНЫ(), позволяющей преобразовать величину угла из градусной меры в радианы, существует функция ГРАДУСЫ(), осуществляющая обратную операцию. Найти ее в Мастере функций и разобрать синтаксис.
9. Провести построение каждого графика в отдельности.
10. Изменить формулы, содержащие число π : в них вместо набора значения числа π необходимо использовать встроенную функцию ПИ() (категория – Математические, используется без аргумента) и округлить результат до нужного числа значащих цифр с помощью встроенной же функции ОКРУГЛ() (см. Мастер функций, категория Математические). Синтаксис функции: ОКРУГЛ(число; количество_цифр). Работа с Мастером функций проводится по описанному выше плану. В поле "Число" в этом случае вводится функция ПИ() (можно непосредственно с клавиатуры в русской раскладке или с использованием правил работы с вложенными функциями), а в поле "Количество_цифр" – количество десятичных разрядов, до которого нужно округлить число. При этом:
 - если количество_цифр больше 0, то число округляется до указанного количества десятичных разрядов справа от десятичной запятой;
 - если количество_цифр равно 0, то число округляется до ближайшего целого;
 - если количество_цифр меньше 0, то число округляется слева от десятичной запятой.
11. Разобрать синтаксис всех функций округления чисел: ОКРВВЕРХ; ОКРВНИЗ; ОКРУГЛВВЕРХ; ОКРУГЛВНИЗ; а также ЦЕЛОЕ и ОТБР.

Сохранить данные в файле Модель 3.xlsx.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 (расчетная).

ПОГРЕШНОСТИ В КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ.

1. Студент получил следующие результаты измерения:
 $a=5\pm1$ см; $b=18\pm2$ см; $c=12\pm1$ см; $t=3,0\pm0,5$ с; $m=18\pm1$ г.
Вычислите следующие величины и их относительные погрешности в процентах:
 $a+b+c$, $a+b-c$, $c\cdot t$, $4\cdot a$, $b/2$, mb/t (цифры 4 и 2 не содержат погрешности).
2. Вычислите следующие выражения, считая ошибки независимыми и случайными:
 $(5\pm1)+(8\pm2)-(10\pm4)$;
 $(5\pm1)\cdot(8\pm2)$;
 $(10\pm1)/(20\pm2)$;
 $2\cdot\pi(10\pm1)$.
3. Если для t найдено, что $t=8,0\pm0,5$ с, то каковы значения погрешности для t^2 , $1/t$ и $1/t^2$.
4. Студент измеряет четыре длины: $a=50\pm5$, $b=30\pm3$, $c=40\pm1$, $d=7,8\pm0,3$ (все в сантиметрах) и вычисляет три суммы $a+b$, $a+c$, $a+d$. Найдите погрешности для этих сумм в случае, когда исходные погрешности независимы и случайны и в случае, когда они не являются независимыми. Какой из погрешностей можно пренебречь в случае их независимости?
5. Тележка скатывается без трения с наклонной плоскости с углом наклона θ . В этом случае ускорение тележки определится как $a=g\cdot\sin\theta$. Какова абсолютная и относительная погрешности в измерении a , если $\theta=5,4\pm0,1$ град?
6. Вычислите значения следующих выражений:
 $(12\pm1)\cdot[(25\pm3)-(10\pm1)]$;
 $\sqrt{16\pm4}+(3,0\pm0,1)^3\cdot(20\pm0,1)$;
 $(20\pm2)\cdot e^{-(1,0\pm0,1)}$.
7. Двум студентам предложили измерить скорость α -распада некоторого радиоактивного образца. Студент А считал в течение двух минут и насчитал 32 α -частицы; студент Б считал в течение часа и насчитал 786 α -частиц. (Образец распадается медленно, так что можно считать скорость распада постоянной).
а) используйте формулу $n = n \pm \sqrt{n}$ (среднее число событий за время T) для вычисления погрешности в результате студента А и студента Б.
б) каждый студент делит число отсчетов на число минут, чтобы найти скорость распада, т.е. число распадов в минуту. Каковы их результаты и погрешности.
8. Посетитель средневекового замка решает определить глубину колодца, измеряя время падения брошенного в него камня. Он определяет, что время падения равно $t=3,0\pm0,5$ с. Какой вывод он сделает о глубине колодца?
9. Если величина измерена как $\bar{a} \pm \Delta a$ и это значение используется для вычисления $f(a) = e^a$, то каковы значения $\bar{f}$ и Δf . Произведите расчет для $a=3,0\pm0,1$. Повторите расчеты, если функция имеет вид: $f(a) = \ln(a)$.
10. Найти абсолютную и относительную погрешности функции в заданной точке, если известны абсолютные погрешности аргументов.
 $z = 3xy - \cos(x+y) - e^x$, $x=4$; $\Delta x=0,3$; $y=2$; $\Delta y=0,2$
 $z = 3\cos^2 x - 5\sin x y + 4$, $x=2$; $\Delta x=0,2$; $y=4$; $\Delta y=0,1$
 $z = \ln^2(x+4y) - \cos x$, $x=3$; $\Delta x=0,1$; $y=4$; $\Delta y=0,2$
 $z = 2e + \ln(xy-3)$, $x=10$; $\Delta x=0,1$; $y=3$; $\Delta y=0,2$
 $z = e^{xy} + \sin 3x$, $x=2$; $\Delta x=0,1$; $y=5$; $\Delta y=0,3$
11. Для измерения показателя преломления стекла измеряются угол падения i и угол преломления r . Определите погрешность в измерении n и заполните таблицу 1.

Таблица 1.

$i, \text{ гр.}(\pm 1)$	$r, \text{ гр.}(\pm 1)$	$\sin i$	$\sin r$	n	$\Delta \sin i / \sin i, \%$	$\Delta \sin r / \sin r, \%$	$\Delta n / n, \%$
10	6						
20	13						
30	19						
50	29						
70	38						

12. С помощью хорошего секундомера после некоторой практики можно измерять времена примерно от одной секунды до нескольких минут с погрешностью 0,1 с. Предположим, что мы хотим измерить период маятника T , который приблизительно равен 0,5 с. Если измерять время одного колебания, то погрешность составит около 20%, но, измеряя время нескольких последовательных колебаний, мы можем добиться лучшего.
- а) если мы измеряем время пяти последовательных колебаний и получаем $2,4 \pm 0,1$ с, то каков будет результат для T и его погрешности.
- б) каков будет ответ на пункт (а), если измерено время 20 колебаний и получено $9,4 \pm 0,1$ с.
- в) может ли быть бесконечно улучшена точность измерения T , если измерять время все большего числа периодов.
13. В условиях реального эксперимента с математическим маятником необходимо измерять период T при различных значениях длины l и поэтому получают различные значения g , которые можно сравнивать. Результаты таких измерений представлены в таблице 2. Заполните недостающие ячейки таблицы. Объясните изменение Δg с уменьшением l .

Таблица 2.

$l, \text{ м}$ ($\pm 0,001$)	$T, \text{ с} (\pm 0,001)$	$g, \text{ м/с}^2$	$\Delta l / l, \%$	$\Delta T / T, \%$	$\Delta g / g, \%$	Результат $\bar{g} \pm \Delta g$
0,938	1,944	9,80	0,1	0,05	0,14	$9,800 \pm 0,014$
0,703	1,681					
0,457	1,358					
0,212	0,922					

14. Выполните задание по вариантам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются прямые и косвенные измерения? Приведите примеры.
2. Что такое случайные и систематические погрешности? Примеры.
3. Как рассчитать косвенные погрешности в случае зависимых и независимых величин?
4. Как производится расчет погрешностей косвенных измерений в случае сложной зависимости?

Задание по вариантам
Вычислите значение выражений:

Вариант 1

$$(12 \pm 1) \cdot [(55 \pm 2) - (10 \pm 2)] \\ \sqrt{36 \pm 4} + (5,0 \pm 0,1)^4 \cdot (15 \pm 1) \\ \sin(30^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 2

$$\sqrt{16 \pm 4} - (3,0 \pm 0,1)^2 \cdot (10 \pm 1) \\ (20 \pm 3) \cdot e^{3,0 \pm 0,1} \\ \ln(10 \pm 1)$$

Вариант 3

$$(20 \pm 5) \cdot e^{-(2,0 \pm 0,1)} \\ \sqrt{49 \pm 4} + (7,0 \pm 0,1)^2 \cdot (25 \pm 2) \\ \cos(30^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 4

$$(100 \pm 2) / [(45 \pm 3) - (10 \pm 1)] \\ (7 \pm 1) \cdot e^{10,0 \pm 0,5} \\ \operatorname{tg}(50^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 5

$$\sqrt{81 \pm 9} + (5,0 \pm 0,1)^3 \cdot (10 \pm 1) \\ (15 \pm 1) \cdot e^{-(3,0 \pm 0,1)} \\ \cos(60^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 6

$$(10 \pm 1) \cdot e^{2,0 \pm 0,1} \\ \sqrt{64 \pm 4} + (2,5 \pm 0,1)^2 \cdot (10 \pm 1) \\ \sin(45^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 7

$$(120 \pm 2) / [(30 \pm 2) + (5 \pm 1)] \\ (5 \pm 1) \cdot e^{-(5,0 \pm 0,1)} \\ \ln(30 \pm 1)$$

Вариант 8

$$(40 \pm 2) \cdot [(100 \pm 10) + (15 \pm 1)] \\ (10 \pm 1) \cdot e^{4,0 \pm 0,1} \\ \operatorname{ctg}(60^\circ \pm 2^\circ)$$

Вариант 9

$$\sqrt{36 \pm 9} + (5,0 \pm 0,1)^2 \cdot (10 \pm 1) \\ (6 \pm 1) \cdot e^{-(7,0 \pm 0,1)} \\ \cos(45^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 10

$$\sqrt{81 \pm 9} + (15 \pm 1)^3 / (10 \pm 2) \\ \ln(100 \pm 2) / [(15 \pm 1) - (10 \pm 1)] \\ \cos(45^\circ \pm 2^\circ)$$

Вариант 11

$$(20 \pm 1) \cdot e^{-(6,0 \pm 0,1)} \\ \sqrt{49 \pm 4} + (4,5 \pm 0,1)^3 \cdot (20 \pm 1) \\ \ln(90 \pm 1)$$

Вариант 12

$$\sqrt{81 \pm 9} + (5,0 \pm 0,1)^3 / (10 \pm 2) \\ e^{-(5,0 \pm 0,1)} / [(15 \pm 1) - (10 \pm 1)] \\ \cos(65^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 13

$$(30 \pm 1) \cdot e^{6,0 \pm 0,1} \\ \sqrt{81 \pm 4} + (3,5 \pm 0,1)^3 \cdot (30 \pm 1) \\ \sin(50^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 14

$$(12 \pm 1) \cdot [(55 \pm 2) - (10 \pm 2)] \\ \sqrt{49 \pm 4} + (5,0 \pm 0,1)^4 / (15 \pm 1) \\ \sin(45^\circ \pm 1^\circ)$$

Вариант 15

$$\sqrt{16 \pm 4} + (3,0 \pm 0,1)^2 \cdot (10 \pm 1) \\ (20 \pm 3) \cdot e^{3,0 \pm 0,1} \\ \ln(10 \pm 1)$$

Вариант 16

$$\sqrt{81 \pm 9} + (15 \pm 1)^3 / (10 \pm 1) \\ \ln(200 \pm 2) / [(20 \pm 1) - (15 \pm 1)] \\ \cos(60^\circ \pm 1^\circ)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 (расчетная).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ.

1. Студент измеряет величину x пять раз и получает результаты: 5, 7, 9, 7, 8. Вычислите среднее значение $\bar{x}$ и σ_x .
2. В результате измерений коэффициента упругости пружины k были получены следующие значения (в Н/м): 86, 85, 84, 89, 86, 88, 88, 85, 83, 85. Вычислите среднее значение и стандартное отклонение результатов измерений. Для удобства составьте таблицу.

Таблица 1.

№	Измеренное значение x_i	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
1			
2			
..			
	$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

3. Вычислите среднее значение $\bar{t}$ и стандартное отклонение σ_t для следующих 30 измерений времени (в секундах). Результаты оформите подобно таблице 1.
8,16; 8,14; 8,12; 8,16; 8,18; 8,10; 8,18; 8,18; 8,18; 8,18; 8,24; 8,16; 8,14; 8,17; 8,18; 8,21; 8,12; 8,12; 8,17; 8,06; 8,10; 8,12; 8,10; 8,14; 8,09; 8,16; 8,16; 8,21; 8,14; 8,16; 8,13.
4. Вычислите стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для пяти результатов задачи 1. Какой итоговый вывод о значении x должен сделать студент?
5. Проведена серия из 15 измерений. Получены следующие результаты.

X	1	2	3	4	5
1	10,15	10,75	11,95	11,50	10,55
2	10,10	10,75	11,75	11,55	12,60
3	10,10	11,00	11,80	10,15	11,25

Перепишите таблицу в более удобном формате. Найти доверительный интервал для истинного значения измеряемой величины при $\alpha=0,9$; $\alpha=0,95$; $\alpha=0,99$.

6. Студент измеряет период колебаний маятника три раза и получает результаты: 1,6; 1,8; 1,7 (все в секундах). Чему равны среднее значение и стандартное отклонение? Если студент проведет четвертое измерение, то какова вероятность того, что новое измерение не попадет в интервал: [1,6-1,8]?
7. Известно, что в случае большого числа измерений приблизительно 70% всех результатов попадают в интервал $\bar{t} \pm \sigma_x$, а 95% всех результатов в интервал $\bar{t} \pm 2\sigma_x$. Для результатов задачи 3 определите сколько результатов должно лежать внутри интервалов шириной σ и $2 \cdot \sigma$. А сколько лежит на самом деле?
8. После нескольких измерений скорости звука u студент приходит к выводу, что стандартное отклонение измерений равно $\sigma_u=10$ м/с. Предполагая, что все ошибки случайны, студент может добиться любой желаемой точности, выполняя достаточно большое число измерений и усредняя. Сколько измерений необходимо сделать, чтобы конечная погрешность результата составляла ± 3 м/с, $\pm 0,5$ м/с?
9. В исследованиях коэффициента упругости методом пружинного маятника получены значения, представленные в таблице 2. Рассчитайте $\bar{k}$ и $\sigma_{\bar{k}}$.

Таблица 2.

№	Масса m , кг	Период T , с	$k=4 \cdot \pi^2 m/T^2$	$(\bar{k} - k)^2$	$\sigma_{\bar{k}}$
1	0,513	1,24			
2	0,581	1,33			
3	0,634	1,36			
4	0,691	1,44			
5	0,752	1,50			
6	0,834	1,59			
7	0,901	1,65			
8	0,950	1,69			
	$\bar{m} =$	$\bar{T} =$	$\bar{k} =$		

10. Докажите, что среднее значение отклонения $\bar{x} - x_i$ равно нулю.
11. Докажите, что $\sum[(x_i - \bar{x})^2] = \sum(x_i)^2 - N\bar{x}^2$.
12. В таблицах 3 и 4 приведены результаты десяти измерений длины l и ширины b прямоугольника, которые используются для вычисления площади $S=l \cdot b$. Вычислите значение площади двумя способами: 1) найдите значение S для каждой пары значений l и b , затем усредните и найдите $\sigma_{\bar{S}}$, (таблица 3), 2) найдите $\bar{l}, \bar{b}$, и $\sigma_{\bar{l}}, \sigma_{\bar{b}}$, затем по формуле произведения для двух множителей с погрешностями найдите площадь и соответствующую ей ошибку (таблица 4). Сравните получившиеся значения.

Таблица 3.

№	Длина, l	Ширина, b	Площадь, S	$\bar{S}$	$\sigma_{\bar{S}}$	
1	24,25	50,36				
2	24,26	50,35				
3	24,22	50,41				
4	24,28	50,37				
5	24,24	50,36				
6	24,25	50,32				
7	24,22	50,39				
8	24,26	50,38				
9	24,23	50,36				
10	24,24	50,38				

Ответ: $S = \quad \pm \quad$.

Таблица 4.

№	Длина, l	Ширина, b	$\bar{l}$	$\bar{b}$	σ_l	σ_b	$\bar{S}$	ΔS
1	24,25	50,36						
2	24,26	50,35						
3	24,22	50,41						
4	24,28	50,37						
5	24,24	50,36						
6	24,25	50,32						
7	24,22	50,39						
8	24,26	50,38						
9	24,23	50,36						
10	24,24	50,38						

Ответ: $S = \quad \pm \quad .$

Вывод:

13. Задание по вариантам

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как уменьшить случайные и систематические ошибки в эксперименте?
2. Дайте определение математического ожидания и стандартного отклонения.
3. Чем отличаются стандартное отклонение и стандартное отклонение среднего?
4. Охарактеризуйте нормальное (гауссовское) распределение и опишите его свойства.
5. Чему равна вероятность попадания в интервал шириной $\pm \sigma$, $\pm 2\sigma$?
6. Как производится расчет случайных погрешностей с применением коэффициентов Стьюдента?

Задание по вариантам

Вариант 1.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
36,9		
37,2		
36,9		
36,6		
36,9		
36,9		
37,2		
36,9		
36,6		
36,6		
37,2		
37,2		
36,6		
36,6		
36,6		
36,6		
36,9		
37,2		
37,2		
37,2		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 2.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
24,6		
24,6		
25,2		
24,6		
24,3		
25,2		
25,2		
24,9		
24,9		
24,9		
24,9		
25,2		
24,6		
24,3		
24,3		
25,2		
24,3		
24,9		
24,9		
25,2		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 3.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
28,6		
28,6		
27,8		
28,2		
28,6		
27,8		
28,6		
28,2		
27,8		
27,8		
28,2		
27,8		
27,4		
27,8		
28,2		
27,8		
28,6		
28,6		
27,4		
27,8		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 4.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
66,2		
65,4		
66,2		
65,8		
66,6		
66,2		
66,2		
65,8		
66,2		
66,2		
65,8		
65,8		
65,8		
65,8		
66,2		
65,4		
65,8		
66,2		
65,8		
65,4		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 5.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
73,2		
74,4		
73,2		
73,8		
74,4		
74,4		
73,2		
73,2		
73,2		
74,4		
74,4		
73,8		
73,8		
73,2		
72,6		
74,4		
72,6		
72,6		
72,6		
72,6		
74,4		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 6.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
86,4		
84,6		
85,8		
86,4		
85,8		
85,8		
85,2		
85,2		
84,6		
84,6		
86,4		
85,2		
86,4		
86,4		
86,4		
85,2		
85,8		
85,8		
85,2		
85,8		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 7.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
21,6		
23,4		
23,4		
22,8		
21,6		
21,6		
21,6		
22,2		
23,4		
23,4		
23,4		
23,4		
22,2		
22,8		
23,4		
22,8		
22,8		
21,6		
21,6		
23,4		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 8.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
41,4		
40,2		
39,6		
40,2		
40,2		
39,6		
41,4		
40,2		
40,8		
40,8		
39,6		
40,2		
40,8		
40,2		
39,6		
40,8		
41,4		
39,6		
39,6		
39,6		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 9.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
51,1		
50,4		
50,4		
49,7		
50,4		
49,7		
51,8		
51,8		
49,7		
51,8		
51,1		
51,1		
49,7		
51,8		
49,7		
50,4		
51,8		
49,7		
49,7		
49,7		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 10.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
91,8		
91,8		
90,4		
91,1		
91,8		
89,7		
90,4		
91,8		
91,1		
89,7		
89,7		
91,1		
90,4		
91,1		
91,1		
91,1		
91,8		
90,4		
90,4		
89,7		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 11.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
41,3		
41,2		
39,1		
40,7		
41,2		
38,6		
40,4		
41,2		
43,8		
41,6		
39,7		
40,4		
41,8		
42,2		
39,4		
41,8		
41,4		
39,9		
39,1		
39,5		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 12.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
88,6		
87,6		
86,8		
88,2		
87,6		
86,8		
88,6		
87,2		
88,8		
86,8		
89,2		
88,8		
87,4		
88,8		
86,2		
87,8		
88,6		
86,6		
86,4		
87,8		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 13.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha n} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
25,4		
26,7		
26,3		
25,5		
25,1		
26,9		
25,4		
25,3		
26,7		
25,2		
26,4		
25,7		
26,9		
25,4		
25,8		
26,2		
26,7		
25,3		
26,2		
25,1		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

Вариант 14.

Вычислите среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ для следующих 20 измерений. Ответ запишите в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{\alpha} \sigma_{\bar{x}}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

x	Отклонение $\bar{x} - x_i$	$(\bar{x} - x_i)^2$
186,2		
185,4		
186,2		
185,8		
186,6		
186,2		
186,2		
185,8		
186,2		
186,2		
185,8		
185,8		
185,8		
185,8		
186,2		
185,4		
185,8		
186,2		
185,8		
185,4		
$\bar{x} =$		$\sigma_x =$

Ответ: $x =$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 (расчетная).

ГИСТОГРАММЫ. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ. ПРОВЕРКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ. КРИТЕРИЙ ШОВЕНЕ.

- Некоторый образец радиоактивного вещества содержит $1,5 \cdot 10^{20}$ ядер, каждое из которых с вероятностью $p=10^{-20}$ может распасться в любую выбранную минуту.
 - чему равно ожидаемое среднее число μ распадов в образце за одну минуту?
 - вычислите вероятность $P(k)$ наблюдения k распадов в минуту для $k=0,1,2,3$.
 - какова вероятность наблюдения четырех и более распадов в одну минуту?
- По данным за 28 дней фермер на птицеферме определил, что между 10:00 и 10:30 утра все его курицы откладывают в среднем 2,5 яйца. Предполагая, что число откладываемых яиц подчиняется распределению Пуассона с $a=2,5$, подсчитайте, сколько за это время было дней, когда между 10:00 и 10:30 утра не оказывалось ни одного отложенного яйца? А сколько дней, когда было 2 яйца или меньше?
- Чтобы определить коэффициент упругости пружины k , студент подвешивает к ней различные массы m и измеряет соответствующие длины l . Его результаты приведены в таблице 1. Эти данные должны ложиться на линию $l=l_0+(g/k)m$. Найдите аппроксимацию этих данных методом наименьших квадратов и получите оценки для длины пружины l_0 и коэффициента упругости k . Постройте график, на котором отложите экспериментальные точки и линию, полученную методом наименьших квадратов.

Таблица 1.

Масса груза m , г	200	300	400	500	600	700	800	900
Длина l , см	5,1	5,5	5,9	6,8	7,4	7,5	8,6	9,4

- Поезд, движущийся как полагают, с постоянной скоростью, проезжает четыре различных пункта, в каждом из которых делаются замеры времени; результаты приведены в таблице 2. Примените аппроксимацию методом наименьших квадратов в виде $d = d_0 + vt$ и найдите наилучшую оценку скорости поезда v .

Таблица 2.

Расстояние, м	0	1000	2000	3000
Время, с	17,6	40,4	67,7	90,1

- Число распадов R в единицу времени для некоторого радиоактивного образца уменьшается экспоненциально по мере истощения образца: $R = R_0 \exp(-\frac{t}{\tau})$, где τ - среднее время жизни образца. Студент проводит измерения величины R в течение 3 часов и получает результаты приведенные в таблице 3. Произведите аппроксимацию $\ln R = \ln R_0 - \frac{t}{\tau}$ методом наименьших квадратов и определите τ .

Таблица 3.

Время t , ч	0	1	2	3
Темп распада R , отн. ед.	13,8	7,9	6,1	2,9

6. В задаче 3 лабораторной работы №5 приведены результаты 30 измерений времени t , их среднее $\bar{t} = 8,15$ с, стандартное отклонение $\sigma_t = 0,04$ с. Распределите данные по четырем бинам, постройте гистограмму результатов. Определите числа наблюдений O_k для каждого бина. Предполагая, что результаты распределены нормально с центром $\bar{t}$ и дисперсией σ_t^2 найдите ожидаемые числа E_k для каждого бина. Вычислите χ^2 . Имеются ли основания сомневаться в том, что результаты распределены нормально?
7. Игрок решает проверить игральную кость, бросая её 240 раз. В каждом броске может реализовываться один из шести возможных вариантов. Распределение результатов бросаний приведено в таблице 4. Чему равны ожидаемые числа наблюдений E_k , в предположении, что игральная кость подлинная. Рассматривая результат для каждой грани как отдельный бин, вычислите χ^2 . Представляется ли вероятным, что кость утяжелена?

Таблица 4.

Номер выпавшей грани, k	1	2	3	4	5	6
Числа наблюдений, O_k	20	46	35	45	42	52

8. Выполните задание по вариантам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Опишите свойства биномиального распределения.
2. Опишите свойства распределения Пуассона.
3. Сформулируйте последовательность действий по отбрасыванию промахов с применением критерия Шовене.
4. Подробно опишите применение метода наименьших квадратов для аппроксимации экспериментальных данных.

Задание по вариантам

Вариант 1

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось угловое ускорение ε некоторого тела. Используя метод наименьших квадратов, определите момент инерции этого тела J .

№	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\varepsilon, \text{с}^{-2}$
1	1,44	0,52
2	3,12	1,06
3	4,59	1,45
4	5,90	1,92
5	7,45	2,56

Вариант 2

Сопротивление зависит от температуры по линейному закону:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ) = R_0 + R_0 \alpha t^\circ.$$

Свободный член определяет сопротивление R_0 при температуре 0°C , а угловой коэффициент ($R_0 \cdot \alpha$) – произведение температурного коэффициента α на сопротивление R_0 . Результаты измерений и расчетов приведены в таблице. Используя метод наименьших квадратов, вычислите температурный коэффициент сопротивления металла по экспериментальным данным.

№	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$
1	23	1,242
2	59	1,326
3	84	1,386
4	96	1,417
5	120	1,512
6	133	1,520

Вариант 3

С помощью машины Атвуда, исследовалось основное уравнение динамики поступательного движения $a = F/m$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях силы измерялось ускорение некоторого тела. Используя метод наименьших квадратов, постройте график зависимости $a = f(F)$ и определите по нему массу тела.

№	$F, \text{Н}$	$a, \text{м/с}^2$
1	0,2	1,9
2	0,3	3,2
3	0,4	4,4
4	0,5	5,1
5	0,6	6,7
6	0,7	7,3

Вариант 4

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось угловое ускорение ε некоторого тела. Используя метод наименьших квадратов, определите момент инерции этого тела J .

№	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2$
1	1,44	0,52
2	3,12	1,06
3	4,59	1,45
4	5,90	1,92
5	7,45	2,56

Вариант 5

При помощи машины Атвуда исследуется ускоренное движение некоторого тела. Используя метод наименьших квадратов, вычислите ускорение, с которым движется тело (воспользуйтесь уравнением $S = S_0 + \frac{at^2}{2}$).

№	$S_i, \text{см}$	$t_i, \text{с}$
1	20	1,24
2	30	1,58
3	40	1,84
4	50	2,01
5	60	2,26
6	70	2,40
7	80	2,54

Вариант 6

Используя данные таблицы, проверьте справедливость закона преломления $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ ($n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления среды) и определите относительный показатель преломления среды, используемой в эксперименте. Что это за среда?

№	α	β
1	10	8,0
2	20	15,5
3	30	22,5
4	40	28,0
5	50	35,0
6	60	40,5
7	70	45,0
8	80	50,0

Вариант 7

Измеренные значения тока I и соответствующие им значения падения напряжения U приведены в таблице. Используя метод наименьших квадратов, определите сопротивление R (угловым коэффициентом линейной зависимости $I=f(U)$, проходящей через начало координат, будет обратное сопротивление R^{-1})

№	I, mA	U, B
1	13,2	11
2	16,9	19
3	25,3	29
4	44,3	36
5	46,1	47
6	62,7	57

Вариант 8

Для определения ЭДС аккумулятора проводят измерения напряжения на его клеммах при различном токе через нагрузку. Экспериментальные данные представлены в таблице. По методу наименьших квадратов определите прямую $U=f(I)$. По закону Ома для полной цепи напряжение на зажимах источника определяется уравнением $U = \mathcal{E} - Ir$, где $\mathcal{E}$ - ЭДС, а r - внутреннее сопротивление источника. Определите ЭДС аккумулятора и его внутреннее сопротивление.

№	U, B	I, A
1	19,1	1,2
2	15,5	1,35
3	12,9	2,1
4	11,5	2,4
5	10,3	3,2
6	4,3	4,1

Вариант 9

Для определения величины постоянной Планка h проводят исследование внешнего фотоэффекта. Измеряют зависимость максимальной энергии фотоэлектронов eU (в электрон-вольтах) от частоты падающего света ν (в Герцах). Согласно закону Эйнштейна для фотоэффекта эта зависимость имеет вид: $eU = h\nu - A_{\text{вых}}$, где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода фотоэлектронов (энергия, которую необходимо затратить, чтобы вырвать электрон из металла). Методом наименьших квадратов из функции $eU=f(\nu)$ определите значение постоянной Планка (табличное значение $h=4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}\cdot\text{с}$).

№	$eU, \text{эВ}$	$\nu, 10^{15} \text{ Гц}$
1	0,8	0,6
2	1,1	0,7
3	1,4	0,8
4	1,9	0,9
5	2,2	1

Вариант 10

С помощью математического маятника, исследовалась зависимость периода колебаний

$(T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}})$ от длины. Используя метод наименьших квадратов, постройте график

зависимости квадрата периода колебаний математического маятника от его длины и определите ускорение свободного падения тела.

№	l , м	T , с	T^2 , с ²
1	1,5	2,45	
2	1,6	2,53	
3	1,7	2,62	
4	1,8	2,67	
5	1,9	2,78	
6	2,1	2,82	

Вариант 11

Расплавленный свинец помещен в стальную кювету, его температура измеряется с помощью температурного датчика. Измеряют зависимость температуры жидкого металла от времени. Используя метод наименьших квадратов, определите скорость остывания свинца ($\Delta T / \Delta t$, °C в секунду)

№	t_i , с	T_i ,
1	0	191
2	30	186
3	60	180
4	90	176
5	120	172
6	135	169

Вариант 12

Используя метод наименьших квадратов, проверьте справедливость закона преломления $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ ($n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления среды) и определите относительный показатель преломления среды, используемой в эксперименте. Что это за среда?

№	α	β
1	10	6,5
2	20	13,2
3	30	19,5
4	40	25,3
5	50	30,7
6	60	35,3
7	70	38,7
8	80	41,2

Вариант 13

Для определения ЭДС аккумулятора проводят измерения напряжения на его клеммах при различном токе через нагрузку. Экспериментальные данные представлены в таблице. По методу наименьших квадратов определите прямую $U=f(I)$. По закону Ома для полной цепи напряжение на зажимах источника определяется уравнением $U = \mathcal{E} - Ir$, где $\mathcal{E}$ - ЭДС, а r - внутреннее сопротивление источника. Определите ЭДС аккумулятора и его внутреннее сопротивление.

№	U, B	I, A
1	21,1	1,2
2	17,5	1,5
3	14,9	1,9
4	13,5	2,4
5	11,5	3,1
6	6,3	4,2

Вариант 14

Сопротивление зависит от температуры по линейному закону:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ) = R_0 + R_0 \alpha t^\circ.$$

Свободный член определяет сопротивление R_0 при температуре $0^\circ C$, а угловой коэффициент ($R_0 \cdot \alpha$) – произведение температурного коэффициента α на сопротивление R_0 . Результаты измерений и расчетов приведены в таблице. Используя метод наименьших квадратов, вычислите температурный коэффициент сопротивления металла по экспериментальным данным.

№	$t, ^\circ C$	$R, \text{Ом}$
1	23	1,242
2	59	1,326
3	84	1,386
4	96	1,417
5	120	1,512
6	133	1,520

Вариант 15

Исследовалось основное уравнение динамики вращательного движения $\varepsilon = M/J$ (прямая, проходящая через начало координат). При различных значениях момента M измерялось угловое ускорение ε некоторого тела. Используя метод наименьших квадратов, определите момент инерции этого тела J .

№	$M, \text{Н} \cdot \text{м} (\pm 4\%)$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2 (\pm 3\%)$
1	1,37	0,35
2	3,02	0,98
3	4,62	1,35
4	5,97	1,72
5	7,49	2,34

Вариант 16

С помощью физического маятника исследовалась зависимость периода колебаний от расстояния между центром тяжести и осью качания. Период колебаний физического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$, где J – момент инерции маятника относительно оси качания, l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника. Например, для физического маятника, имеющего вид однородного стержня, колеблющегося вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной стержню, формула периода приобретает вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l^2 + d^2 / 12}{l \cdot g}},$$

где d – длина стержня, l – расстояние от оси качаний до центра тяжести стержня. Используя метод наименьших квадратов, для функции $T^2 l = f(l^2)$ определите ускорение свободного падения тела и длину стержня.

№	$l, \text{м} (\pm 1\%)$	$T, \text{с} (\pm 2\%)$	$l^2, \text{м}^2$	$T^2 l, \text{с}^2 \text{м}$
1	0,50	1,69		
2	0,45	1,63		
3	0,40	1,61		
4	0,35	1,62		
5	0,30	1,62		
6	0,25	1,63		
7	0,20	1,67		
8	0,15	1,87		

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ

Цель работы: научиться измерять размеры тел штангенциркулем, микрометром, сферометром.

Оборудование: штангенциркуль, микрометр, сферометр, объекты для измерения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Измерение длин штангенциркулем.

Измерение – одна из основных операций проводимых в науке. В физике под измерением понимается сравнение какой либо величины с эталоном.

Одними из наиболее часто измеряемых в науке, технике, а также повседневной жизни являются линейные размеры самых разнообразных тел, а также расстояния между телами. Для решения таких задач используется большое число разнообразных инструментов, таких как линейки, измерительные ленты, разнообразные штангенинструменты и многие другие.

Наиболее часто применяемыми в практике являются штангенинструменты, одним из наиболее известных представителей которых является штангенциркуль. По типу измерительного механизма штангенциркули подразделяются на нониусные, циферблатные и цифровые. Также в зависимости от типа измеряемых величин они могут иметь различную форму. При значительном разнообразии этих инструментов принцип работы с ними один и тот же. Для понимания принципа построения измерительных систем рассмотрим нониусный штангенциркуль.

Внешний вид нониусного штангенциркуля типа ШЦ-1 показан на рис. 1, там же названы его основные детали.

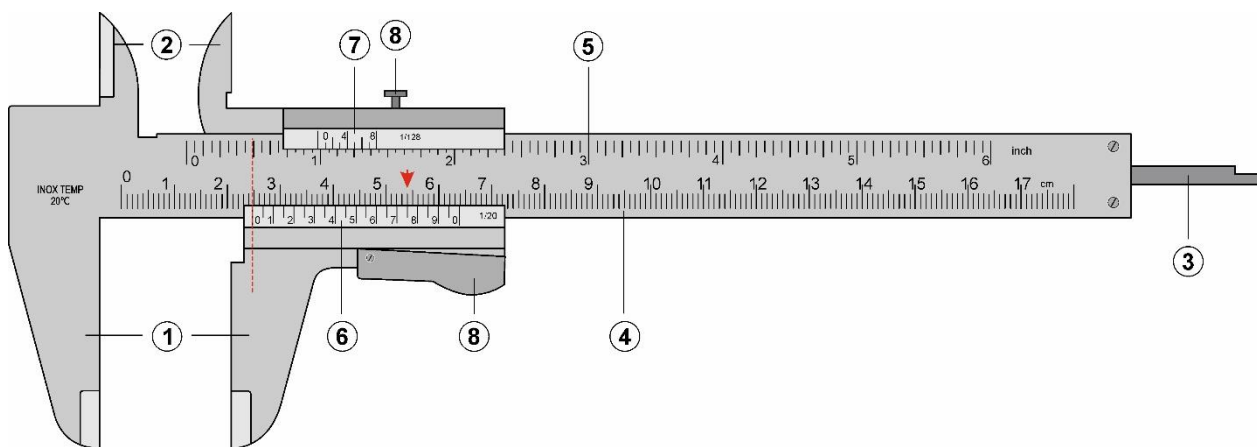


Рис.1 . 1 – губки для наружных измерений; 2 – губки для внутренних измерений; 3 – линейка глубиномера; 4 – шкала штанги в см; 5 – шкала штанги в дюймах; 6 – шкала нониуса в см, 7 – шкала нониуса в дюймах, 8 – винт для зажима рамки

При первом рассмотрении штангенциркуль сильно напоминает линейку с дополнительными деталями. Основной особенностью штангенциркуля является наличие нониуса. Нониус – вспомогательная короткая шкала, позволяющая повысить точность измерений в 10-20 и более раз. Эта деталь может плавно двигаться относительно основной шкалы. Рассмотрим принцип работы этого устройства.

На рис. 2 показаны две шкалы. Их отличие заключается в следующем: на 10 штрихов по дополнительной шкале – нониусу приходится 9 делений по основной. При таком способе нанесения оказывается, что первое деление по основной и дополнительной шкале отстоят друг от друга на расстояние δ , вторые – на 2δ и т.д. Если в результате измерения нулевая отметка нониуса оказывается смещенной, на расстояние 2δ , то произойдет совпадение 2 риски по основной и дополнительной шкале. В том случае, если произошло совпадение риски под номером n , можно утверждать, что первое деление

нониуса отстоит от первого деления основной шкалы на $n\delta$.



Рис. 2

Используя описанное выше свойство, мы можем сформулировать принцип измерения величин с помощью шкалы с нониусом. Во-первых, определяем показания по основной шкале, для этого мы определяем количество делений K основной шкалы, находящихся до первого деления по нониусу и находим величину. Если верхняя шкала - масштаб с ценой деления 1 мм, то нижняя шкала - нониус - строится так, что на отрезок 9 мм приходится 10 делений нониуса. В результате цена деления нониуса составляет 0,9 мм. Поэтому, если нулевой штрих нониуса (крайний левый) совпадает с нулевым штрихом масштаба, то первые штрихи масштаба и нониуса отстоят друг от друга на расстоянии $1 \text{ мм} - 0,9 \text{ мм} = 0,1 \text{ мм}$. Вторые - на расстоянии 0,2 мм, третьи - 0,3 мм и т.д.

Если рамку сдвинуть вправо на 0,1 мм, то первые штрихи совпадут, а между губками образуется расстояние 0,1 мм. Если же рамку сдвинуть на 0,2 мм, то совпадут уже вторые штрихи и т.д. Таким образом, номер штриха нониуса, совпадающего со штрихом масштаба, показывает число десятых долей миллиметра.

Ситуация не меняется, если отсчет ведется не от нулевого штриха масштаба, а от любого его деления.

На рис. 3 штангенциркуль стоит в положении 23,6 мм. Количество целых миллиметров определяется числом целых делений масштаба, находящихся слева от нулевого штриха нониуса, а количество десятых долей - номером штриха нониуса, совпадающего с каким-либо штрихом масштаба. На рис. 3 этот штрих помечен стрелкой.

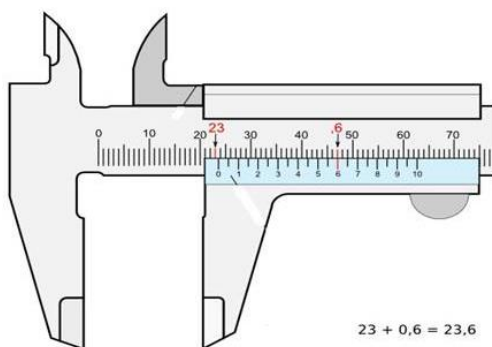


Рис.3

Минимальный шаг прибора с нониусом называется точностью нониуса. В рассмотренных примерах точность нониуса 0,1 мм. Точность нониуса определяется отношением минимального деления шкалы масштаба к числу делений нониуса. В данном случае $1 \text{ мм} / 10 \text{ дел.} = 0,1 \text{ мм}$.

Существуют штангенциркули, у которых в нониусе 20 делений. При миллиметровой шкале масштаба точность таких нониусов составляет $1 \text{ мм} / 20 \text{ дел.} = 0,05 \text{ мм}$.

Существуют штангенциркули, у которых общая длина нониуса не 9 мм, а больше, обычно 19 мм. В этом случае при 10 делениях в нониусе цена деления нониуса составляет 1,9 мм. Точность нониуса здесь определяется также отношением цены деления масштаба к числу делений нониуса, т.е. в данном случае - 0,1 мм. Такие растянутые нониусы удобнее в работе, поскольку их штрихи расположены дальше друг от друга, что облегчает отсчет.

Измерение штангенциркулем состоит из нескольких этапов.

а. **Проверка установки нониуса.** Губки штангенциркуля сводятся вместе до упора, после чего нужно выяснить, совпадают ли нулевые штрихи масштаба и нониуса.

б. **Определение точности нониуса.** Выясняется цена деления шкалы масштаба, то есть расстояние между ее любыми соседними штрихами, и делится на число делений нониуса.

Все выпускаемые сейчас в России штангенциркули имеют точность нониуса 0,1 или 0,05 мм.

в. Измерение. Объект зажимается между губками, после чего затягивается стопорный винт. Надавливая большим пальцем на рифленый выступ справа от шкалы нониуса губки дожимают так, чтобы объект извлекался с некоторым усилием. Чтобы рамка случайно не сдвинулась, стопорится винт. При последующем измерении этот винт ослабляется.

г. Отсчет. Вначале определяется количество целых миллиметров по шкале масштаба, затем - число десятых или сотых по нониусу. Результат измерения записывается в миллиметрах. Если нуль нониуса установлен максимально точно, а измерение выполнено достаточно аккуратно, то максимальная абсолютная погрешность единичного измерения штангенциркулем равна половине точности нониуса, допускаемой при установке нуля, плюс половина точности нониуса при отсчете. В целом, абсолютная погрешность измерения штангенциркулем равна точности нониуса.

Нониусы – исключительно широко применяемое в приборах отсчетное устройство. Идею нониуса предложил в 1631 г. француз Поль Вернье. Поэтому круговые устройства с нониусом для отсчета углов называют часто верньерами.

Техника отчета углов по нониусу ничем не отличается от отсчета длин. Здесь требуется лишь внимательно определить цену деления круговой шкалы и число делений нониуса, чтобы определить его точность.

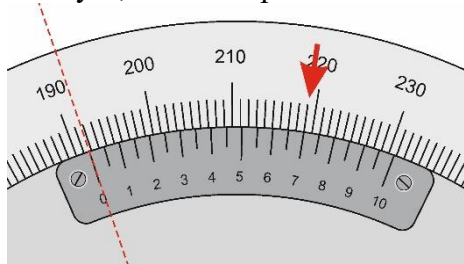


Рис.4

На рис. 4 показана круговая шкала (сверху), на которой нанесены градусы, и нониус (снизу). Чтобы определить точность отсчета, определим цену деления шкалы масштаба. Легко видеть что цена деления равна 1° или 60 минут ($60''$). В нониусе 20 делений, следовательно, точность нониуса $60/20 = 3$ минуты. Для положения, указанного на рисунке отсчет дает значение $191,7^\circ$ или $191^\circ 42''$

Пример. По данным измерений диаметра и высоты цилиндра получено 5 пар значений D и h . Их значения и результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№	D , мм	h , мм	V , см ³	ΔV_i	$(\Delta V_i)^2$	$\sigma_{\bar{V}}$	$\Delta V_{сл}$	$\Delta V_{сист}$	ΔV	$V = \bar{V} \pm \Delta V$, см ³
1.	45,7	137,1	224,8	0	0	1,64	4,5	1,1	4,63	225±5
2.	44,9	140,0	221,6	-3,2	10,26					
3.	46,2	135,8	227,5	2,8	7,70					
4.	44,8	140,1	220,7	-4,0	16,25					
5.	45,8	139,2	229,2	4,5	19,81					
	$\bar{D} = 45,5$	$\bar{h} = 138,4$	$\bar{V} = 224,8$		$\sum (\Delta V_i)^2 = 54,02$					

Вычислим погрешность измерения объема цилиндра. Формула вычисления объема цилиндра $V = \frac{\pi D^2}{4} h$ представляет собой произведение множителей, поэтому для относительной погрешности объема получаем:

$$\varepsilon_V = \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}$$

Рассчитаем систематическую погрешность. Поскольку инструментальная погрешность штангенциркуля равна цене деления нониуса, то $\Delta D = \Delta h = 0,1$ мм. Относительная систематическая погрешность будет равна:

$$\varepsilon_{\text{сист}} = \frac{\Delta V_{\text{сист}}}{\bar{V}} = \frac{2 \cdot 0,1}{45,48} + \frac{0,1}{138,44} \approx 0,005 \approx 0,5\%; \Delta V_{\text{сист}} = \varepsilon_{\text{сист}} \cdot \bar{V} = 0,005 \cdot 224,8 \approx 1,1 \text{ см}^3.$$

Итак, систематическая погрешность измерения объема цилиндра $1,1 \text{ см}^3$. Рассчитаем теперь случайную погрешность. Для этого воспользуемся формулой стандартного отклонения среднего:

$$\sigma_{\bar{V}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i^2}{n(n-1)}} \approx 1,64 \text{ см}^3.$$

Так как число измерений $n \ll 20$, то необходимо вычислить случайную ошибку измерений с использованием коэффициентов Стьюдента. Зададим надежность $\alpha=0,95$. Для такой надежности и $n=5$ коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}=2,8$. Тогда $\Delta V_{\text{сл.}} = t_{\alpha,n} \cdot \sigma_{\bar{V}} = 2,8 \cdot 1,6 \approx 4,5 \text{ см}^3$. Как видно, случайная погрешность значительно превосходит систематическую, а это говорит о значительных колебаниях параметров объекта – диаметра и высоты цилиндра. Общая абсолютная погрешность будет вычисляться по формуле:

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_{\text{сист.}}^2 + \Delta V_{\text{сл.}}^2} \approx 4,63 \text{ см}^3.$$

Запишем окончательный результат в виде $V = \bar{V} \pm \Delta V$. Для этого округлим абсолютную погрешность до одной значащей цифры (поскольку первая значащая цифра 4 > 1). Т.е. $\Delta V \approx 5 \text{ см}^3$. В соответствии с этим значением, округлим среднее значение объема цилиндра так, чтобы в нем не было неверных цифр. Последняя значащая цифра в среднем значении должна быть того же порядка, что и погрешность. В данном случае, десятичный разряд погрешности – единицы, поэтому среднее значение нужно округлить таким образом, чтобы последняя значащая цифра в нем тоже должна быть в разряде единиц:

$$V = \bar{V} \pm \Delta V = 225 \pm 5 \text{ см}^3.$$

Определение длин микрометром

Микрометр – измерительный прибор, действие которого основано на использовании пары винт-гайка. Как и штангенциркуль, микрометр используется для измерения линейных размеров тел абсолютным контактным методом.

Действие микрометра основано на перемещении винта вдоль оси при вращении его в неподвижной гайке. Полные обороты отсчитывают по шкале, нанесенной на стебле микрометра, а доли оборота – по круговой шкале, нанесенной на барабане.

Если один оборот барабана соответствует продольному перемещению винта на 1 мм, то шкала на стебле имеет только миллиметровые деления. В большинстве микрометров один оборот соответствует перемещению винта на 0,5 мм. В таких приборах шкала на стебле двойная. Снизу от горизонтальной линии нанесены миллиметровые деления, а сверху – штрихи, делящие каждый миллиметр пополам.



Рис. 5.

На рис. 5 изображен микрометр с пределами измерений $0 \div 25$ мм, один оборот барабана которого соответствует осевому перемещению винта 0,5 мм. Поэтому шкала на стебле этого прибора двойная. По окружности барабана также нанесены деления, их 50. Так как за один оборот барабана винт перемещается вдоль оси на 0,5 мм, то цена деления барабана составляет $0,5 \text{ мм} / 50 \text{ дел.} = 0,01 \text{ мм} = 10 \text{ мкм}$. Постоянное осевое усилие при контакте винта с деталью обеспечивается трещоткой.

Измерение включает в себя несколько этапов.

а. **Проверка установки нуля.** Ослабляем стопор и вращаем трещотку до тех пор, пока винт не упрется в пятку. После этого трещотка будет проворачиваться.

Если микрометр отрегулирован правильно, с горизонтальной линией на стебле должен совпадать нулевой штрих круговой шкалы барабана (рис.6). В этом случае микрометр готов к измерениям. Если совпадения нуля нет, необходима установка нуля.

б. **Установка нуля.**

Для установки нуля вращением трещотки стебель упирается в пятку. Барабан захватывается пальцами левой руки, а правой рукой вращением против часовой стрелки ослабляется гайка барабана. В результате фланец микрометрического винта освобождается. После этого барабан поворачивается по часовой стрелке до тех пор, пока нуль его шкалы не совпадет с горизонтальной линией стебля. Затем гайка барабана затягивается.

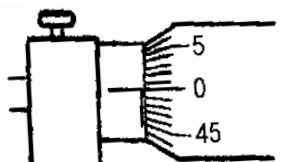


Рис. 6

Взявшись за трещотку и вывинтив на 1-2 оборота микрометрический винт, вновь медленным вращением приводим его в соприкосновение с пяткой. Если оказалось, что нуль вновь не совпадает, операция повторяется вплоть до установки нуля с точностью $\pm 0,5$ деления шкалы барабана.

в. **Измерение.** Скоба микрометра вместе с измеряемой деталью, помещенной между пяткой и микрометрическим винтом, удерживается левой рукой. Правой рукой вращается трещотка до тех пор, пока деталь не окажется зажатой и трещотка не будет проворачиваться.

г. **Отсчет.** Вначале по нижней шкале стебля считывается **целое число миллиметров**. Если сверху показался половинный штрих, добавляется **0,50 мм**, после чего считывается и добавляется показание на **барабане** (рис. 7).

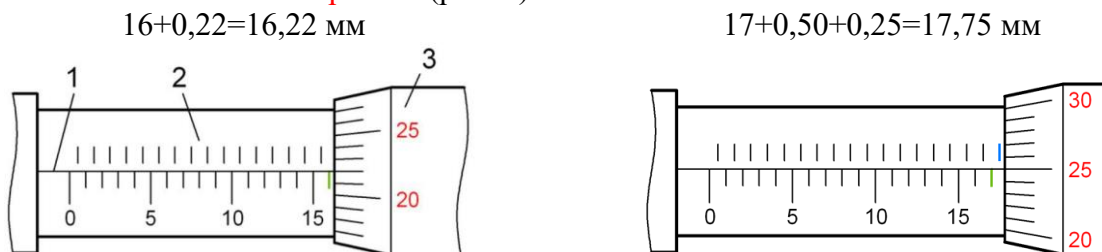


Рис. 7

Абсолютная погрешность отсчета при измерении микрометром составляет половину цены деления на барабане. Но с учетом погрешности установки нуля абсолютная погрешность измерения удваивается и равняется цене деления, то есть 0,01 мм.

Пример. По результатам измерения диаметра шара микрометром определить его объем и среднеквадратичную погрешность. Результаты измерений и вычислений

представлены в виде таблицы 2.

Таблица 2.

$D, \text{ мм}$	$V, \text{ мм}^3$	ΔV_i	$(\Delta V_i)^2$	$\sigma_{\bar{V}}$	$\Delta V_{\text{сл}}$	$\Delta V_{\text{сист}}$	ΔV	$V = \bar{V} \pm \Delta V, \text{ мм}^3$
1,27	1,1	-0,5	0,22	0,21	0,6	0,03	0,6	$1,5 \pm 0,6$
1,38	1,4	-0,2	0,03					
1,31	1,2	-0,4	0,13					
1,53	1,9	0,3	0,11					
1,61	2,2	0,6	0,42					
$\bar{D} = 1,42$	$\bar{V} = 1,5$		$\sum_i (\Delta V_i)^2 = 0,9$					

Здесь $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{1}{6}\pi D^3$. Стандартное отклонение среднего для объема равно:

$$\sigma_{\bar{V}} = \sqrt{\frac{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \Delta V_4^2 + \Delta V_5^2}{n(n-1)}} = 0,21 \text{ мм}^3,$$

Тогда абсолютная случайная погрешность

$$\Delta V_{\text{сл.}} = \sigma_{\bar{V}} \cdot t_{\alpha, n} = 0,21 \cdot 2,8 \approx 0,6 \text{ мм}^3.$$

Для расчета систематической погрешности измерений воспользуемся правилом вычисления ошибок для сложных функций. Дифференцируя выражения для расчета объема шара, получим:

$$\Delta V_{\text{сист.}} = \left| \frac{dV(D)}{dD} \right| \cdot \Delta D = \frac{\pi \bar{D}^2}{2} \cdot \Delta D.$$

Инструментальная ошибка измерений микрометром равна цене деления барабана, т.е. $\Delta D = 0,01 \text{ мм}$.

$$\Delta V_{\text{сист.}} = \frac{\pi \bar{D}^2}{2} \cdot \Delta D = 2,87 \cdot 0,01 \approx 0,03 \text{ мм}^3.$$

И в этом случае систематическая ошибка во много раз меньше случайной, что говорит о значительных колебаниях диаметра шарика.

Определение радиуса кривизны сферической поверхности сферометром

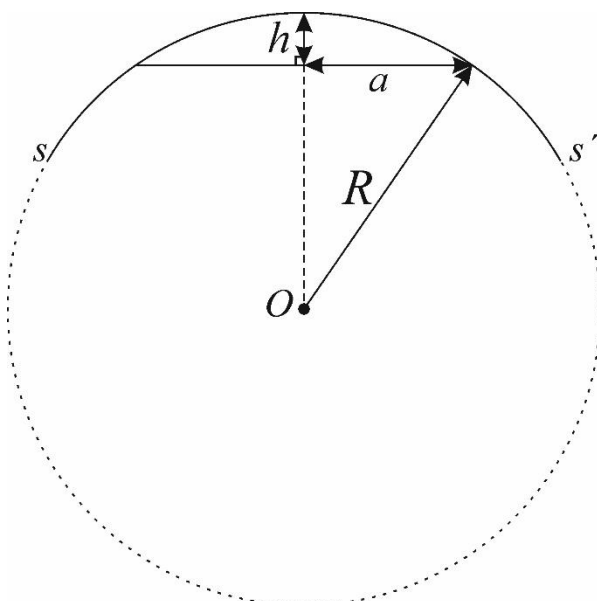


Рис. 8

Часто при работе с различным физическим оборудованием, а также при проведении специального рода исследований приходится определять кривизну разнообразных твердых поверхностей. Для решения таких задач используются сферометры. В зависимости от задач эти устройства отличаются схемой построения, однако принцип определения численного значения радиуса кривизны поверхностей остается одним и тем же.

Рассмотрим сферическую поверхность радиуса R с центром в точке O из которой вырезан сектор SS' (рис. 8). Используя простые геометрические соображения и обозначения приведенные на рисунке несложно получить формулу для

вычисления радиуса сферы:

$$R = \frac{a^2}{2h} + \frac{h}{2}.$$

Используемый в этой работе сферометр имеет вид, представленный на рисунке 9. Как видно, это устройство очень сильно напоминает микрометр, однако здесь отсутствует скоба, место которой закреплен специальный держатель для измерительного устройства, в основании которого крепятся три заостренные ножки из твердосплавного материала. Положение ножек может изменяться относительно оси стебля. В представленном устройстве возможны 4 вариации: 15,0; 25,0; 32,5; 40,0¹ мм.

Порядок работы со сферометром.

1. Установить сферометр ножками на калиброванную стеклянную пластину и проверить совпадение стрелки с нулевой отметкой. В случае несовпадения произвести корректировку путем вращения передней части часового индикатора. **ВНИМАНИЕ! При работе сферометр, как и все измерительные устройства, требует бережного обращения! Во избежание поломок не прилагайте к устройству чрезмерного усилия! В случае возникновения проблем или вопросов отложите устройство и обратитесь к квалифицированному персоналу: лаборант, преподаватель!**

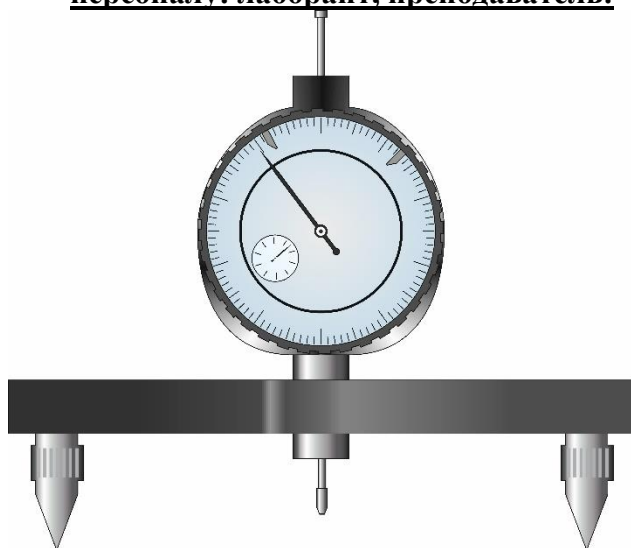


Рис. 9

2. Установите измеряемую деталь на горизонтальную поверхность выпуклой частью вверх. Поместите сферометр на деталь таким образом, чтобы стебель микрометрического измерительного механизма находился в верхней точке². Во избежание повреждений детали пользуйтесь сферометром аккуратно.

3. Проведите измерение высоты h и запишите результат в таблицу 3. Снимите сферометр и установите его на стеклянную пластину.

4. Повторите действия 2-3 еще 4 раза.

5. Произведите расчет радиуса

кривизны поверхности.

6. Произведите оценку погрешности измерений:

¹ Напомним, что запись числа типа (a,bcd) в которой отсутствует запись о погрешности означает, что погрешность не превышает половины младшего разряда данного числа, т.е. в данном случае 0,0005. В том случае, если при оценке погрешности косвенных измерений необходимо учитывать и погрешности такого рода заданных величин необходимо использовать максимальное значение возможной абсолютной погрешности (в данном случае 0,0005). **Пример.** В сборнике задач по общей физике указано значение времени $t = 1,70$ с. Такая запись эквивалентна $t = (1,700 \pm 0,005)$ с. При расчете погрешности косвенных величин с использованием этого времени используется абсолютное значение погрешности равное $\Delta t = 0,005$ с.

² В том случае, если расстояние между ножками больше размеров измеряемой детали выкрутите ножки и переместите их на меньшее расстояние. Все ножки должны находиться на одинаковом расстоянии от оси стебля. Прикручивать ножки к основанию необходимо максимально плотно, но без применения каких либо дополнительных инструментов или приспособлений.

- Найдите стандартное отклонение определения радиуса кривизны поверхности R , $\sigma_{\bar{R}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta R_i)^2}{n(n-1)}}$. Затем определите $\Delta R_{cl} = t_{\alpha, n} \cdot \sigma_{\bar{R}}$.
- Произведите оценку систематической погрешности определения радиуса кривизны поверхности используя формулу $\varepsilon_R = \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{2(a\Delta a + h\Delta h)}{a^2 + h^2} \right)$, где $\Delta a = 0,05 \text{ мм}$ и $\Delta h = 0,01 \text{ мм}$ – систематические ошибки, а затем определите $\Delta R_{сис} = \bar{R} \cdot \varepsilon_R$.
- Рассчитайте величину полной погрешности $\Delta R = \sqrt{\Delta R_{cl}^2 + \Delta R_{сис}^2}$. Запишите результат в таблицу.

Таблица 3.

№	h , мм	a , мм	R , мм	ΔR_i , мм	$(\Delta R_i)^2$	$\sigma_{\bar{R}}$	ΔR_{cl} , мм	$\Delta R_{сис}$, мм	ΔR , мм	$R = \bar{R} \pm \Delta R$, мм
1										
2										
3										
4										
5										
	$\bar{h} =$		$\bar{R} =$		$\sum_i (\Delta R_i)^2 =$					

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Задание 1.

1. Рассмотреть штангенциркуль. Определить цену деления масштаба и точность нониуса. Проверить установку нуля.
2. Измерить диаметр и высоту цилиндрического образца. Измерения повторить 5 раз попарно в разных местах и занести в таблицу 1.
3. По данным каждой строки, вычислить объем цилиндра.
4. Все дальнейшие вычисления сделать по образцу таблицы 1.
5. Вычислить систематическую и случайную погрешности измерений.
6. Сделать выводы.

Задание 2.

1. Изучить микрометр и, при необходимости, сделать его установку на нуль.
2. В 5 разных направлениях измерить микрометром диаметр шарика – образца.
3. Вычислить средний объем шара. Результаты измерений и вычислений оформить по образцу таблицы 2.
4. Вычислить случайную и систематическую погрешности.
5. Прокомментировать результаты.

Задание 3.

1. Самостоятельно разработать метод определения объема стекла в стеклянной трубке.
2. Провести необходимые измерения (не менее 5 измерений каждого параметра).
3. Провести обработку результатов измерений в соответствии с разработанным методом.
4. Проанализировать результат.
5. При защите необходимо обосновать метод и результаты с физической точки зрения.

Задание 4.

1. Используя сферометр провести определение радиуса кривизны сферической поверхности.
2. Провести необходимые измерения не менее 5 раз для каждого параметра.
3. Провести обработку и анализ результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство и принцип измерения штангенциркулем.
2. Опишите устройство и принцип работы микрометра. Приведите примеры различных видов микрометров.
3. Опишите устройство и принцип работы сферометра.
4. Как производится учет приборной погрешности при измерениях штангенциркулем и микрометром?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. МЕТОДЫ РАБОТЫ С ОПТИЧЕСКИМ МИКРОСКОПОМ

Цель работы: освоить основные приемы работы с оптическим микроскопом.

Оборудование: оптический микроскоп, камера, подключенная к компьютеру, объект-микрометр, объекты наблюдения и измерения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Принцип работы и основные характеристики микроскопа.

Микроскопы широко применяются для наблюдения и изучения мелких объектов, которые невозможно различить невооруженным глазом.

Построение изображения в микроскопе показано на рисунке 1. Оптическая схема микроскопа состоит из двух систем линз – объектива и окуляра. Для простоты построения изображения на рис. 1 система линз объектива заменена одной линзой L_1 , а система линз окуляра – линзой L_2 . Предмет AB помещается перед объективом немного дальше его фокуса. Объектив создает увеличенное действительное изображение $A'B'$ предмета вблизи переднего фокуса окуляра, которое рассматривается глазом через окуляр. Обычно изображение $A'B'$ находится немного ближе переднего фокуса окуляра F_2 . В этом случае окуляр создает увеличенное мнимое изображение $A''B''$, которое рассматривается на расстоянии наилучшего зрения.

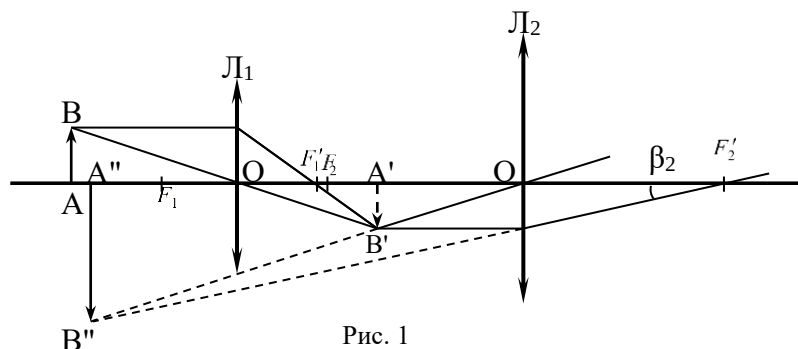


Рис. 1

Увеличение микроскопа Γ – это отношение размера окончательного изображения $A''B''$ к размеру предмета AB . Увеличение микроскопа численно равно произведению линейного увеличения $\Gamma_{об.}$ объектива на угловое увеличение $\Gamma_{ок.}$ окуляра: $\Gamma = \Gamma_{об.} \cdot \Gamma_{ок.}$. Линейное увеличение объектива равно

$$\Gamma_{об.} = \frac{|A'B'|}{|AB|} = \frac{f_1 + \Delta}{f_1} \approx \frac{\Delta}{f_1}, \quad (1)$$

где Δ – оптическая длина тубуса, расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра; f_1 – фокусное расстояние объектива. Так как, в качестве объектива используется короткофокусная линза, то $f_1 \ll \Delta$. Увеличение объектива указано на его оправе ($8\times$, $40\times$ и т.п.).

Угловое увеличение окуляра равно:

$$\Gamma_{ок.} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \approx \frac{S}{f_2} \quad (2)$$

где β_1 – угол зрения, под которым изображение $A'B'$ было бы видно на расстоянии наилучшего зрения; β_2 – угол зрения, под которым видно изображение $A''B''$, даваемое окуляром; f_2 – фокусное расстояние окуляра; S – расстояние наилучшего зрения, равное для нормального глаза 25 см. Увеличение окуляра указано на его оправе ($4\times$, $7\times$ и т.п.).

Итак, увеличение микроскопа равно

$$\Gamma = \frac{\Delta \cdot S}{f_1 \cdot f_2} \quad (3)$$

Можно предположить, что подбирая соответствующим образом значения величин f_1 , f_2 и Δ , получим микроскоп со сколь угодно большим увеличением. Однако на практике не используют микроскопы с увеличением свыше 1500^x - 2000^x , так как возможность различения мелких деталей в микроскопе ограничена влиянием дифракции света, происходящей в структуре рассматриваемого объекта. В связи с этим вводят понятия предела разрешения и разрешающей способности микроскопа.

Разрешающая способность микроскопа.

С помощью микроскопа наблюдают близко расположенные объекты, поэтому его разрешающая способность характеризуется линейным расстоянием между двумя близкими точками, которые еще могут восприниматься раздельно. Наблюдаемый объект располагается вблизи переднего фокуса объектива. В плоскости, геометрически сопряженной объекту, располагается его увеличенное изображение, которое рассматривается глазом через окуляр. Изображение каждой точки оказывается размытым вследствие дифракции света.

Пределом разрешения Z называется наименьшее расстояние между двумя точками объекта, когда эти точки разрешимы, т.е. воспринимаются не сливающимися друг с другом. Впервые предел разрешения объектива микроскопа был определен немецким физиком Германом Гельмгольцем в 1874 г. Формула Гельмгольца имеет вид:

$$Z \approx \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

где λ – длина волны света, освещающего предмет;

n – показатель преломления среды между объективом и предметом;

α – апертурный угол объектива, равный половине угла между крайними лучами конического светового пучка, входящего в объектив микроскопа.

Разрешающей способностью называется величина, обратная пределу разрешения.

Величина $A = n \cdot \sin \alpha$ называется числовой апертурой объектива и указывается на нем рядом с указанием увеличения. При освещении объекта белым светом длину волны λ принимают равной 0,555 мкм, т.к. глаз наиболее к ней чувствителен.

Рассмотрим **пример**: числовая апертура объектива микроскопа равна 0,2. Предел разрешения, достигаемый с помощью этого объектива, равен $Z = \frac{0,61 \cdot 0,555 \text{ мкм}}{0,2} = 1,69 \text{ мкм}$, а

разрешающая способность микроскопа с этим объективом $\frac{1}{1,69 \text{ мкм}} = 0,59 \text{ мкм}^{-1} = 590 \text{ мм}^{-1}$, т.е. 590 точек (штрихов) на миллиметр.

Из формулы (4) видно, что предел разрешения микроскопа может быть уменьшен, если увеличить показатель преломления n среды между объективом и предметом. С этой целью между объективом и покровным стеклом помещают слой жидкости: воды, специального масла, показатели преломления которых в 1,3–1,5 раза больше, чем у воздуха. Используемая для таких целей жидкость называется иммерсией, а объективы, числовая апертура которых рассчитана с учетом иммерсии – иммерсионными. В качестве иммерсионной жидкости для объективов водной иммерсии используют дистиллированную воду, а для объективов масляной иммерсии – кедровое масло или специальное синтетическое иммерсионное масло. Использование синтетического иммерсионного масла предпочтительнее, поскольку его параметры более точно нормируются, и оно в отличие от кедрового, не засыхает на поверхности фронтальной линзы объектива. Для объективов, работающих в ультрафиолетовой области спектра, в качестве иммерсионной жидкости используют глицерин. Ни в коем случае нельзя пользоваться суррогатами иммерсионного масла и, в частности, вазелиновым маслом.

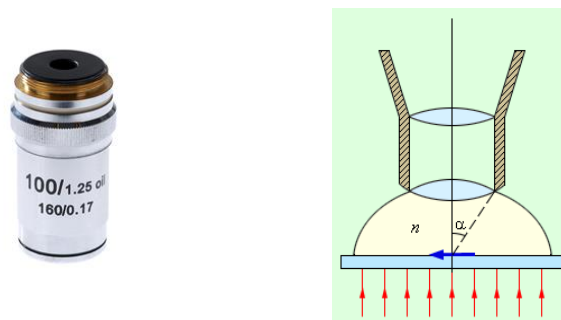


Рис. 2. Общий вид и оптическая схема работы иммерсионного объектива

У хороших микроскопов апертурный угол α близок к своему пределу: $\alpha \approx \pi/2$. Как видно из формулы Гельмгольца, применение иммерсии несколько улучшает предел разрешения. Полагая для оценок $n \approx 1,5$ и $\sin \alpha \approx 1$, получим:

$$Z_{\min} \approx 0,4\lambda$$

Таким образом, с помощью оптического микроскопа принципиально невозможно рассмотреть какие-либо детали, размер которых значительно меньше длины света. Волновые свойства света определяют предел качества изображения объекта, полученного с помощью любой оптической системы.

Устройство микроскопа

Микроскопы типов «Биолам» (рис. 3) и «Premiere» (рис. 4) конструктивно отличаются весьма незначительно. Основные узлы микроскопа указаны на рис. 3. К микроскопу может быть подключена камера для сопряжения с компьютером (рис. 4) и использована специальная компьютерная программа для наблюдения и определения размеров наблюдаемых объектов.



Рис. 3. Основные узлы микроскопа «Биолам»



Рис. 4. Микроскоп «Premiere» и usb камера, вставляемая вместо окуляра

Приставка для наблюдения в отраженном свете.

Для наблюдения непрозрачных объектов микроскопы могут снабжаться приставками для наблюдения в отраженном свете (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид и принципиальная оптическая схема микроскопа с осветителем: 1 – глаз наблюдателя; 2 – окуляр; 3 – рассматриваемый объект; 3' – образуемое окуляром мнимое перевернутое изображение объекта, лучи от которого, проходя через оптические системы глаза наблюдателя, создают на сетчатке глаза действительное изображение объекта; 3'' – перевернутое и увеличенное действительное изображение объекта; 4 – объектив; 5 – конденсор, концентрирующий на объекте пучок света, отражающегося от зеркала; 6 – апертурная диафрагма; 7 – зеркало; 8 – полевая диафрагма; 9 – линза-коллектор осветителя; 10 – источник света; 11 – предметное стекло, на котором располагают рассматриваемый объект; D – расстояние наилучшего видения; стрелками показан ход лучей в оптической системе микроскопа.

Метод повышения контрастности изображения (метод темного поля).

Метод исследования в темном поле впервые был предложен австрийскими учеными Р. Зигмонди и Р. Зидентопфом в 1903 году и подходит для рассеивающих свет объектов.

В основе метода лежит освещение препарата полым конусом света, внутренняя апертура которого превосходит числовую апертуру применяемого объектива. Поскольку ни один прямой луч от осветителя в объектив попасть не может, при отсутствии объекта поле зрения микроскопа будет темным. Объект, помещенный на предметный столик, будет рассеивать свет во все стороны, в том числе и в сторону объектива, благодаря чему на темном фоне будет видно контрастное изображение объекта.

В микроскопе проходящего света тип освещения создается посредством кольцевой диафрагмы в конденсоре (рис. 6). В случае, когда в исследованиях используется объектив с высокой числовой апертурой, есть вероятность, что часть света все же будет попадать в объектив. По этой причине используются специализированные объективы, имеющие встроенную внутреннюю ирисовую диафрагму, которая позволяет уменьшать эффективное значение числовой апертуры до величины, достаточной для наблюдения в темном поле.

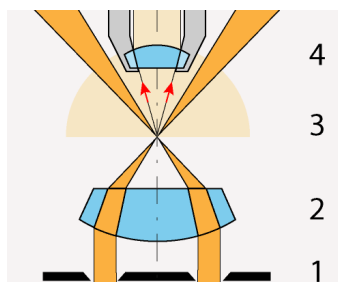


Рис. 6. Освещение препарата в методе темного поля. 1 – кольцевая диафрагма, 2 – конденсор, 3 – образец, 4 – объектив

Конденсор «темного поля» вставляется в гильзу осветительного столика микроскопа вместо обычного конденсора. На верхнюю линзу конденсора наносится капля иммерсионной жидкости. Конденсор поднимают вверх, пока капля иммерсии не коснется предметного столика и не распространится по нему. После фокусировки микроскопа на объекте в поле зрения должен наблюдаться эффект темного поля (ярко светящиеся частицы объекта на темном фоне). Кроме конденсора темного поля для таких же целей используется фазово-контрастное устройство.

Объект-микрометр.

Объект-микрометр предназначен для измерения линейных размеров объектов и выполнения иных расчетов, основанных на измерении и обработке линейных размеров в поле зрения микроскопа. В цифровых микроскопах объект-микрометр применяется для проведения калибровки цифровой системы визуализации микроскопа для последующего автоматического измерения расстояний. Цифровая система визуализации микроскопа состоит из программного обеспечения (ПО) и цифровой камеры. Чтобы в ПО появилась возможность измерения и анализа изображений, необходимо определить *коэффициент* пересчета размера микрообъекта, измеренного в условных единицах «Пиксель» (разрешение цифровой камеры) в размеры метрической системы СИ (мкм, нм или мм).



Рис. 7. Внешний вид и шкала объект-микрометра

Предметные и покровные стекла.

Объективы микроскопов рассчитаны на стандартную толщину покровных стекол: 0,17 мм, толщина предметных стекол: 0,8-1,2 мм.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Произвести с помощью микроскопа измерения диаметра и площади поперечного сечения не менее 50 сферических тел, пользуясь двумя объективами. Построить гистограммы распределения частиц по диаметрам и площадям поперечного сечения.

Задание 1 (теоретическое).

Запишите данные микроскопа в таблицу 1. Вычислите его увеличение для указанных окуляров, разрешающую способность и предел разрешения для каждой пары объектив-окуляр.

Таблица 1.

Окуляр	Общее увеличение микроскопа		
	Объектив 4 ^x 0,10	Объектив 10 ^x 0,25	Объектив 40 ^x 0,65
7 ^x			
10 ^x			
15 ^x			
Предел разрешения, мкм			
Разрешающая способность, мм ⁻¹			

Задание 2.

Ознакомьтесь с предложенным вам микроскопом и подготовьте его к работе в проходящем свете. На компьютере запустите программу «View7».

Выберите один из объективов, установите на предметный столик объект-микрометр (рис.7). Добейтесь резкого изображения шкалы калибровочного объект-микрометра, отрегулировав фокусное расстояние и положение предметного столика с помощью регулировок микроскопа. Получите на экране монитора контрастное изображение шкалы объект-микрометра, сохраните его, затем произведите калибровку (Calibrate). Калибровку необходимо проводить для каждого используемого объектива.

Произведите исследование распределения по размерам шариков предложенного вам препарата. Получите несколько контрастных изображений объекта и сохраните их. Затем помощью команды «Circle» произведите измерения диаметров не менее 50 шариков (используйте при необходимости несколько файлов). Данные диаметров автоматически записываются в таблицы, которые можно конвертировать в Excel (Table→конвертировать). При дальнейшей работе в Excel необходимо заменить десятичный разделитель точку на запятую.

По полученным данным необходимо построить гистограмму распределения шариков по размерам. Для этого необходимо:

- определить диаметр самого маленького и самого большого из шариков (используйте команды МИН() и МАКС()).
- разбить полученный интервал значений на 8 – 10 одинаковых участков (*например: диаметр самого маленького шарика 0,02 мм, а самого большого 0,2 мм – целесообразно разбить интервал на десять равных участков (бинов) с шириной 0,02 мм*).
- рассортировать результаты ваших измерений по бинам. Для этого необходимо посчитать количества измерений, результаты которых попали в каждый бин, а затем для каждого бина рассчитать отношение числа попаданий в данный бин к общему числу измерений N_i/N (эта величина называется вероятностью попадания результата в данный бин).
- построить по результатам измерений гистограмму распределения по размерам. Для этого по оси абсцисс отложить значения границ бинов, а по оси ординат – значения N_i/N для каждого бина. В результате должна получиться гистограмма, приблизительный вид которой изображен на рис. 8.

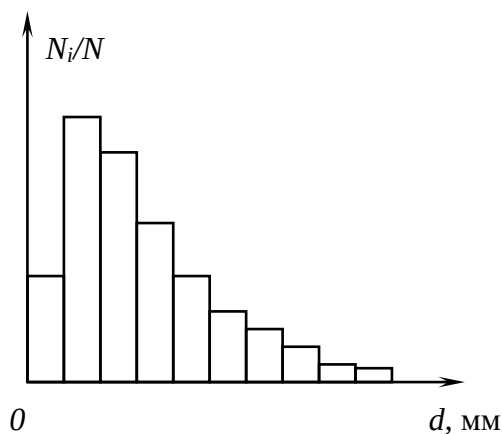


Рис. 8

Гистограмму можно построить автоматически в Excel, для этого необходимо воспользоваться вкладкой Данные – Анализ данных – Гистограмма. Укажите входные данные (диаметры шариков) и интервал карманов (бины), поставьте галочку для вывода графика.

Результаты работы оформите в виде таблиц 2 и 3 и гистограммы, аналогичной приведенной на рис. 8.

Таблица 2.

№	Диаметр d , мм	№	Диаметр d , мм	№	Диаметр d , мм	№	Диаметр d , мм	№	Диаметр d , мм
1		11		21		31		41	
2		12		22		32		42	
...		...		...		...		...	

Таблица 3.

№ бина	Границы бина	Число попаданий в бин N_i	Вероятность попадания N_i/N
1	[.....]		
2	[.....]		
...	[.....]		

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

14. Опишите принцип работы оптического микроскопа.
15. Назовите основные узлы оптического микроскопа.
16. Как определить увеличение микроскопа?
17. Что такое разрешающая способность и предел разрешения? Чем они определяются?
18. Почему не производятся оптические микроскопы с увеличением более $2000\times$?
19. Для каких целей применяется метод наблюдения в отраженном свете?
20. Как измерить при помощи микроскопа размеры малых тел?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить принципы и освоить некоторые методы измерения температуры.

Оборудование: термopapa, термометр сопротивления, терморезисторы, мультиметры, термометр, кювета с водой, термостат.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Температура в быденном понимании характеризует степень нагретости тела. Строгое определение температуры дается в рамках молекулярно-кинетической теории, где под температурой понимают меру средней кинетической энергии поступательного движения

молекул газа: $\frac{3}{2}kT = \frac{m\langle v \rangle^2}{2}$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Понятно,

что измеренная температура относится к огромному числу молекул и даёт представление об их средней кинетической энергии. Понятие температуры применимо, таким образом, только к массиву молекул, поэтому температура является макроскопическим параметром.

Измерение температуры обычно производится косвенным путем, т.е. не сводится к измерению кинетической энергии молекул. Оно основывается на измерении некоторых физических параметров, зависящих от температуры. К параметрам предъявляются следующие требования: выбранный параметр должен существенно, непрерывно, однозначно и желательно несложным образом изменяться с температурой; величину этого параметра можно легко, надежно и с высокой точностью измерять простыми средствами; измерение величины параметра не должно вносить значительных изменений в температурный режим измеряемой среды. Список таких наиболее удобных термометрических параметров имеет следующий вид:

- объем тела (эффект теплового расширения $V = V_0(1 + \alpha t)$, жидкостные и газовые термометры);
- электрическое сопротивление (зависимость сопротивления от температуры, металлические термометры сопротивления и полупроводниковые терморезисторы);
- термоЭДС (эффект Зеебека, термопары);
- линейные размеры (линейное тепловое расширение, биметаллические термометры);
- спектр излучения тела (энергетическая светимость, спектральный состав, радиационный, яркостный и цветовой пирометры).

Применяются также зависимость скорости распространения звука от температуры, показателя преломления света с веществом и многие другие параметры.

К важнейшим принципам термометрии относится строгое соблюдение следующего условия – термометрическое тело и среда должны войти в состояние теплового равновесия. Поэтому очень важно, чтобы тепловая «инерционность» измерительного прибора была незначительной (он скорее примет температуру измеряемой среды), а собственная теплоемкость – минимальной (он не внесет искажений в состояние среды).

В отдельных случаях, при точных и локальных измерениях, геометрические размеры рабочей части термометра должны быть точечными.

Температурные шкалы. В настоящее время применяются несколько температурных шкал, отличающихся выбором опорных (реперных) точек. В шкале Цельсия (Андерс Цельсий (1701-1744) шведский астроном и физик) интервал между точкой плавления льда и точкой кипения воды при нормальном атмосферном давлении делится на сто равных долей – градусов Цельсия (°C). В шкале Фаренгейта температура смеси льда и соли (32 °F), а точка кипения воды принимается за 212 градусов (°F). При этом один градус Фаренгейта равен 1/180 разности этих температур.

Связь между температурными шкалами Цельсия и Фаренгейта:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32); \quad T_F = 32 + \frac{9}{5}T_C.$$

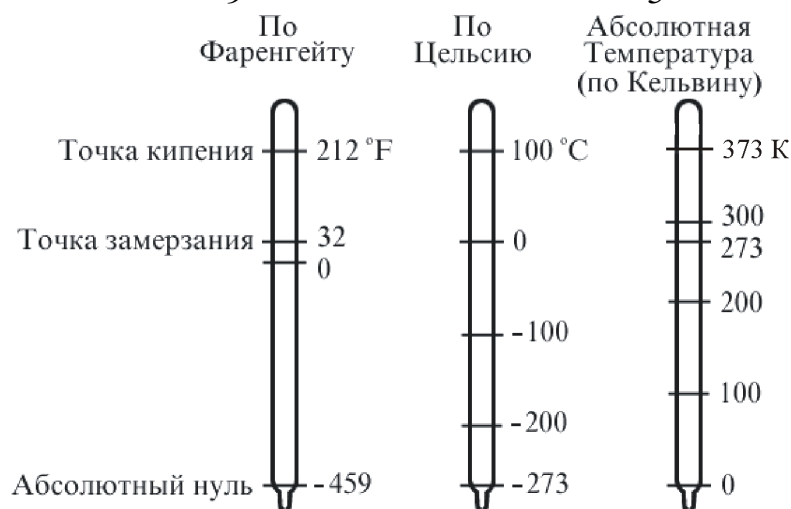


Рис. 1. Сравнение температурных шкал.

Третья шкала – это наиболее употребляемая в научной литературе абсолютная шкала температур. Физический смысл нулевой температуры в этой шкале – полное отсутствие молекулярного движения.

Газовые термометры.

Наиболее строго требованию линейной и существенной зависимости от температуры отвечают параметры идеального газа – объем и давление. Поведение реального газа при небольших давлениях и достаточно высоких температурах почти не отличается от газа идеального. По этой причине газовые термометры используются как эталонные, по ним градуируют и проверяют другие термометры.

Простейший газовый термометр, может представлять собой запаянную с одной стороны стеклянную трубку, в которой некоторая масса газа отделена от атмосферы каплей ртути (рис. 2).

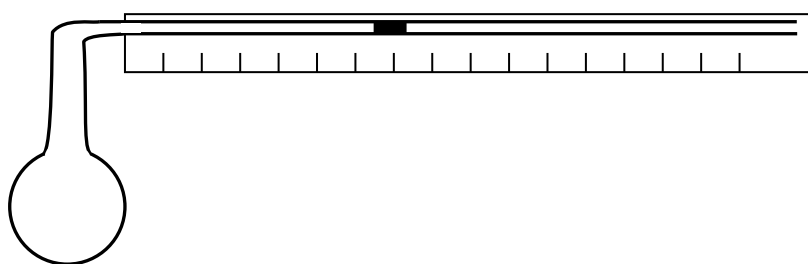
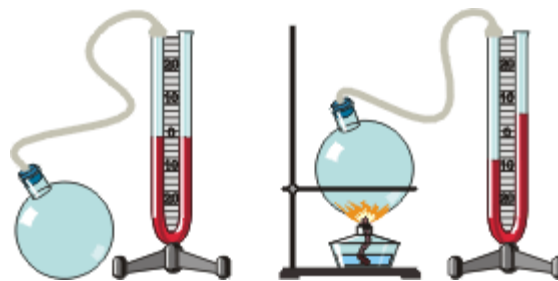


Рис. 2. Принципиальное устройство газового термометра

При нагревании газ расширяется, а его давление остается равным атмосферному. В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона объем и температура находятся в соотношении $V = \frac{mR}{Mp}T$. Для любого конкретного термометра численный коэффициент

при температуре является постоянным и зависит только от атмосферного давления.

Капельку ртути в газовом термометре можно заменить на U-образный жидкостный манометр, тогда температуру в баллоне можно оценить по разности уровней в коленях манометра.



Процедура измерения температуры газовым термометром сводится к тому, что его помещают в исследуемую среду, затем, дождавшись установления равновесия, определяют объем V и по графику $T=f(V)$ определяют температуру.

Жидкостные термометры.

Если ёмкость газового термометра заполнить жидкостью с достаточно большим коэффициентом теплового объемного расширения, то полученный прибор станет жидкостным термометром. В настоящее время такими жидкостями являются ртуть, подкрашенные спирт, толуол, пентан и некоторые другие вещества. Для повышения чувствительности и точности измерений термометр состоит из двух сообщающихся объемов, один из которых содержит основную массу жидкости, а второй служит индикатором изменения объема, для чего ему придается форма цилиндра капиллярных размеров.



Рис. 3. Жидкостные термометры (слева – спиртовой, справа – ртутный).

Жидкостные термометры запаяны с обеих концов, что послужило причиной их широкого распространения. Их показания не зависят от атмосферного давления, в отличие от газовых термометров. К их недостаткам можно отнести нелинейность зависимости объема от температуры, что делает необходимым калибровать их по газовым термометрам. Они отличаются также инерционностью (время вхождения в равновесное состояние со средой около 10 мин), большой собственной теплоемкостью и размерами рабочей части. Диапазон их работы ограничен с одной стороны температурой кристаллизации, с другой – температурой кипения жидкости.

Твердотельные термометры.

Биметаллические термометры используют различие в коэффициентах теплового линейного расширения разных металлов. Скрепленные вместе, как показано на рис. 4, пластинки при изменении температуры изгибаются или закручиваются. Величина деформации зависит от температуры, поэтому снабдив пластины механизмами и шкалами можно снимать прямые показания температуры.

Достоинства биметаллических термометров – простота изготовления, механическая прочность, возможность встраивания в системы автоматики и телемеханики. Недостатки – низкая чувствительность, проявление «усталости» металлов и отсюда – необходимость частой проверки и калибровки по эталонным термометрам.



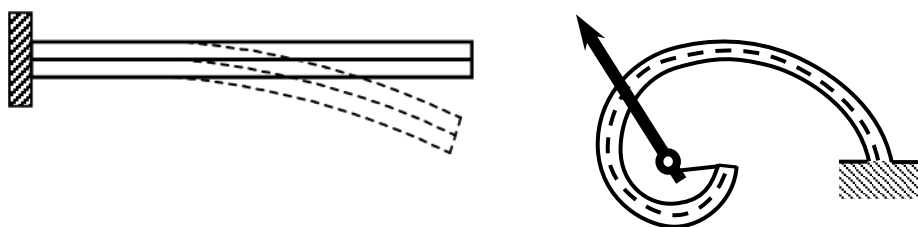


Рис. 4. Внешний вид и принцип работы биметаллических термометров

Устройство, работающее по принципу биметаллического термометра, используется в регуляторах степени нагрева подошвы утюга. В нем биметаллическая пластинка является электрическим контактом. При нагревании до заданной температуры пластинка отгибается и размыкает электрическую цепь – нагрев утюга прекращается. При охлаждении пластинка снова замыкает цепь поддерживая температуру подошвы заданной. Температуру размыкания цепи можно регулировать при помощи винта, находящегося под ручкой утюга.

Термопары – представляют собой два разнородных проводника, соединенных сваркой или пайкой. Металлы должны иметь как можно большую разницу в работе выхода электронов, тогда между ними устанавливается контактная разность потенциалов, величина которой зависит от температуры зоны контакта. Для термопар используют обычно хорошо изученные пары металлов, например, медь – константан, хромель – алюмель, платина – родий и другие.

Для измерения температуры термопарой ее спай вводится в исследуемую среду, разность потенциалов ее свободных концов измеряется каким-либо потенциометром и переводится в градусы посредством градуировочного графика или переводного коэффициента α , получаемого из формулы $\mathcal{E}_{ДС} = \alpha T$.

Для абсолютных измерений термопару калибруют по газовому или иному эталонному термометру. Показание одинарной термопары вообще говоря пропорционально не температуре исследуемого тела, а разности температур тела и окружающей среды, в которой находятся концы проволоочек. Если температура окружающей среды меняется, то это влияет на показание термопары. Значительно чаще применяют дифференциальную термопару. Она представляет собой две одинаковые термопары, включенные навстречу друг другу (рис. 5). Спаи помещают в те места, разность температур которых необходимо измерить. Если спай одной из них поместить в среду с известной и стабильной температурой, например, в тающий лед, то после соответствующей градуировки дифференциальной термопарой можно производить и абсолютные температурные измерения.

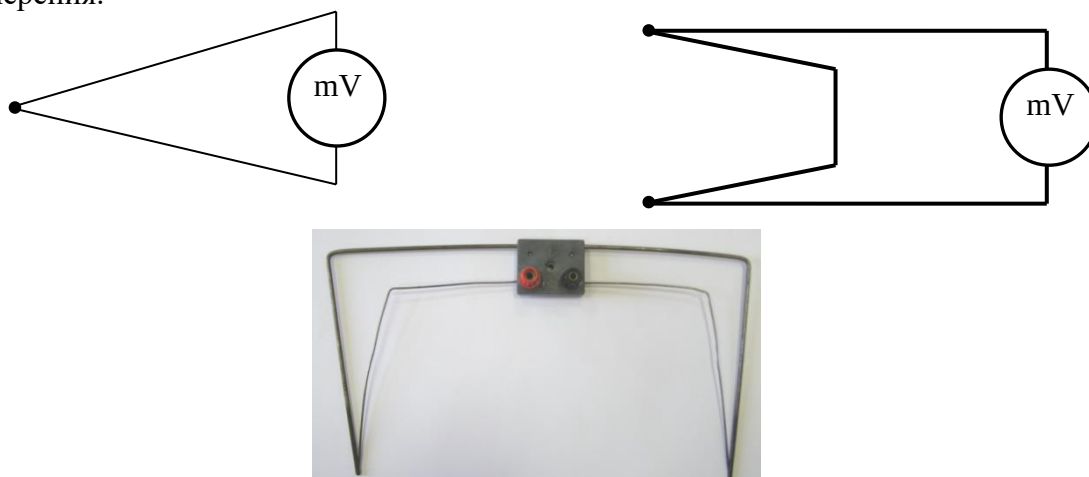


Рис. 5. Устройство и внешний вид термопар

Достоинства термопар – малые, практически, точечные размеры рабочего тела, малая инерционность и теплоемкость, возможность дистанционных измерений, большой диапазон измеряемых температур – от сверхнизких до точки плавления применяемых металлов. Недостаток – для измерений нужен соответствующим образом откалиброванный электроизмерительный прибор (милливольтметр), кроме того зависимость термоЭДС от температуры может носить нелинейный характер, что влияет на точность измерений.

Термометры сопротивления используют свойство чистых металлов, сплавов и полупроводников менять своё сопротивление при изменении температуры. Для металлов это свойство описывается выражением $R = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления данного металла, t – температура по шкале Цельсия. Для металлов величина α равна 0,4-0,6%. Т.е. сопротивление металлов растет с температурой по линейному закону.

Термометры сопротивления уступают термопарам по инерционности, собственной теплоёмкости, размерам. Нелинейность зависимости $R = f(T)$ у них больше, поэтому точность измерения ниже. К достоинствам можно отнести измерительную схему, где за счёт использования внешнего источника можно повысить чувствительность измерений. Как правило измерение производится мостовым методом.

Терморезистор (термистор) – полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры.

Терморезистор был изобретён Самюэлем Рубеном (Samuel Ruben) в 1930 году.

Терморезисторы изготавливаются из материалов с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который обычно на порядки выше, чем ТКС металлов и металлических сплавов.

Большим преимуществом термисторов является разнообразие форм и миниатюрность. Основные конструктивные типы: бусиновые (0,1-1 мм), дисковые (2,5-18 мм), цилиндрические (3-40 мм), пленочное покрытие (толщина 0,2-1 мм). Выпускаются бусиновые термисторы диаметром до 0,07 мм с выводами толщиной 0,01 мм. Такие миниатюрные датчики позволяют измерять температуру внутри кровеносных сосудов или растительных клеток.

По типу зависимости сопротивления от температуры различают терморезисторы с отрицательным (НТС-термисторы, от слов «Negative Temperature Coefficient») и положительным (ПТС-термисторы, от слов «Positive Temperature Coefficient» или **позисторы**) температурным коэффициентом сопротивления. Для позисторов – с ростом температуры растёт их сопротивление; для НТС-термисторов увеличение температуры приводит к падению их сопротивления. На схемах терморезисторы обозначают,

следующим образом: . Основными преимуществами термисторов являются вибропрочность, малый размер, малая инерционность и невысокая цена.

Оптическая термометрия.

В предыдущих разделах описаны термометры, которые осуществляют измерение температуры лишь находясь в тепловом контакте с исследуемым объектом. Бесконтактные (дистанционные) измерения осуществляют, используя известные закономерности теплового излучения нагретых тел. Ограничивающим фактором является то обстоятельство, что датчик должен «видеть» объект. Этим способом нельзя измерить температуру внутри непрозрачного твердого тела, при наличии между датчиком и объектом непрозрачной среды. Первоначально, бесконтактные методы применяли регистрируя видимое тепловое излучение испускаемое объектом, нагретыми до высоких

температур – пламенем, расплавленным металлом. Поэтому соответствующие приборы получили название оптических пирометров (от греческого «пирос» – огонь, пламя).

При наличии теплового движения молекул вещества тело всегда является источником электромагнитного излучения. Интенсивность этого излучения и его спектральный состав связаны с температурой. Для идеализированного абсолютного чёрного тела энергия, излучаемая с единицы поверхности в единицу времени определяется законом Стефана-Больцмана: $R_s = \sigma T^4$, где σ – постоянная величина, T – абсолютная температура. Основанные на этом законе термометры носят название радиационных пирометров (рис. 6).

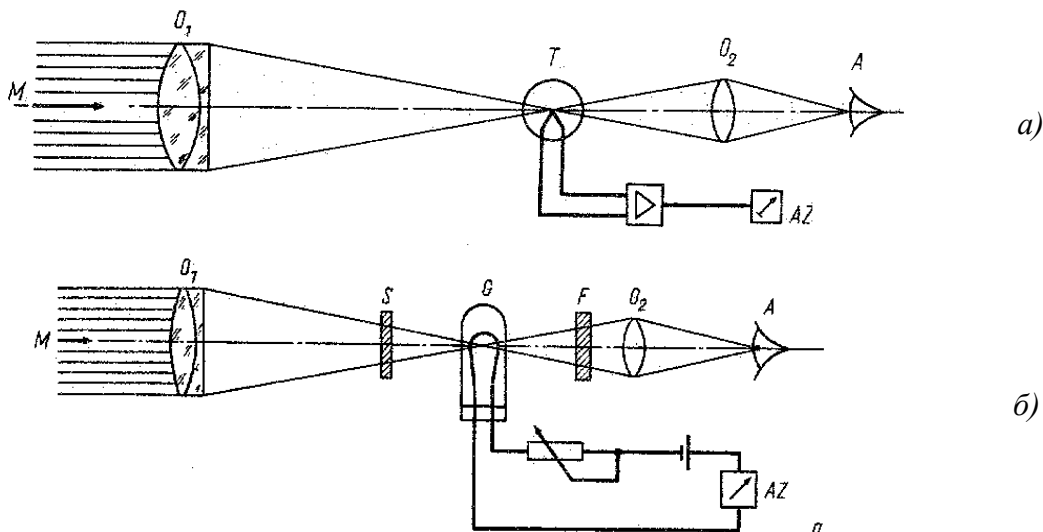


Рис. 6. Пирометры (а – радиационный, б – яркостный).

В радиационных пирометрах регистрируется суммарная энергия излучения со всеми длинами волн, поступающая в объектив пирометра. Величина этой энергии пропорциональна энергетической светимости тела, поэтому температуру тела рассчитывают с использованием закона Стефана-Больцмана. Из-за отличия излучения реального тела от излучения абсолютно черного тела, измеряемая «радиационная температура» T_p всегда меньше истинной температуры тела T :

$$T_p = T \sqrt[4]{\varepsilon_T}$$

Поэтому для введения поправки необходимо знать величину степени черноты тела ε_T .

Принципиальная схема радиационного пирометра показана на рисунке 6а. Светофильтры в пирометре отсутствуют. Пирометр включает термочувствительное устройство Т (например, термопару) на которое с помощью линз объектива О₁ фокусируется излучение исследуемого нагретого тела М. ЭДС термопары измеряют с помощью чувствительного вольтметра АЗ, шкала которого проградуирована в кельвинах по эталону АЧТ. С помощью объектива О₂ пирометр визуально наводят на исследуемый объект.

Измерить величину R технически очень трудно, поэтому более распространены яркостные пирометры, в которых яркость свечения исследуемого тела сравнивается с яркостью тела, температура которого известна. Схематически устройство яркостного пирометра показывает рис. 6б.

Изображение исследуемого нагретого тела М фокусируется объективом О₁ в плоскости, в которой расположена небольшая вольфрамовая лента, являющаяся «нитью накала» пирометрической лампы Г. Изображение тела и вольфрамовая лента на его фоне рассматриваются при значительном увеличении через окуляр О₂ и узкополосный светофильтр Ф. Измеряют электрический ток через ленту, регулируя его до тех пор, пока не будет достигнута одинаковая яркость изображения тела и нагреваемой ленты. Считают,

что при этом достигается равенство температур тела и ленты. Шкала амперметра **AZ** проградуирована в кельвинах по излучению эталона абсолютно черного тела, поэтому к измеренной яркостной температуре добавляют поправку.

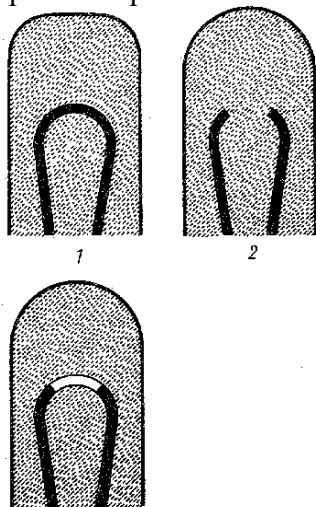


Рис. 7. «Исчезновение нити» в яркостном пирометре.

1 – температура нити (вольфрамовой ленты) слишком низка; 2 – температура нити равна температуре исследуемого тела, часть нити «исчезает»; 3 – температура нити слишком высока.

Стандартный диапазон измерений с помощью пирометра с исчезающей нитью составляет от 650°C до 2500°C . Возможны измерения и при более высоких температурах, для чего в схему прибора вводят поглощающее стекло *S*.

В области высоких температур возможности радиационного и яркостного пирометра практически идентичны, но радиационный пирометр обеспечивает возможность измерений при значительно более низких температурах, до -50°C .

По сравнению с яркостными, радиационные пирометры отличаются большей простотой устройства и меньшей стоимостью. Однако существенным недостатком является большая погрешность измерений, так как «радиационная температура» более чувствительна к отклонениям характеристик реального излучения от законов абсолютно черного тела, чем «яркостная температура».

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Произвести измерения сопротивления металлического проводника (термометра сопротивления), полупроводника (термистора) двух типов РТС, NTC и термоЭДС термопары при различных температурах (не менее 15 измерений для каждого устройства). Используя метод наименьших квадратов, построить графики зависимости сопротивления термометра сопротивления и термоЭДС термопары от температуры. Определить температурный коэффициент сопротивления и температурный коэффициент термопары. Построить графики зависимости сопротивления термисторов от температуры, линеаризовав их. Оформить результаты в виде отчета.

Задание 1.

Температурные шкалы

- Какова температура человеческого тела в шкалах Цельсия, Кельвина и Фаренгейта?
- Сколько градусов Цельсия в одном градусе Фаренгейта?
- Переведите 50°F в градусы Кельвина и Цельсия.

Задание 2.

Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка представлена на рис. 8. Необходимо заполнить кювету водой. Каждое устройство (термометр сопротивления, термисторы и термопара) подключаются к своему измерительному блоку (необходимо проверить измеряемую

величину и ее предел измерения). Измерьте температуру воды и сопротивления всех устройств и ЭДС термопары после этого включите нагреватель и производите измерения через каждые 3-4°C.



Рис. 8. Экспериментальная установка

Градуировка термометра сопротивления, термисторов и термопары.
Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

		Термометр сопротивления	Термистор NTC	Термистор PTC	Термопара
№	t, °C	R, Ом	R, Ом	R, Ом	E, мВ
1					
2					
3					
...					

Термометр сопротивления изготовлен из тонкой медной проволоки (Cu).

Постройте градуировочный график термометра сопротивления, откладывая по горизонтальной оси температуру, а по вертикальной – величину сопротивления. Такой градуировочный график позволяет измерять температуру среды, в которую может быть помещен термометр сопротивления.

По градуировочному графику определите температурный коэффициент сопротивления меди, используя формулу $R = R_0(1 + \alpha t)$.

Градуировка термисторов.

В холодном состоянии сопротивление NTC-термистора приблизительно равно 1 кОм. Проведите измерение сопротивления термисторов, результаты занесите в таблицу 1.

По полученным экспериментальным точкам постройте градуировочные кривые. Следует учитывать, что зависимость сопротивления термисторов от температуры имеет нелинейный характер и соединять точки следует не прямой линией, а плавной кривой, похожей на экспоненту.

Градуировка термопары.

В работе используется хромель–алюмелевая дифференциальная термопара. Укрепите термопару на штативе таким образом, чтобы один ее спай находился в нагреваемом сосуде, а другой в среде с известной температурой. Обычно «холодный» спай термопары погружается в тающий лёд и выполненная в этом случае градуировка является «стандартной», т.е. полученной в строго определенных условиях. Она позволяет определять температуру в градусах Цельсия, начиная с 0 °C. Можно поместить

«холодный» спай в воду комнатной температуры и, строго говоря, полученная градуировка будет справедлива только при данной комнатной температуре. В этом случае термоЭДС термопары будет пропорциональна не температуре «горячего» спаива в градусах Цельсия, а разности температур «горячего» и «холодного» спаев.

После проведения градуировки термопары, определите термоЭДС вашего тела, зажав спай термопары пальцами. Затем из построенного графика определите температуру вашего тела.

График зависимости проведите таким образом, чтобы он наилучшим образом проходил между экспериментальными точками. Для этого необходимо воспользоваться методом наименьших квадратов, который позволяет определить вид функциональной зависимости между экспериментально измеренными физическими величинами. Такая процедура носит название аппроксимации. (См. Приложение)

Тангенс угла наклона графика есть удельная термоЭДС хромель-алюмелевой термопары $\alpha = \Delta E / \Delta t$ (мВ/град), которая численно равняется параметру α . В данном случае в качестве переменной x будет выступать температура (или разность температур между исследуемым телом и окружающим воздухом, если «холодный» спай находится при комнатной температуре), а в качестве переменной y выступает значение термоЭДС. Для расчетов по методу наименьших квадратов заполните таблицу 2:

Таблица 2.

Температура второго спаива $t_1 = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$

№	$t, ^\circ\text{C}$	$t - t_1, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ мВ}$	$(t - t_1)^2$	$(t - t_1) \cdot E$	a	b
1							
2							
...							
N							
		$\sum_1^n (t - t_1)_k =$	$\sum_1^n E_k =$	$\sum_1^n ((t - t_1)_k)^2 =$	$\sum_1^n ((t - t_1)_k) \cdot E_k =$		

Постройте на одном графике экспериментальные точки и прямую, полученную методом наименьших квадратов. Сделайте вывод о достоверности такой аппроксимации. Определите удельную термоЭДС термопары.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что характеризует температура? Каковы основные принципы термометрии?
2. Опишите принцип построения известных вам температурных шкал?
3. Опишите устройство газового термометра?
4. Опишите устройство жидкостных термометров? Каковы их достоинства и недостатки?
5. Каков принцип действия твердотельных термометров?
6. Как использовать термопары и терморезисторы для измерения температуры?
7. Как производится градуировка термопар?
8. Для чего нужен метод наименьших квадратов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. ТОЧНОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ

Цель работы: изучить основные приемы точного взвешивания на технических и электронных весах. Освоить некоторые способы определения плотности жидкостей и твердых тел.

Оборудование: технические весы, электронные весы, разновес, пинцет, пикнометр, жидкости для определения плотности, взвешиваемые тела, другие принадлежности.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Весы – устройство или прибор для определения массы тел (взвешивания) по действующему на них весу, приближённо считая его равным силе тяжести. Вес тела может быть определён как через сравнение с весом эталонной массы (в рычажных весах), так и через измерение этой силы через другие физические величины.

Основные параметры весов.

- **Наибольший предел взвешивания (НПВ)** – верхняя граница предела взвешивания, определяющая наибольшую массу, измеряемую при одноразовом взвешивании.
- **Наименьший предел взвешивания (НмПВ)** – нижняя граница предела взвешивания, определяется минимальным грузом, при одноразовом взвешивании которого относительная погрешность взвешивания не должна превышать допустимого значения.
- **Чувствительность** – это наименьшая масса, которая, будучи нагружена на платформу весов будет зарегистрирована измерительным датчиком весов. Для рычажных весов **чувствительность δ** – это отношение угла отклонения стрелки $\Delta\alpha$ к величине нагрузки на чашке Δp :

$$\delta = \frac{\Delta\alpha}{\Delta p}$$

(отклонение и перегрузок предполагаются малыми). Чувствительность показывает на какой угол поворачивается коромысло весов при перегрузке в единицу веса.

- **Цена деления d** (величина обратная чувствительности) – разность значений массы, соответствующих двум соседним отметкам шкалы весов с аналоговым отсчётным устройством, или значение массы, соответствующее дискретности отсчёта цифровых весов.

По принципу действия весы можно разделить на:

- рычажные (основаны на принципе рычага);
- пружинные (основаны на законе Гука, например, ручные пружинные весы);
- тензометрические (основаны на преобразовании деформации тензодатчика);
- гидростатические (основаны на действии архимедовой силы, применяются для измерения плотностей тел);
- гидравлические.

По точности взвешивания:

- специального класса точности (аналитические – в аналитической химии);
- высокого класса точности (лабораторные);
- среднего класса точности.

По виду уравновешивающего устройства:

- электромеханические (электронные);
- механические.

Возможные источники погрешностей механических весов:

- Погрешность, вызванная неравноплечностью весов;

- Погрешность, вызванная износом призм и подушек. В ходе жизненного цикла весов увеличивается радиус закругления призм коромысла. При изменении положения коромысла призмы "катятся" по подушкам и изменяется длина плеч. Вследствие этого изменяется цена деления и появляется нелинейность при отсчете по оптической шкале.
- Неисправность арретира, загрязнения и грубые дефекты (сколы, выкрашивания) призм и подушек приводят к плохой воспроизводимости измерений.
- Строго говоря, изготовить совершенно равноплечные весы без погрешностей отсчета по оптической шкале невозможно, поэтому при необходимости особо точной работы на таких весах следует применять методы точного взвешивания.

Некоторые возможные источники погрешности электронных весов:

- Зависимость показаний от положения груза на чашке;
- Потoki воздуха, даже самые слабые, могут повлиять на результаты взвешивания;
- Трение между движущимися частями весов;
- Весы могут быть не откалиброваны калибровочными гирями;
- Механическая деформация деталей из-за перепадов температуры;
- Весы, установленные не по горизонтальному уровню или на мягкую поверхность (ковёр или резиновое покрытие).

Технические весы.

Весы технические (рис. 1) представляют собой равноплечий рычаг первого рода. Равноплечее коромысло 2 (изготовлено из сплавов меди, алюминия или стали) с симметричными плечами, может быть сплошным или с вырезами для уменьшения его веса; в коромысле вмонтированы три призмы: одна опорная 1 и две грузоприемные 3. Острия призм находятся в одной плоскости на одинаковых расстояниях одно от другого, причем острие опорной призмы, повернутое на подушку 20, укрепленной на верхнем конце стержня арретира 19. Стержень арретира располагается внутри колонки 18 и вертикально перемещается от эксцентрированного механизма. На острия грузоподъемных призм (повернутых острием вниз) подвешены серьги 6 с дужками 7 и находящимися на них съемными чашками 10. Весы снабжены регуляторами равновесия 4, стрелкой 8 и шкалой 9 для определения равновесия и чувствительности весов. Отвес 12 и указатель отвеса 13 (или пузырьковый уровень) служат для определения горизонтального положения весов. Кронштейн 5 обеспечивает поддержание коромысла в нерабочем состоянии при опущенном арретире, а ручка арретира 14 – плавную нагрузку весов и разгрузку призм в нерабочем состоянии. Весы монтируются на подставке 11. Внизу к подставке прикреплены вращающиеся подвижные ножки 16 со звездчатыми контргайками 17, которые служат для установки весов в горизонтальном положении.

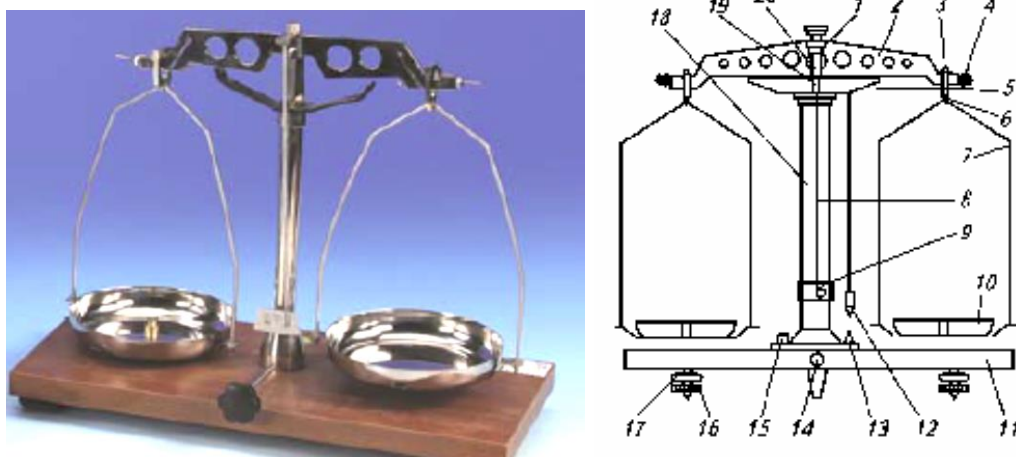


Рис. 1. Внешний вид и устройство технических весов.

Разновес

Наборы гирь для определённых весов называются разновесом. В зависимости от максимальной и минимальной массы, взвешиваемой на весах, разновес может состоять из большего или меньшего числа элементов.

Наборы гирь (разновесы) выпускают разных классов точности. Они подлежат обязательной сертификации и первичной и периодической поверке органами метрологического контроля. Для образцовых и аналитических гирей особое значение имеет материал, применяемый для их изготовления. Для того чтобы гири не изменяли своей массы, необходимо, чтобы материалы для них были:

- антимагнитными – для исключения влияния магнитных полей на результат взвешивания;
- устойчивыми к действию коррозии;
- стойкими к износу в процессе эксплуатации;
- плотными по строению, во избежание поглощения пара, газов и влаги.

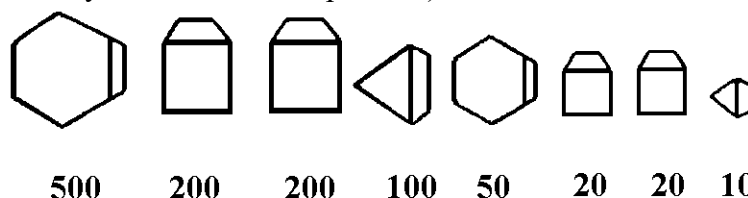
Допускаемая погрешность гирь при выпуске с завода имеет знак «+», в предположении о постепенном износе гирь. По допустимой погрешности наборы гирь делятся на пять классов точности. В таблице 1 приведены допустимые погрешности школьного набора гирь 4-го класса точности.

Таблица 1.

Номинальное значение, г	100	50	20	10	5	2	1
Допустимое отклонение, мг	+40	+30	+20	+12	+8	+6	+4
Номинальное значение, мг	500	200	100	50	20	10	5
Допустимое отклонение, мг	+3	+2	+1	+1	+1	+1	+1

Как видно из таблицы, относительные погрешности гирь, весом более 200 мг, меньше одного процента. Поэтому погрешности гирь можно не учитывать, но при этом желательно не производить взвешивание с помощью таких гирь тел, вес которых меньше 200 мг. Это относится и к весам с механизированной сменой разновесов.

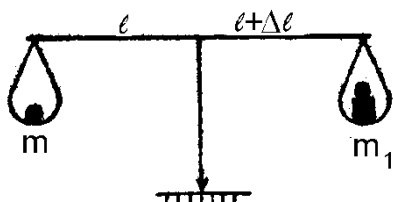
Для удобства определения масс миллиграммовых разновесов их изготавливают различной формы (массы указаны в миллиграммах):



Методы взвешивания.

Теория предполагает идеальную жесткость и точное равенство плеч коромысла, чего практически добиться невозможно. Существует ряд методов взвешивания, позволяющих избежать связанных с этим ошибок.

1. **Метод двойного взвешивания.** Даже при совпадении точки равновесия нагруженных весов с нулевой точкой масса гирь равняется массе взвешиваемого груза лишь в том случае, когда длины плеч коромысла весов одинаковы. Если при отсутствии грузов на чашках весы не находятся в равновесии, то на первый взгляд производить измерение на таких весах невозможно, однако это не так. Разумеется, однократное взвешивание на таких весах всегда будет давать значение массы груза, отличающееся от реального. Одним из специальных методов, позволяющих производить измерение на неуравновешенных весах является метод двойного взвешивания, предложенный в XVIII в. немецким физиком Карлом Гауссом.



Суть его в следующем. Пусть левое плечо весов короче правого. Если в левую чашку весов положить груз, точная масса которого m , то масса гирь, уравнивающих его, составит m_1 , так, чтобы выполнялось равенство моментов:

$$\begin{array}{cc} \text{левая чашка} & \text{правая чашка} \\ mg \cdot l & = m_1 g \cdot (l + \Delta l) \end{array}$$

Если груз и гири поменять местами, то масса гирь уже будет другой, например, m_2 . Равенство моментов запишется уже так:

$$\begin{array}{cc} \text{левая чашка} & \text{правая чашка} \\ m_2 g \cdot l & = mg \cdot (l + \Delta l) \end{array}$$

Итак, груз слева:

$$\begin{array}{cc} \text{груз} & \text{гири} \\ mg \cdot l & = m_1 g \cdot (l + \Delta l) \end{array}$$

Груз справа:

$$\begin{array}{cc} \text{груз} & \text{гири} \\ mg \cdot (l + \Delta l) & = m_2 g \cdot l \end{array}$$

Сократив g и перемножив равенства почленно, получаем:

$$m^2 l(l + \Delta l) = m_1 m_2 l(l + \Delta l), \text{ или } m^2 = m_1 m_2.$$

Отсюда масса груза m найдется как среднее геометрическое из масс гирь.

$$m = \sqrt{m_1 m_2}$$

Окончательно масса груза записывается так:

$$m = \sqrt{m_1 m_2} \pm \Delta m.$$

Здесь Δm – погрешность взвешивания. Полагаем ее равной цене делений шкалы весов.

2. **Метод тарирования.** Тело, вес которого определяется, помещается на одну чашку весов и уравнивается гирями или грузом, положенным на другую чашку. Если теперь снять тело, а на его место положить разновески до восстановления равновесия весов, то, очевидно, их вес будет равен весу тела.

3. **Метод постоянной нагрузки (метод Менделеева).** На одну чашку весов (например, левую) помещается некоторая стандартная выбранная раз и навсегда гиря, вес которой заведомо больше веса взвешиваемого тела, а на другую – разновески, которыми добиваются возможно более точного равновесия весов. Затем на ту чашку, на которой находятся разновески, помещают взвешиваемое тело, а разновески снимают до тех пор, пока равновесие весов не будет восстановлено. Вес снятых гирь, очевидно, равен весу тела.

Определение плотности жидкости пикнометром.

Пикнометр представляет собой стеклянную колбу вполне известного объема. На пикнометрах заводского изготовления указан его объем. Роль пикнометра, в принципе, может выполнять любой небольшой сосуд, даже если его объем заранее неизвестен. Наполняя его последовательно исследуемой жидкостью и жидкостью с известной плотностью, а затем взвешивая, можно определить плотность жидкости. Пусть масса пустого пикнометра равна m_0 , а масса пикнометра с водой – m_1 . Тогда внутренний объем пикнометра равен $V = (m_1 - m_0) / \rho_0$, где ρ_0 – плотность воды.

Далее, пусть масса пикнометра с исследуемой жидкостью – m_2 . Тогда масса этой жидкости равна $m = (m_2 - m_0)$, а ее плотность

$$\rho_1 = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \rho_0 \quad (1)$$

Пикнометры изготавливают почти исключительно из стекла. Наиболее простым является пикнометр в форме колбочки с притертой пробкой. Он заполняется с помощью пипетки или шприца до уровня, указанного на его горлышке. Уровень берется по нижнему краю мениска. При наполнении нужно следить за тем, чтобы внутри пикнометра не оставалось пузырьков воздуха, для чего лучше всего заставлять жидкость стекать в пикнометр по его стенкам. После этого пикнометр должен быть тщательно высушен снаружи при помощи фильтровальной бумаги. Приведенная выше формула (1) дает так называемую *непоправленную плотность жидкости*, так как в ней не учитываются кажущиеся потери веса в воздухе (вследствие действия силы Архимеда). Полученное значение плотности может быть уточнено по формуле

$$\rho = \rho_1 \left(1 - \frac{\lambda}{\rho_0} \right) + \lambda \quad (2)$$

где ρ – истинная плотность жидкости, λ – плотность воздуха, которая принимается равной 0,0012 г/см³. Плотность воды берется из таблиц в зависимости от температуры. При температуре 18-20°C ее можно принять равной 0,9986 г/см³.

Определение плотности жидкостей и твердых тел гидростатическим взвешиванием.

Принцип гидростатического взвешивания состоит в следующем. Небольшое тело произвольной формы из алюминия, нержавеющей стали (в классическом варианте – баллончик с ртутью) подвешивают на тонкой нити или проволочке к коромыслу весов и сначала взвешивают в воздухе, определяя массу тела m_1 . Затем тело полностью погружают в воду и снова взвешивают. В результате действия силы Архимеда вес тела уменьшается, что позволяет вычислить объем тела $V = (m_1 - m_2) / \rho_0$, где ρ_0 – плотность воды при данной температуре. Третье взвешивание производят, полностью погрузив тело в исследуемую жидкость. Тогда непоправленную плотность жидкости можно найти по формуле:

$$\rho_1 = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (3)$$

Исправленная величина плотности:

$$\rho = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} (\rho_0 - \lambda) + \lambda \quad (4)$$

где $\lambda = 0,0012$ г/см³ – плотность воздуха.

Обратим внимание на то, что в числителе и знаменателе формулы (3) стоит разность масс. Это позволяет определять плотность жидкости методом гидростатического взвешивания даже не определяя абсолютные значения масс, например, при сбите нуле весов.

Методом гидростатического взвешивания можно определять не только плотности жидкостей, но и плотности твердых тел. Для этого необходимо взвесить тело в воздухе и в жидкости с известной плотностью ρ_0 (например, в дистиллированной воде). Вес тела в воздухе и в жидкости будет отличаться за счет действия архимедовой силы:

$$P_1 - P_0 = \rho_0 g V \quad (5)$$

Вес тела в воздухе P_0 и жидкости P_1 будем оценивать по массе разновесов, необходимых для уравнивания весов. Считая плечи весов одинаковыми, вес тела можно считать равным силе тяжести, действующей на чашку с разновесами:

$$m_1 g - m_0 g = \rho_0 g V \quad (6)$$

$$m_0 - m_1 = \rho_0 \frac{m_0}{\rho} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{m_0}{m_0 - m_1} \rho_0 \quad (8)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Правила пользования техническими весами.

1. Ознакомьтесь с конструкцией весов.
2. При помощи установочных винтов выровняйте положение весов, контролируя его по уровню.
3. Не взвешивайте на весах слишком тяжелых тел, превышающих предельно допустимую нагрузку весов.
4. При взвешивании тело помещают на левую чашку весов, а разновески – на правую.
5. Изменять нагрузку на весах разрешается только при арретированных весах.
6. Арретирование весов и освобождение от арретира нужно производить плавно, без толчков.
7. Брать разновески следует в следующем порядке: начинать с гири, приблизительно одинаковой с массой взвешиваемого тела. Если масса будет больше массы тела, то следует заменить ее ближайшей меньшей гирей с разновесами пока равновесие не будет достигнуто. При грубом несовпадении веса гири и веса тела неуравновешенность весов обнаруживается уже в самом начале отпускания арретира. Нельзя допускать резкого отклонения весов в ту или другую сторону.
8. После окончания работы нужно немедленно арретировать и разгрузить весы. Ни в коем случае нельзя оставлять неарретированные весы под нагрузкой.

Задание 1.

Взвешивание тел на технических и электронных весах.

а) Взвесьте выданные тела методом прямого взвешивания, т.е. положив тело на левую чашку весов, а разновески накладывая на правую.

б) Взвесьте выданные тела на электронных весах.

в) Определите массу выданных тел методом двойного взвешивания.

г) Определите массу выданных тел методом Менделеева. Для этого на левую чашку весов положите гирю заведомо большую, чем масса тела и уравновесьте её «ручным» разновесом на правой чашке. Затем положите на правую чашку исследуемое тело и снимите столько гири, чтобы равновесие восстановилось. Вес снятых гири будет равен весу тела.

Заполните таблицу 2. Сравните результаты взвешивания.

Таблица 2.

Номер образца	Прямое взвешивание		Электронные весы		Метод двойного взвешивания		Метод Менделеева	
	m , г	Δm , г	m , г	Δm , г	m , г	Δm , г	m , г	Δm , г
1								
2								

3								
4								

Задание 2.

Определение плотности тела методом гидростатического взвешивания на электронных весах.

1. Взвесьте тело на весах (m_0).
2. Установите стакан с водой, показания весов обнулите. Опустите тело в воду, не касаясь дна и стенок и определите массу тела в воде (m).
3. Рассчитайте плотность тела по формуле:

$$\rho = \frac{m_0}{m} \rho_{\text{воды}}$$

4. Оцените систематическую ошибку в измерении плотности тела.

Задание 3.

Определение плотности жидкости методом пикнометра.

1. Взвесьте пустой пикнометр.
2. Налейте при помощи мерного стаканчика или шприца в пикнометр воды до риски.
3. Взвесьте заполненный пикнометр.
4. Рассчитайте плотность воды по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V},$$

где m_1 – масса заполненного пикнометра, m_0 – масса пустого пикнометра, V – объем пикнометра (указан на нем).

5. Оцените систематическую ошибку в измерении плотности жидкости.

Задание 4.

Определение плотности тела методом гидростатического взвешивания на технических весах.

1. Подвесьте исследуемое тело к левому коромыслу весов так, чтобы оно не касалось чашки весов, и взвесьте его.
2. Установите над левой чашкой столик со стаканом, наполненным водой, и погрузите тело в воду так, чтобы оно не касалось дна стакана и было полностью погружено в воду.
3. Определите вес тела в воде.
4. Рассчитайте плотность тела по формуле:

$$\rho = \frac{m_0}{m_0 - m_1} \rho_{\text{воды}},$$

где m_0 – вес тела в воздухе, m_1 – вес тела в воде.

5. Оцените систематическую ошибку в измерении плотности тела.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Опишите устройство технических весов.
2. Назовите основные параметры весов и возможные источники погрешностей механических и электронных весов.
3. Какие методы точного взвешивания существуют, в чем их достоинства и недостатки?
4. Опишите методы измерения плотностей жидкостей и твердых тел. Как определить плотность жидкости методом гидростатического взвешивания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом действия и устройством электроизмерительных приборов.
2. Научиться определять характеристики приборов по условным обозначениям.
3. Научиться оценивать погрешности электроизмерительных приборов.
4. Провести измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра.

Оборудование: набор измерительных приборов различных систем и классов точности, источник питания, набор различных сопротивлений, соединительные провода.

Теоретическая часть.

Введение.

Электромеханические приборы применяют для измерения напряжения, тока, мощности и других электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты. Название электроизмерительного прибора определяется его назначением. Различают вольтметры, амперметры, ваттметры, омметры, фазометры и комбинированные приборы – ампервольтметры, вольтомметры и другие.

По принципу действия электромеханические приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической, индукционной и некоторых других систем, используемых реже. Принадлежность прибора к той или иной системе обозначается условным значком на его шкале.

Таблица 1.

Условные обозначения на электроизмерительных приборах.

Условное обозначение	Расшифровка
	Измерительный механизм магнитоэлектрической системы
	Измерительный механизм электромагнитной системы
	Измерительный механизм электродинамической системы
	Измерительный механизм индукционной системы
	Измерительный механизм электромагнитной системы с экраном
	Измерительный механизм электродинамической системы с экраном
—	Измерение постоянных токов и напряжений
~	Измерение переменных токов и напряжений
≈	Измерение и постоянных и переменных токов и напряжений
⊥	Рабочее положение вертикальное
└	Рабочее положение горизонтальное
	Между корпусом и измерительной системой напряжение не должно превышать 2 кВ

Измерение физических величин можно осуществлять прямым или косвенным способами. При прямом способе значение измеренной величины определяют по непосредственному показанию прибора, шкала которого проградуирована в единицах измеряемой величины. Косвенный способ измерения позволяет определить значение

измеряемой величины с помощью вычислений по результатам прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной физической закономерностью, выраженной математической формулой.

При любых измерениях важно, чтобы приборы как можно меньше оказывали влияние на режим работы тех электрических цепей, в которых производятся измерения.

Наиболее часто используются стрелочные электроизмерительные приборы. Значительно реже назначение указателя в приборе выполняет световое пятно («зайчик»). Часто для повышения точности отсчета по шкале под стрелкой-указателя помещают зеркальную полосу вдоль всей шкалы. Это позволяет избежать ошибки параллакса (отсчет производят тогда, когда стрелка и ее изображение в зеркале совмещаются).

Шкала прибора может быть разделена на различное число делений. При этом говорят о цене деления шкалы. Для расчета цены деления можно использовать формулу: $\frac{x_{\max}}{N}$, т.е. отношение верхнего предела измеряемой величины по данной шкале к числу делений шкалы. Любой электроизмерительный прибор характеризуется также чувствительностью, т.е. отношением перемещения указателя (в линейных или угловых единицах, или в числе делений шкалы) к изменению значения измеряемой величины, вызвавшей это перемещение. Чувствительность прибора численно равна величине, обратной значению цены деления шкалы.

Метрологические свойства прибора характеризуют его класс точности. Он обозначается числом на шкале прибора и указывает предел приведенной погрешности прибора, выраженный в процентах. Государственным стандартом (ГОСТом) установлены восемь классов точности : 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; и 4,0. Класс точности численно равен величине максимальной погрешности при отклонении стрелки прибора на всю шкалу.

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha} \gamma$$

По классу точности легко можно определить величину абсолютной погрешности измеряемой величины $\Delta\alpha$ по формуле:

$$\Delta\alpha = \gamma\alpha_{\max}$$

Например: Значение напряжения, измеренное вольтметром класса точности 1,0 с верхним пределом измерения 100 Вольт, равно 10 Вольт. Абсолютная ошибка в измерении величины напряжения $\Delta U = \gamma U_{\max} = 0,01 \cdot 100 = 1$ Вольт, т.е. истинное значение измеряемой величины заключено в пределах от 9 до 11 Вольт, а относительная ошибка измерения

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%$$

Электроизмерительные приборы необходимо выбирать, исходя из заданной величины относительной погрешности. Если измеряемая величина должна быть определена с точностью $\pm 2\%$, то могут быть использованы для измерений приборы с классом точности 1,5 и выше, но не 2,5 и ниже.

Приборы, для которых $\gamma > 4(\%)$ не классифицируются (внеклассные приборы) и обычно используются как простые индикаторы токов или напряжений.

Если учесть, что для большинства электроизмерительных приборов значение $\Delta\alpha$ практически постоянно для любого участка шкалы, то минимальная относительная погрешность будет при отсчете показаний прибора в конце шкалы.

Основой электроизмерительного прибора является измерительный механизм (ИМ), имеющий отсчетное устройство, неподвижную и подвижную части и демпфер для успокоения собственных колебаний последней. Кроме ИМ прибор может содержать шунты и добавочные резисторы, расширяющие пределы измерения и размещенные в том

же корпусе. На подвижную часть ИМ действует вращающий момент, возникающий под действием токов и напряжений, функционально связанных с измеряемой величиной. Для его уравнивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части.

В лабораторной практике часто используются многопредельные приборы, в которых путем подключения к измерительному механизму добавочных сопротивлений или шунтов достигается расширение пределов измерения по току и напряжению. Предел измерения переключается соответствующим переключателем или выбором соответствующего гнезда на панели прибора. Выбирать предел измерения рекомендуется так, чтобы отклонение стрелки прибора составляло не менее $\frac{2}{3}$ шкалы. При переключении предела измерений изменяются предельное значение измеряемой величины и цена деления, это необходимо учитывать при практическом пользовании прибором. На шкале прибора многопредельного прибора обычно приводятся данные о токе полного отклонения при измерении различных напряжений и падение напряжения при измерении различных токов. Это позволяет определить внутреннее сопротивление вольтметра и амперметра на различных пределах.

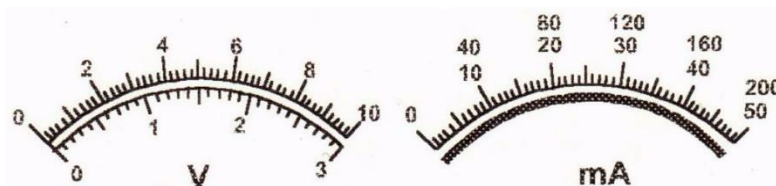


Рис. 1. Шкалы многопредельных вольтметра и амперметра.

Приборы магнитоэлектрической системы

Работа магнитоэлектрических механизмов основана на взаимодействии магнитного поля магнита и тока, проходящего по катушке (рамке). Возникающий при этом вращающий момент отклоняет подвижную часть механизма относительно неподвижной. В зависимости от того, какой из указанных элементов (постоянный магнит или рамка) является подвижной частью, различают механизмы с подвижной рамкой и с подвижным магнитом.

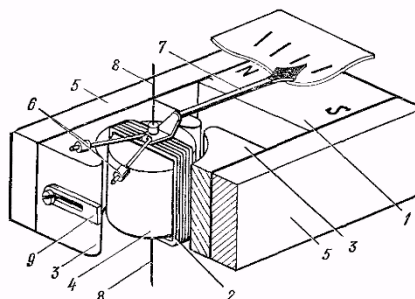


Рис. 2. Устройство измерительного механизма магнитоэлектрической системы

Магнитная цепь измерительного механизма с внешним магнитом (рис. 2) состоит из сильного постоянного магнита 1, полюсных наконечников с цилиндрической расточкой 3, цилиндрического сердечника 4 и магнитопровода 5, выполненных из магнитомягкого материала. В воздушном зазоре между сердечником и полюсными наконечниками создается сильное, практически равномерное радиальное магнитное поле.

Подвижная часть механизма 2 представляет собой катушку (рамку) прямоугольной формы из тонкого медного или алюминиевого провода, намотанного на алюминиевый каркас (либо без каркаса), которая может поворачиваться вокруг сердечника в магнитном поле. К рамке с двух сторон приклеиваются алюминиевые буксы для закрепления растяжек или кернов. Уравнивание подвижной части осуществляется грузиками 6. Стрелка 7 и циферблат со шкалой образуют отсчетное устройство.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока i на нее действует вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = BSni, \quad (1)$$

где B – величина индукции магнитного поля в зазоре; S – площадь рамки; n – число витков обмотки рамки. Учитывая, что противодействующий момент пропорционален углу поворота рамки, из выражения (1) можно найти угол отклонения, при котором наступает равновесие подвижной части ИМ

$$\alpha = \frac{SBn}{W} i, \quad (2)$$

где W – коэффициент, зависящий от упругости пружинки. Коэффициент пропорциональности между углом отклонения и силой тока называется чувствительностью ИМ по току. Как следует из (2), при постоянстве индукции в зазоре чувствительность магнитоэлектрического измерительного механизма постоянна и шкала линейна.

При протекании по обмотке рамки меняющегося во времени тока $i(t)$ выражение (1) будет описывать связь мгновенных значений тока рамки и действующего на нее вращающего момента. Если частота изменения тока намного меньше частоты собственных механических колебаний подвижной части прибора, то отклонение рамки определяется мгновенными значениями ее тока. Такой режим работы характерен для регистрирующих приборов, например самописца. Частота собственных механических колебаний рамки мала, и в большинстве случаев при проведении радиоизмерений частота тока рамки значительно превосходит ее. В этом случае угол отклонения рамки пропорционален среднему значению тока (его постоянной составляющей)

$$\langle i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (3)$$

где T – период измеряемого тока или интервал усреднения, определяемый постоянной времени подвижной части ИМ, для непериодических токов.

Непосредственно магнитоэлектрический измерительный механизм, без дополнительных элементов, используют для измерения малых токов и напряжений. Для расширения диапазона измеряемых напряжений и токов используют добавочные резисторы $R_{\text{д}}$ и шунты $R_{\text{ш}}$, которые подключаются соответственно последовательно и параллельно измерительному механизму.

Для измерения переменных токов совместно с магнитоэлектрическим ИМ используют дополнительные диодные выпрямители. Это позволяет измерять средневывпрямленное значение тока

$$\alpha = \frac{SBn}{W} \langle i \rangle.$$

Достоинства магнитоэлектрических приборов:

Большой вращающий момент при малых токах – высокая чувствительность прибора, линейная шкала прибора, высокие классы точности, малое энергопотребление, нечувствительность к внешним магнитным полям и высокочастотным наводкам.

Недостатки магнитоэлектрических приборов:

Сложность конструкции, высокая стоимость, при протекании большого тока, тонкий провод рамки прибора может сгореть, при подключении прибора нужно строго соблюдать полярность, для использования в цепях переменного тока необходимы преобразователи.

Приборы электромагнитной системы

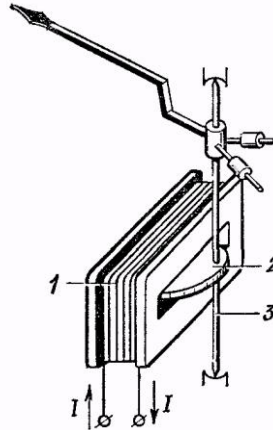


Рис. 3. Устройство измерительного механизма электромагнитной системы

Устройство электромагнитного механизма показано на рис. 3. Работа его основана на взаимодействии подвижного ферромагнитного сердечника 2, эксцентрично укрепленного вместе со стрелкой на оси 3, с неподвижной катушкой 1, обтекаемой током. Спиральная пружинка используется только для создания противодействующего момента. Угол поворота стрелки такого прибора пропорционален квадрату тока, протекающего через катушку:

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} i^2, \quad (4)$$

поэтому шкала у электромагнитного измерительного прибора неравномерная. Обычно в электромагнитных механизмах форма сердечника подбирается так, что шкала практически равномерная, начиная с 15–20% ее конечного значения.

Электромагнитные амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и могут использоваться для измерений в цепях постоянного и переменного тока. При работе прибора на переменном токе в сердечнике и окружающих металлических частях возникают вихревые токи, размагничивающие сердечник. Поэтому показания прибора электромагнитной системы при измерении переменного тока несколько меньше, чем при измерении постоянного. При частоте 50 Гц это различие невелико, но оно увеличивается с ростом частоты тока.

Достоинства электромагнитных механизмов.

Пригодность для работы в цепях постоянного переменного тока; большая перегрузочная способность; возможность непосредственного измерения больших токов и напряжений; простота конструкции, нет необходимости соблюдать полярность включения.

Недостатки электромагнитных механизмов.

Неравномерная шкала; невысокая чувствительность; большое потребление мощности; подверженность влиянию изменения частоты; подверженность влиянию внешних магнитных полей и температуры.

Приборы электродинамической системы

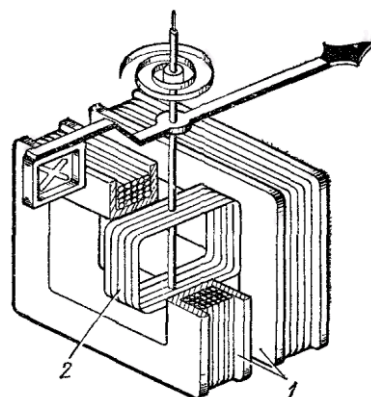


Рис. 4. Измерительный механизм электродинамической системы

Работа измерительных механизмов электродинамической системы основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами – неподвижной 1 и подвижной 2. Подвижная катушка, укрепленная на оси или растяжках, может поворачиваться внутри неподвижной. При протекании в обмотках катушек токов i_1 и i_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки подвижной и неподвижной катушек совпали.

Неподвижная катушка 1 обычно выполняется из двух одинаковых частей, разделенных воздушным зазором. Благодаря этому обеспечиваются требуемая конфигурация магнитного поля и удобство расположения оси. Неподвижная и подвижная катушки механизма (обычно бескаркасные) имеют круглую или прямоугольную форму и изготавливаются из медного или алюминиевого провода. Подвижная катушка укрепляется на опорах или растяжках. Для подвода тока к подвижной катушке используются спиральные пружины или растяжки. Применяются стрелочные или световые указатели.

Собственное магнитное поле электродинамических механизмов, силовые линии которого замыкаются по воздуху, невелико. На электродинамические механизмы влияют внешние магнитные поля. Для защиты от них применяется экранирование, т.е. измерительный механизм помещают внутри одного или двух экранов из ферромагнитного материала.

Шкала приборов электродинамической системы также нелинейна, однако на практике удастся сделать шкалу электродинамических приборов равномерной начиная с 15...20 % от конечного ее значения.

Электродинамические амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и поэтому могут использоваться для измерений в цепях не только постоянного, но и переменного тока.

Электродинамические приборы являются наиболее точными среди других приборов переменного тока, поскольку в них отсутствуют ферромагнитные элементы, а следовательно, отсутствуют и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков. Класс точности этих приборов – до 0,05 и лучше. Столь малая погрешность, однако, имеет место только на низких частотах (до 1,5 кГц), где не сказывается влияние индуктивности катушек.

Достоинства электромагнитных механизмов.

Возможность работы на постоянном и переменном токе. Хорошая точность при работе на переменном токе.

Недостатки электромагнитных механизмов.

Нелинейная шкала, малая чувствительность и сравнительно большое энергопотребление.

Электростатические приборы

В электростатических механизмах перемещение подвижной части происходит под действием энергии электрического поля системы двух или нескольких электрически заряженных проводников. Следовательно, в данном механизме в отличие от механизмов других систем перемещение подвижной части осуществляется за счет действия непосредственно приложенного напряжения. Поэтому в основном электростатические механизмы применяются в приборах, измеряющих напряжение, вольтметрах.

Перемещение подвижной части во всех конструкциях электростатических вольтметров связано с изменением емкости системы. Распространение получили два вида механизмов: изменение емкости в одних осуществляется за счет изменения активной площади электродов, а в других – за счет изменения расстояния между электродами. Первые применяются в щитовых и переносных вольтметрах на напряжения от десятков до сотен вольт, вторые – в щитовых киловольтметрах.

Устройство механизма с изменением активной площади электродов схематически показано на рис. 5. Неподвижная часть состоит из симметрично расположенных и электрически соединенных электродов 1. Секторообразная пластина 2 вместе с указателем 3, укрепленная на оси, образуют подвижную часть. Под действием подведенного к электродам напряжения U создается электрическое поле. Силы электрического поля стремятся повернуть подвижную часть так, чтобы энергия электрического поля была наибольшей.

Чувствительность измерительного механизма электростатической системы мала, что не позволяет создать прибор с пределом измерения меньше 10 В.

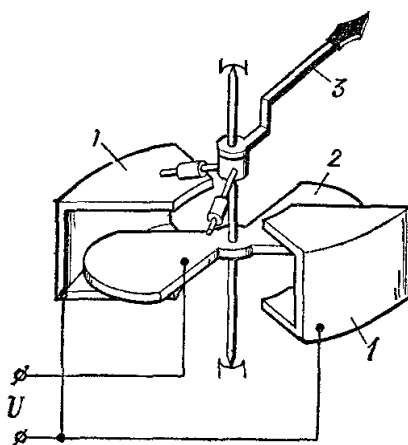


Рис. 5. Устройство измерительного механизма электростатической системы

Собственное электрическое поле электростатического вольтметра незначительное, поэтому на работу прибора сильное влияние оказывают внешние электрические поля. Для уменьшения этого влияния приборы экранируют. Экраном может служить корпус прибора, если он металлический. Если корпус выполнен из пластмассы, то экраном служит металлическая фольга из немагнитного материала или алюминиевая краска, которой покрывается внутренняя поверхность корпуса. Экран соединяется с одним из электродов и заземляется.

Чувствительность электростатических механизмов мала. Для ее повышения подвижную часть укрепляют на растяжках или на подвесе, применяют оптический световой отсчет, а также увеличивают емкость механизма, делая его многокамерным.

На электростатические вольтметры почти не влияют температура, частота и форма кривой приложенного напряжения и внешние магнитные поля.

Собственное потребление мощности вольтметра на переменном токе мало, а при включении в цепь постоянного тока равно нулю.

Перечисленные свойства электростатических вольтметров обуславливают их применение в широком частотном диапазоне в маломощных цепях, а также в цепях высокого напряжения до сотен киловольт.

Достоинства электростатических приборов.

Приборы электростатического типа имеют высокое входное сопротивление, малую, но переменную входную емкость, малую потребляемую мощность, широкий частотный диапазон. Данные приборы могут использоваться в цепях переменного и постоянного тока. Показания приборов соответствуют среднеквадратическому значению измеряемой величины, и показания не зависят от формы кривой измеряемого сигнала.

Недостатки электростатических приборов.

Приборы имеют квадратичную шкалу, малую чувствительность из-за слабого электростатического поля и невысокую точность. Кроме того, приборы требуют применения экрана и не исключают возможность электрического пробоя.

Успокоители колебаний стрелки (демпферы)

Для обеспечения требуемого времени успокоения подвижной части в аналоговых приборах применяют различные устройства, создающие успокаивающий момент. К ним относятся воздушный, магнитоиндукционный или жидкостный успокоители. Воздушный успокоитель (рис. 6а) применяется, главным образом, в приборах старых разработок, имеющих подвижную часть на оси с противодействующими пружинами. Он представляет собой закрытую камеру 1, внутри которой перемещается при движении подвижной части легкое алюминиевое крыло 2, жестко укрепленное на оси 3 подвижной части измерительного механизма. Между алюминиевым крылом 2 и корпусом 1 имеется небольшой зазор. При движении крыла воздух перемещается из одной части камеры в другую, создавая успокаивающий момент, способствующий оптимальному успокоению подвижной части прибора. Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 6б) состоит из неподвижного постоянного магнита 1 с магнитопроводом 2 (возможно применение нескольких постоянных магнитов) и крыла успокоителя 3, жестко скрепленного с подвижной частью прибора. Крыло успокоителя выполнено из немагнитного материала, обычно алюминия.

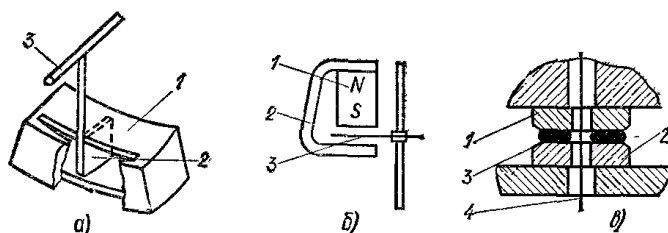


Рис. 6. Устройства демпферов:
а) воздушный; б) магнитоиндукционный; в) жидкостный.

При движении подвижной части, а следовательно, и крыла успокоителя в последнем при пересечении поля постоянного магнита наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем постоянного магнита создает успокаивающий момент.

Магнитоиндукционный успокоитель по конструкции проще воздушного успокоителя и более удобен при регулировке успокаивающего момента. Однако применение магнитоиндукционного успокоителя возможно лишь в приборах, где поле

постоянного магнита не будет оказывать существенного влияния на работу измерительного механизма.

Жидкостный успокоитель применяется, главным образом, в приборах, имеющих малые размеры по высоте, однако в последнее время его стали применять и в приборах обычного габарита. Жидкостный успокоитель (рис. 6в) состоит из двух дисков. Диск 1 укрепляется на подвижной части прибора, а диск 2 – на неподвижной части. Зазор между дисками обычно составляет 0,1–0,15 мм. Между дисками заливается специальная маловысыхающая кремнийорганическая жидкость 3. Жидкость в зазоре удерживается поверхностным натяжением. Для предотвращения вытекания жидкости из зазора поверхности дисков, соприкасающиеся с жидкостью, тщательно полируются.

Благодаря определенной вязкости применяемой жидкости при движении подвижной части, т.е. при вращательном движении диска 1 относительно диска 2, из-за трения между слоями жидкости возникает успокаивающий момент.

Правила работы с электроизмерительными приборами

При подключении измерительного прибора к электрической цепи её параметры в той или иной степени изменяются, что необходимо учитывать при проведении измерений. Основное требование к электроизмерительным приборам сводится к минимизации влияния прибора на параметры и режим работы объекта измерений.

Измерение амперметром

Амперметр включается в электрическую цепь последовательно с нагрузкой R^* (в разрыв цепи), как показано на рис. 7. Внутреннее сопротивление амперметра (сопротивление обмотки измерительного механизма прибора) равно R_A .

Ток в цепи до включения амперметра был равен $i = \frac{E}{R^*}$, при включении амперметра в цепь ток изменяется и становится равным $i' = \frac{E}{R^* + R_A}$. Только если $R_A \ll R^*$, амперметр не будет вносить заметных искажений.

Если величина тока превышает допустимый предел измерений амперметра, то предел измерений амперметра можно расширить, подключив параллельно амперметру специальное сопротивление, называемое шунтом.

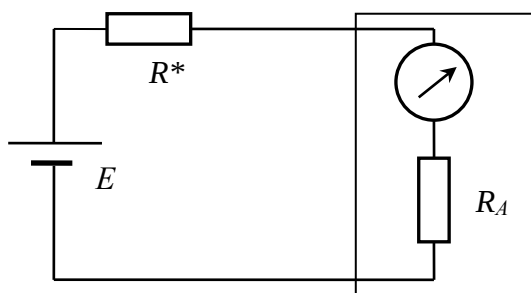


Рис. 7. Включение амперметра в измерительную цепь.

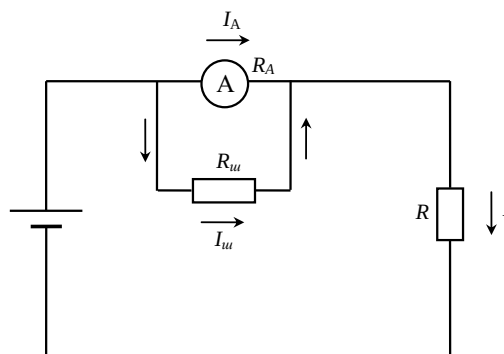


Рис. 8. Расширение предела измерения амперметра при помощи шунта.

При подключении шунта часть тока I , текущего через сопротивление нагрузки, течет через шунт, причем:

$$I = I_A + I_{ш}; \quad I_{ш} R_{ш} = I_A R_A, \text{ тогда } \frac{I_{ш}}{I_A} = \frac{R_A}{R_{ш}}.$$

Если максимально допустимый ток I_A , измеряемый амперметром, в n раз меньше тока в цепи, то:

$$\frac{I}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}} = n,$$

т.е. для увеличения предела измерения в n раз необходимо подключить шунт сопротивлением

$$R_{ш} = \frac{R_A}{(n-1)}. \quad (5)$$

Измерение вольтметром

Для измерения падения напряжения на участке цепи вольтметр подключается параллельно участку.

Если измеряемое падение напряжения превышает предел измерения вольтметра, то прибор может выйти из строя. Расширить пределы измерения вольтметра можно, подключив последовательно с вольтметром добавочное сопротивление.

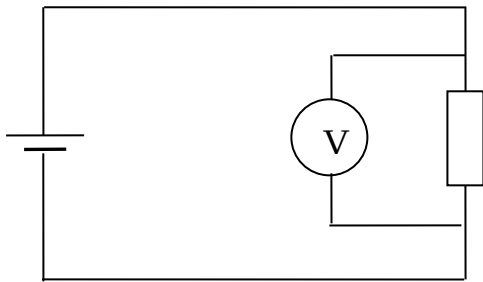


Рис. 9. Включение вольтметра в измерительную цепь.

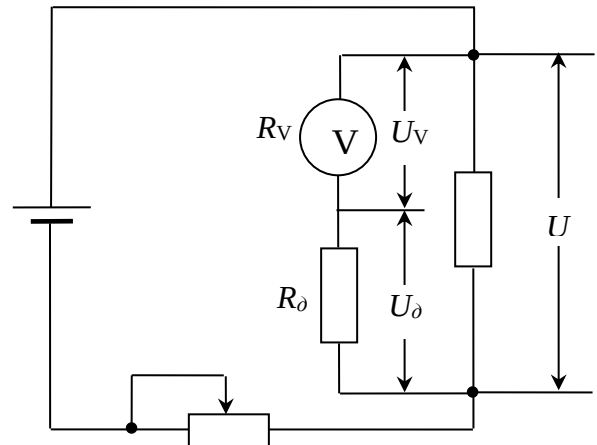


Рис. 10. Расширение предела измерения вольтметра.

Номинал добавочного сопротивления должен быть таким, чтобы сумма падений напряжений U_{∂} и U_V оказалась не меньше измеряемой разности потенциалов U . Так как через обмотку вольтметра (R_V) и добавочное сопротивление (R_{∂}) течет один и тот же ток:

$$I = \frac{U_V}{R_V} \quad \text{и} \quad I = \frac{U_{\partial}}{R_{\partial}}, \text{ т.е. } \frac{U_V}{U_{\partial}} = \frac{R_V}{R_{\partial}}; \quad \frac{U_V}{U - U_V} = \frac{R_V}{R_{\partial}}.$$

Для того, чтобы увеличить предел измерения вольтметра в n раз, т.е: $U = n \cdot U_V$, необходимо добавочное сопротивление с номиналом:

$$R_{\partial} = R_V \frac{nU_V - U_V}{U_V} = R_V (n-1).$$

Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

Для измерения сопротивления проводника R_x методом амперметра и вольтметра, необходимо провести измерения силы тока I_x , и падение напряжения U_x на концах проводника, и воспользоваться законом Ома для участка цепи:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}.$$

Рассмотрим схему для измерения R_x , изображенную на рис. 11а. Через амперметр и сопротивление R_x течет один и тот же ток. Эта схема не вносит ошибок в измерение тока, однако вольтметр показывает напряжение, действующее не на резисторе R_x , а на некотором участке цепи, состоящем из последовательно соединенных резистора и обмотки измерительного механизма амперметра; сопротивление этого участка:

$$R'_x = R_x + R_A,$$

Искомое сопротивление R_x будет равно:

$$R_x = R'_x - R_A.$$

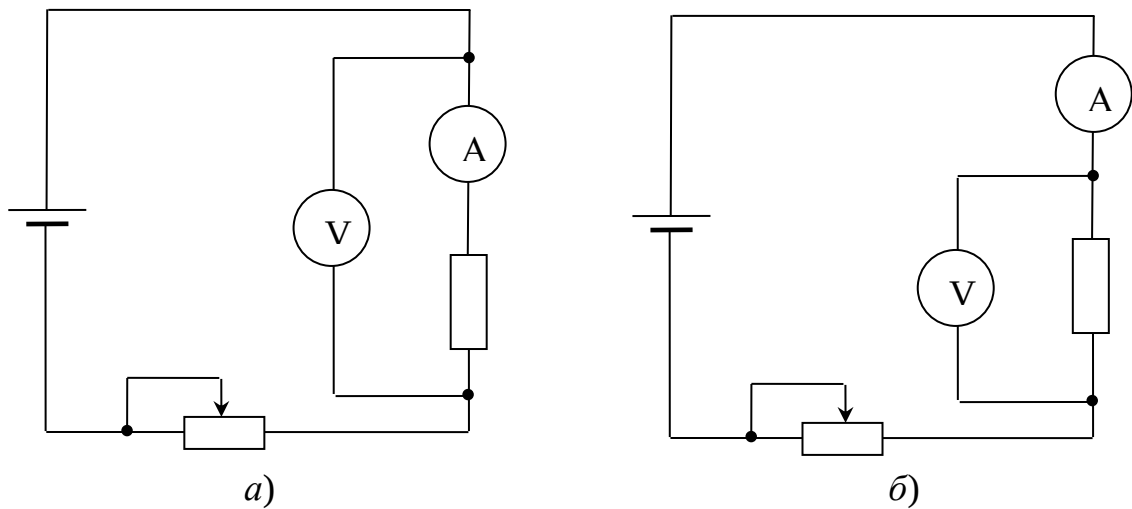


Рис. 11. Схемы для измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра.

Относительная систематическая погрешность метода измерений в этом случае определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x},$$

где $\Delta R_x = R'_x - R_x = R_A$.

Т.е:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}.$$

Чем больше величина измеряемого сопротивления R_x по сравнению с внутренним сопротивлением R_A амперметра, тем меньше погрешность измерений при помощи схемы, изображённой на рис. 11а. Эта схема может быть использована при измерении больших сопротивлений $R_x \gg R_A$.

Схема, изображенная на рисунке 11б не вносит дополнительной ошибки при измерении напряжения. При этом амперметр показывает суммарный ток, текущий через резистор и вольтметр.

$$I = I_x + I_V.$$

Рассчитанное по показаниям приборов сопротивление R''_x будет отличаться от реального сопротивления проводника R_x .

$$R_x'' = \frac{U}{I}, \text{ но } R_x = \frac{U}{I_x}$$

$$R_x = \frac{U}{I - I_V} = \frac{U}{\frac{U}{R_x''} - \frac{U}{R_V}} = \frac{R_x'' R_V}{R_V - R_x''}$$

Относительная погрешность схемы измерений без учёта тока, протекающего через вольтметр, определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x},$$

где $\Delta R_x = R_x'' - R_x = R_x'' - \frac{R_x'' R_V}{R_V - R_x''} = -\frac{R_x''^2}{R_V - R_x''}$.

Т.е.:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x''}{R_V}.$$

Чем меньше величина измеряемого сопротивления R_x по сравнению с внутренним сопротивлением R_V вольтметра, тем меньше погрешность измерений при помощи схемы, изображённой на рис. 11б.

На практике измерение сопротивления при помощи рассмотренных схем осуществляется путём построения вольтамперной характеристики (ВАХ), т.е. зависимости $I = f(U)$. Расчёт сопротивления может производиться либо аналитически (непосредственно по табличным данным), либо графически. Графический способ сводится к вычислению искомого сопротивления по графику ВАХ исследуемого сопротивления. Для этого табличные данные наносят на координатную плоскость и проводят кривую так, чтобы экспериментальные точки располагались примерно с одинаковой плотностью выше и ниже этой кривой. Если вследствие нагревания ВАХ проявляет нелинейный характер, то следует ограничиться лишь линейным её участком. Тогда искомое сопротивление может быть определено как:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Измерение сопротивлений с помощью универсального цифрового измерительного прибора (на примере GDM-8135).

Подключите изучаемое устройство с помощью измерительных проводов к универсальному измерителю. Один из проводов «Общий» подключите к входу «СОМ», второй к входу обозначенному «V-Ω» (V – измерение напряжения, Ω – измерение сопротивления). Род тока (постоянный/переменный (AC/DC)) в данном случае не влияет на ход измерений. Выберите род измеряемой величины «kΩ» и установите наименьший предел измерения «200Ω» (максимальное значение измеряемой величины 200 Ом). Подключите прибор к сети электропитания и нажмите кнопку включения прибора.

Выбор предела измерения: в том случае если в процессе проведения измерения на индикаторе прибора появляется символ «1.» в максимальном разряде, а все остальные разряды не светятся, этот факт указывает на то, что измеряемая величина превосходит предел измерения и необходимо перейти на более высокий предел. Для этого нажмите на кнопку, соответствующую более высокому значению предела измеряемой величины. В том случае, если вы достигли максимального предела, а показания не изменились проверьте надежность подключения и разрыв в измерительных проводах. Если электрическая часть исправна, то возможны два варианта: прибор вышел из строя, либо данный прибор не подходит для измерения такой величины сопротивления. В том случае,

если на всех разрядах прибора светятся нули предел измерения слишком велик и вам необходимо переключиться на более низкий. **Внимание!** При смене пределов измерения следите за положением десятичного разделителя.

Абсолютная погрешность измеряемой величины, определяемой с помощью цифрового прибора, определяется его техническими характеристиками и указывается в паспорте прибора (инструкции по эксплуатации). Для GDM-8135 на пределе 2 кΩ она равна $\pm(0,2\%+1$ единица младшего разряда). Например, если вы получили значение сопротивления $R=1,385$ кОм это означает, что погрешность $\Delta R=1,385 \cdot 0,002+0,001=0,00377=0,004$. Округление производить до младшего разряда, определяемого на приборе.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Задание 1.

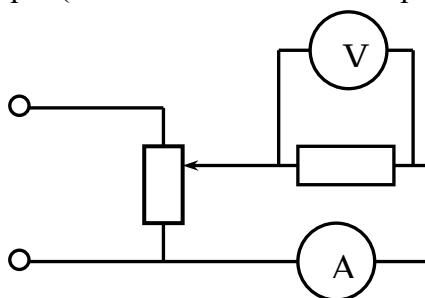
Рассмотрите предложенные вам электроизмерительные приборы. Определите их характеристики по обозначениям на шкале. Заполните для каждого прибора следующую таблицу:

Таблица 2.

Тип прибора (вольтметр, амперметр или др.)			
Марка			
Тип измерительного механизма			
Для измерений в цепях какого тока предназначен			
Максимальный предел измерения			
Цена деления на каждом пределе измерения			
Класс точности			
Абсолютная погрешность измерения для показаний в конце шкалы			
Рабочее положение			

Задание 2.

Постройте вольтамперные характеристики (ВАХ) двух предложенных вам сопротивлений. Для этого соберите схему, изображенную на рисунке. (Соблюдайте полярность подключения! Клемма + источника должен быть подключена к клемме + вольтметра или амперметра). Перемещением ползунка реостата установите различные значения падения напряжения на резисторе и измерьте соответствующие значения силы тока по показаниям амперметра (не менее 7 – 10 измерений). Результаты занесите в



таблицу.

Постройте графики зависимости силы тока от напряжения. По тангенсу угла наклона графиков определите сопротивление резисторов.

Оцените относительную ошибку метода измерений. Соответствует ли выбранная схема требуемой точности измерений? Заполните таблицу 3.

Таблица 3.

	Аналоговые		Цифровые	
	1-й резистор	2-й резистор	1-й резистор	2-й резистор
U , В	I , мА	I , мА	I , мА	I , мА
1				
2				
.....				
	$R_1 = \dots\dots\dots$ Ом	$R_2 = \dots\dots\dots$ Ом	$R_1 = \dots\dots\dots$ Ом	$R_2 = \dots\dots\dots$ Ом

Произвести прямые измерения сопротивления резисторов с помощью цифровых измерительных приборов. Сравнить значения сопротивлений, полученных каждым способом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите принцип действия различных электроизмерительных механизмов.
2. Что такое класс точности и чувствительность прибора?
3. Как производится расширение пределов измерений амперметра и вольтметра? Произведите **расчет добавочного сопротивления** для любого из использованных вами в работе вольтметров, чтобы этот вольтметр позволял измерять напряжения до 750 В. Произведите **расчет шунта для амперметра** для расширения его предела измерения до 5 А. Результаты представьте в отчете.
4. Как влияет внутреннее сопротивление вольтметра на результаты измерений?
5. Как производится измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПО КРИВОЙ РАЗРЯДА

Цель работы: целью работы является экспериментальная проверка экспоненциального характера переходных процессов в конденсаторе, а также определение электроёмкости конденсатора по зависимости силы тока в цепи от времени при разрядке конденсатора.

Оборудование: источник тока, установка для измерения времени релаксации заряда конденсатора, видеокамера, секундомер.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Под электроемкостью конденсатора понимают величину, численно равная заряду Δq , который нужно перенести с одной обкладки на другую для того, чтобы изменить разность потенциалов между ними $\Delta U = \varphi_1 - \varphi_2$ на единицу:

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta U} \quad (1)$$

Электроемкость конденсатора зависит от формы, размеров и взаимного расположения обкладок, а также от диэлектрической проницаемости диэлектрика, разделяющего обкладки. Если мы перенесли с одной обкладки на другую заряд $\Delta q = +q$, при этом разность потенциалов между обкладками изменилась на $\Delta U = U$. Тогда в силу формулы (1)

$$C = \frac{q}{U} \quad (2)$$

т.е. электроемкость конденсатора равна отношению заряда положительно заряженной обкладки к разности потенциалов между положительно и отрицательно заряженными обкладками.

В системе СИ заряд q измеряют в кулонах (Кл), а потенциал φ и напряжение U (разность потенциалов) в вольтах (В). Единицу измерения ёмкости в СИ называют фарад (Ф), $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$. В системе единиц Гаусса (СГСЭ) ёмкость имеет размерность длины и выражается в сантиметрах (см). Связь между единицами измерения электроёмкости в системах СИ и СГСЭ задаётся соотношением $1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$. Один фарад – это очень большая величина. Электроёмкость Земли составляет 700 мкФ. На практике обычно пользуются дольными единицами: пикофарадами ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$), нанофарадами ($1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$), микрофарадами ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$).

Для того, чтобы электроемкость конденсаторов была больше, используют диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью. Для того, чтобы электроемкость не зависела от тел, расположенных вблизи конденсатора, форма, размеры и расположение обкладок должны быть такими, чтобы электрическое поле конденсатора было в основном сосредоточено между обкладками.

В электрических цепях наличие конденсаторов существенно влияет на протекание процессов, поскольку конденсаторы обладают способностью накапливать заряды и энергию. При включении или выключении источника питания в цепи, обладающей емкостью и сопротивлением, протекают переходные процессы, т.е. процессы установления стационарных (неизменных) значений силы тока и напряжений на отдельных элементах цепи. К описанию таких процессов можно применять законы постоянного тока можно применять, если изменение тока происходит достаточно медленно. Такие токи и соответствующие им поля называются квазистационарными. Рассмотрим процессы при замыкании и размыкании цепи с конденсатором или цепи с индуктивностью, предполагая токи в этих процессах квазистационарными.

Многие характеристики постоянного тока сохраняются и для квазистационарных токов. Квазистационарные токи – это медленно меняющиеся токи. Величина таких медленно меняющихся токов в каждый момент времени остается одинаковой во всех сечениях неразветвленной проводящей цепи. Мгновенное состояние квазистационарных токов достаточно точно определяется законом Ома и правилами Кирхгофа и тем точнее, чем медленнее меняются токи.

В качестве примера квазистационарных токов рассмотрим процессы заряда и разряда конденсатора в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные конденсатор C , сопротивление R (включающее и внутреннее сопротивление источника) и источник ЭДС ε (рис. 1).

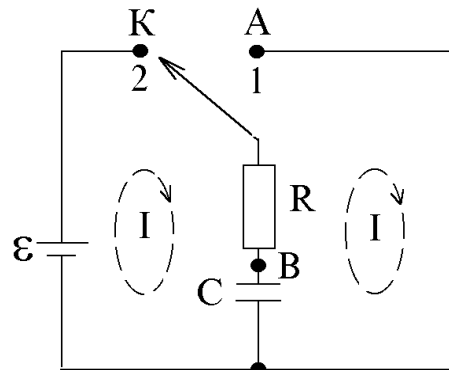


Рис. 1. Схема электрической цепи для изучения процессов заряда и разряда конденсатора

Пусть I , q , U – мгновенные значения тока, заряда и разности потенциалов между обкладками конденсатора. Так как токи и напряжения удовлетворяют условиям квазистационарности, то соотношение I , q и U такое же, как и в цепях постоянного тока.

Рассмотрим сначала процесс заряда конденсатора. В начальный момент времени ($t = 0$) установим ключ в положение 2 и в цепи пойдет ток, заряжающий конденсатор. Применим закон Ома к цепи (рис. 1):

$$IR = \varepsilon - U. \quad (3)$$

Учитывая, что уравнение (2) $U = q/C$ и определение силы тока $I = dq/dt$, то выражение (3) можно записать в виде:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - q/C}{R}, \quad (4)$$

где q – заряд конденсатора. Разделим переменные таким образом, чтобы выражения, содержащие заряд оказались в левой части уравнения, а время – в правой. Затем проинтегрируем обе части уравнения с учетом начального условия: при $t = 0$, $q = 0$:

$$\int_0^q \frac{R dq}{\varepsilon - q/C} = \int_0^t dt \rightarrow RC \ln(\varepsilon - q/C) = -t,$$

отсюда

$$q = q_m \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (5)$$

где $q_m = \varepsilon C$ – максимальная величина заряда на конденсаторе. Напряжение на конденсаторе и сила тока в цепи будет изменяться по закону:

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (6)$$

где $I_0 = \varepsilon/R$. Графики зависимостей $q(t)$ и $I(t)$ представлены на рисунке 2, из которого видно, что сила тока имеет наибольшее значение в начальный момент времени и асимптотически стремится к нулю в процессе заряда, а заряд на обкладках конденсатора возрастает от нуля до максимального значения.

Рассмотрим теперь процесс разряда конденсатора. Переведем ключ на рис. 1 в положение 1. В этом случае заряженный предварительно конденсатор емкостью C , будет разряжаться через сопротивление R . При разряде конденсатора в цепи протекает ток $I = -dq/dt$. В это выражение входит знак минус, так как выбранное нами положительное

направление тока соответствует уменьшению заряда конденсатора и противоположно по направлению току, который протекает в ходе процесса заряда. По закону Ома имеем $U = IR$, тогда:

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R}, \quad \frac{U}{R} = \frac{q}{CR}. \quad (7)$$

Это выражение показывает, что скорость уменьшения заряда конденсатора пропорциональна величине заряда. Снова разделим переменные и проинтегрируем (7) при начальных условиях $t = 0, q = q_0$:

$$\int_{q_0}^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt,$$

откуда

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (8)$$

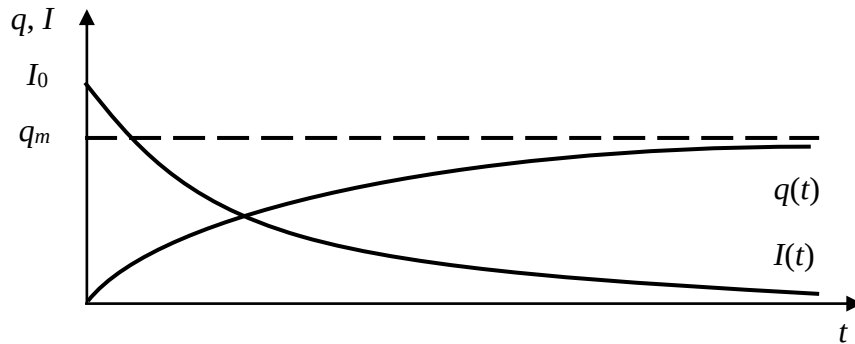


Рис. 2. Зависимости заряда на обкладках конденсатора и силы тока в цепи от времени

Зависимость заряда конденсатора от времени является экспоненциальной функцией. Закон изменения напряжения на конденсаторе в процессе разряда аналогичен (8):

$$U(t) = \frac{q}{C} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (9)$$

где $U_0 = q_0/C$. Отсюда видно, что напряжение на конденсаторе уменьшается и асимптотически стремится к нулю. Таков же характер изменения тока при разряде (отличается от (6) только знаком).

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (10)$$

Полученные выражения показывают, что процессы заряда и разряда происходят не мгновенно, а с конечной скоростью. Для контура, содержащего сопротивление и емкость, скорость установления зависит от произведения $\tau = RC$, которое имеет размерность времени и называется постоянной времени или временем релаксации τ . Отсюда следует, что чем больше τ , тем медленнее будет уменьшаться с течением времени множитель $e^{-t/RC}$ и, следовательно, потребуется больше времени, чтобы заряд напряжения или ток достигли заданного уровня. Таким образом, постоянная времени τ характеризует длительность переходных процессов, происходящих в цепи. За время $t = \tau$ заряд конденсатора либо уменьшается в e раз при разрядке конденсатора, либо достигает значения в e раз меньшего, чем максимальное q_0 при его зарядке. Если R и C выражать в единицах системы СИ (омах и фарадах), то τ будет выражено в секундах.

Для определения времени релаксации используют несколько методов.

Метод 1. Построение кривой разряда в полулогарифмическом масштабе

Если прологарифмировать (9) или (10), то получим зависимости типа:

$$\ln \frac{U_0}{U} = \frac{t}{\tau} \quad \text{или} \quad \ln \frac{I_0}{I} = \frac{t}{\tau}. \quad (11)$$

Построив графики зависимости $\ln \frac{I_0}{I}$ от t или $\ln \frac{U_0}{U}$ от t , получим прямые, тангенс наклона которых соответствует $1/\tau$.

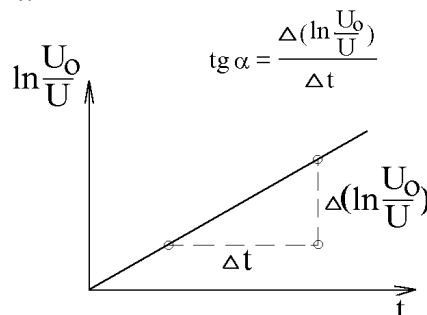


Рис. 3. Определение тангенса угла наклона прямой в полулогарифмических координатах.

Метод 2. Определение времени «полураспада».

В другом способе для определения τ необходимо измерить время, за которое величина силы тока в цепи уменьшится до половины первоначального значения $t_{1/2}$. Этот метод имеет прямую аналогию с используемым в ядерной физике термином «период полураспада». В данном случае под «распадом» понимается уменьшение разрядного тока в два раза за определенное время. Это время определяется из выражения:

$$e^{-\frac{t_{1/2}}{RC}} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

Прологарифмировав обе части уравнения (12), получим

$$t_{1/2} = RC \ln 2 = 0,693RC \quad (13)$$

Т.е., чтобы определить постоянную времени, нужно измерить $t_{1/2}$ и разделить полученную величину на 0,693.

Так как экспонента асимптотически приближается к оси абсцисс, то точно установить окончание процесса разряда конденсатора (также, как и процесса заряда) не удастся. Поэтому следует измерить время $t_{1/2} = 0,693 RC$, за которое заряд на обкладках конденсатора уменьшился в 2 раза (рис. 4а).

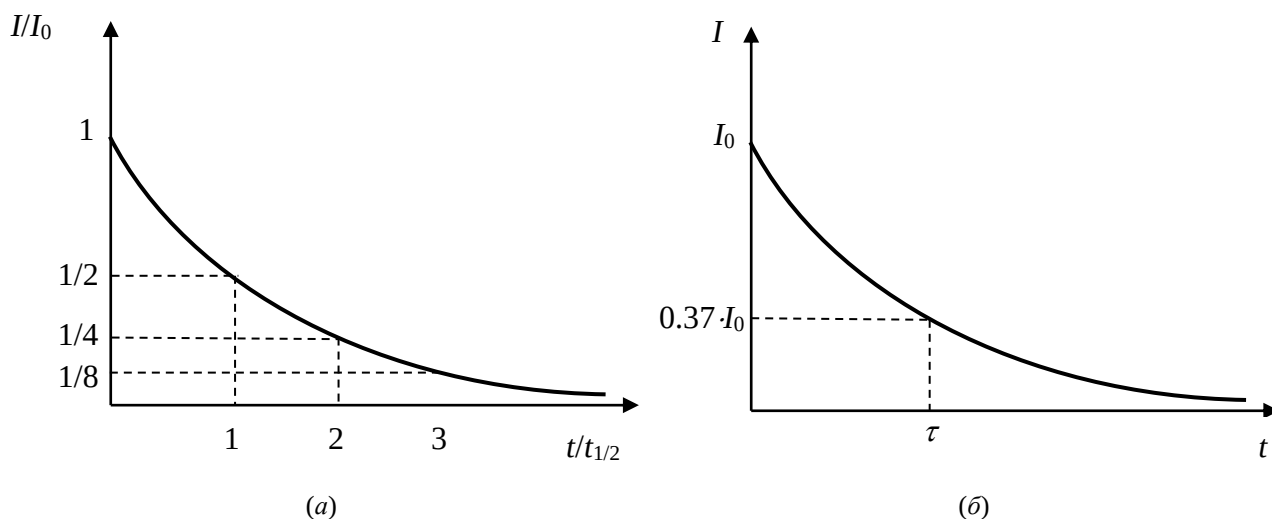


Рис. 4. Определение времени релаксации по методам 2 (а) и 3 – (б).

Метод 3. Определение времени снижения сигнала в e раз.

Имея экспоненциальные кривые напряжения или тока, можно найти постоянную времени цепи τ следующим образом (рис. 4 б). На графике $U(t)$ или $I(t)$ при разрядке и зарядке выбирают уровень, при котором необходимая величина снижается в $e \approx 2,7183$ раз, т.е. нужно найти время, через которое величина становится равной $\approx 0,37U_0$ либо $\approx 0,37I_0$ ($e^{-1} \approx 0.37$). Это время и будет искомым временем релаксации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание экспериментальной установки

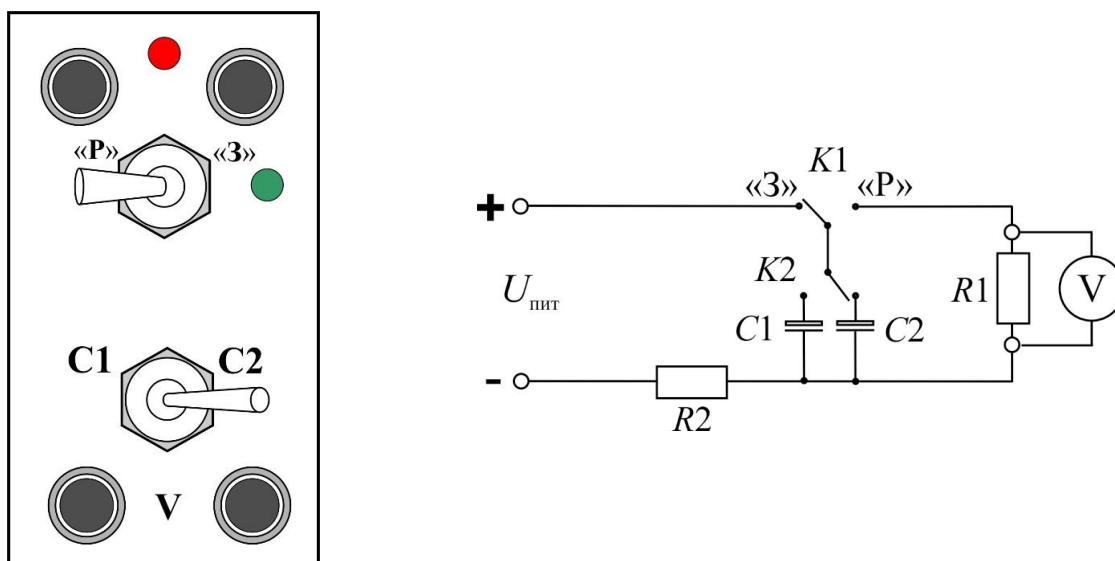


Рис. 5. Внешний вид и схема установки для измерения времени релаксации заряда конденсатора

Экспериментальная установка состоит из блока питания и измерительной схемы (рис. 5). $U_{\text{пит}}$ – клеммы для подключения источника питания, K1 – переключатель режимов «Заряд-Разряд», R1, R2 – сопротивления, V – вольтметр (цифровой мультиметр в режиме вольтметра), C1 и C2 – конденсаторы, K2 – переключатель выбора конденсатора.

На клеммы $U_{\text{пит}}$ подается напряжение около 12 В от источника питания. Красный светодиод между клеммами показывает наличие напряжения питания. Переключатель K1 имеет два положения. В положении «З - «заряд» - конденсатор C1 или C2 заряжается от источника питания через сопротивление $R2 = 0,33 \text{ кОм}$. При заряженном конденсаторе горит зеленый светодиод справа от переключателя. В положении «Р - «разряд» источник питания отключается, и конденсатор разряжается через сопротивление $R1 = 10 \text{ кОм}$.

Сила тока при заряде конденсатора может измеряться по падению напряжения на резисторе R1 с использованием закона Ома для участка цепи: $I = U_R / R1$. Из этого выражения видно, что отношение силы тока в цепи к первоначальному значению I/I_0 равно отношению падений напряжений на сопротивлении U/U_0 , то есть для определения времени релаксации непосредственного измерения силы тока в цепи не требуется.

Порядок проведения измерений.

1. Подключите источник питания постоянного тока к клеммам $U_{\text{пит}}$ соблюдая полярность (клемма красного цвета «+», черного – «-»). Установите на источнике питания напряжение около 12 В. При подаче питания на измерительном блоке загорится красный светодиод.
2. Подключите к клеммам V мультиметр, установленный на измерение постоянного напряжения на пределе 20 В. Установите переключатель $K2$ в положение $C1$, а переключатель $K1$ в положение «Р». Убедитесь, что конденсатор разряжен: в этом случае вольтметр покажет напряжение 0 В, т.е. разрядный ток не течет.
3. Переведите переключатель $K1$ в положение «З». Конденсатор будет заряжаться. По окончании заряда конденсатора до напряжения около 9 В загорится зеленый светодиод.
4. Расположите электронный секундомер так, чтобы его экран находился рядом с экраном мультиметра. Для одновременной фиксации напряжения и времени используйте видеокамеру (можно пользоваться камерой мобильного телефона).
5. Переведите переключатель $K1$ в положение «Р» и одновременно включите режим записи или быстрых последовательных фотографий на камере. Запустите секундомер, когда вольтметр покажет напряжение в диапазоне 7,5-8 В. Продолжайте съемку в течение примерно 20-40 секунд, пока напряжение не станет равным нулю.
6. Просматривая полученную видеозапись, отметьте напряжение U_0 , которое показывал вольтметр в момент включения секундомера ($t=0$ с). Затем отметьте промежутки времени, через которые напряжения снижалось с шагом 0,5 В от первоначального.
7. Внесите полученные результаты в таблицу 1.
8. Установите переключатель $K2$ в положение $C2$ и повторите эксперимент по пп. 3-7 для другого конденсатора. Результаты внесите в таблицу 2.
9. Постройте графики зависимостей разряда конденсатора в обычном и полулогарифмическом масштабах. Определите времена релаксации $\tau_1 = R_1 C_1$ и $\tau_2 = R_1 C_2$ по методам 1 и 2. Используя значение сопротивления $R_1=10$ кОм, рассчитайте емкость конденсатора C_1 и C_2 .

Таблица 1. Конденсатор C_1

U , В	t , с	U/U_0	$\ln(U/U_0)$	$\tau_1 = R_1 C_1$, с (метод 1)	C_1 , мкФ (метод 1)	$\tau_1 = R_1 C_1$, с (метод 2)	C_1 , мкФ (метод 2)
$U_0=$	0						
7,5							
7							
6,5							
...							
0,5							

0							
---	--	--	--	--	--	--	--

Графики зависимости $U(t)/U_0$ и $\ln(U/U_0)(t)$

Таблица 2. Конденсатор C_2

U, В	t, с	U/U_0	$\ln(U/U_0)$	$\tau_2 = R_1 C_2$, с (метод 1)	C_2, мкФ (метод 1)	$\tau_2 = R_1 C_2$, с (метод 2)	C_2, мкФ (метод 2)
$U_0 =$	0						
7,5							
7							
6,5							
...							
0,5							
0							

Графики зависимости $U(t)/U_0$ и $\ln(U/U_0)(t)$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие токи называются квазистационарными?
2. Что такое конденсатор и для чего он используется?
3. В каких единицах измеряется емкость конденсатора?
4. Получите зависимость заряда конденсатора от времени при его разряде, заряде.
5. Что такое время релаксации заряда конденсатора τ и от каких параметров схемы оно зависит?
6. Опишите схему установки и порядок выполнения работы.
7. Какова зависимость напряжения на конденсаторе $U(t)$ и тока в цепи $I(t)$ от времени в процессе заряда и разряда конденсатора?
8. Опишите методы определения времени релаксации заряда конденсатора.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРАКТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Методические указания для обучающихся по организации и проведению
самостоятельной работы**

Направление подготовки 03.03.02 Физика
Направленность (профиль)
«Фундаментальная и прикладная физика»

**Ставрополь
2026**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Практическая физика» являются:

- подготовка к лабораторной работе
- самостоятельное изучение литературы

Лабораторная работа – подразумевает изучение определенного физического процесса на практике, используя при этом методы, предварительно изученные на лекциях, выбор наиболее оптимального приема выполнения замеров и исследования, которые обеспечивает наиболее точный результат, определение фактического результата и его сравнение с теоретическими данными, описанными в учебнике согласно выбранной тематике, обнаружение причин полученного несоответствия и грамотное изложение их в отчете лабораторной работы, грамотное оформление выводов согласно требованиям методички.

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

ИД-1_{ПК-2}

владеет навыками работы с современным приборным оборудованием для проведения научных исследований в своей профессиональной деятельности;

ИД-2_{ПК-2}

владеет навыками применения современных информационных технологий для проведения, анализа и обработки результатов научных экспериментов (в том числе в автоматизированном режиме).

ИД-3_{ПК-2}

анализирует результаты научно-

исследовательской деятельности, сопоставляет их с известными аналогами, и представляет в виде отчетных материалов;

ИД-4_{ПК-2}

готовность грамотно представлять результаты исследований в том числе в виде докладов и публикаций на научных конференциях различного уровня.

ИД-2_{ПК-5}

умеет обрабатывать и анализировать полученные данные с помощью современных информационных технологий.

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки
Подготовка к лабораторной работе «Измерение линейных размеров тел при помощи штангенциркуля, микрометра и сферометра»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Методы работы с оптическим микроскопом»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Определение размеров малых тел с помощью оптического микроскопа»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Оценка погрешностей физических измерений»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Погрешности в косвенных измерениях»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Методы измерения температуры»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Точное взвешивание и измерение плотности»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Статистический анализ случайных погрешностей. Систематические погрешности»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Электроизмерительные приборы»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Функции распределения. Анализ результатов эксперимента»	Отчет	Собеседование
Подготовка к лабораторной работе «Определение емкости конденсатора по кривой разряда»	Отчет	Собеседование
Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо:

- повторить материал соответствующих лекций;
- внимательно изучить описание лабораторного занятия, изложенное в практикуме;
- ответить на вопросы по содержанию лабораторного занятия, задаваемые преподавателем на предварительном опросе перед выполнением заданий.

Все лабораторные занятия предполагают выполнение заданий, решение задач.

В результате выполнения заданий достигаются следующие результаты обучения:

- развитие мышления и творческих способностей студента,
- приобретение и закрепление навыков самостоятельной работы,
- приобретение и закрепление навыков оформления и составления письменных заданий.

Письменный отчет должен содержать следующие примерные компоненты.

Отчет по лабораторной работе №

«Название работы»

выполненной студентом _____ ФИО _____ курса, института _____

группа _____ «__» _____ 202 г.

Цель работы:

Задание 1. Формулировка задания

Таблицы

Графики

Вычисления

Расчет погрешностей

Задание 2. Формулировка задания

Таблицы

Графики

Вычисления

Расчет погрешностей

.....

Вывод:

Примерные вопросы по содержанию лабораторных занятий.

Лабораторная работа №7 «Измерение линейных размеров тел при помощи штангенциркуля, микрометра и сферометра»

1. Опишите устройство и принцип измерения штангенциркулем.
2. Опишите устройство и принцип работы микрометра.
3. Опишите устройство и принцип работы сферометра.
4. Как производится учет приборной погрешности при измерениях штангенциркулем и микрометром?

Лабораторная работа №8 «Методы работы с оптическим микроскопом»

1. Опишите принцип работы оптического микроскопа.

2. Назовите основные узлы оптического микроскопа.
3. Как определить увеличение микроскопа?
4. Что такое разрешающая способность и предел разрешения? Чем они определяются?
5. Почему не производятся оптические микроскопы с увеличением более 2000 $\times$?
6. Для каких целей применяется метод наблюдения в отраженном свете?
7. Как измерить при помощи микроскопа размеры малых тел?

Лабораторная работа №9 «Методы измерения температуры»

1. Что характеризует температура? Каковы основные принципы термометрии?
2. Опишите принцип построения известных вам температурных шкал?
3. Опишите устройство газового термометра?
4. Опишите устройство жидкостных термометров? Каковы их достоинства и недостатки?
5. Каков принцип действия твердотельных термометров?
6. Как использовать термопары и терморезисторы для измерения температуры?
7. Как производится градуировка термопар?

Лабораторная работа №10 «Точное взвешивание и измерение плотности»

1. Опишите устройство технических весов.
2. Назовите основные параметры весов и возможные источники погрешностей механических и электронных весов.
3. Какие методы точного взвешивания существуют, в чем их достоинства и недостатки?
4. Опишите методы измерения плотностей жидкостей и твердых тел. Как определить плотность жидкости методом гидростатического взвешивания.

Лабораторная работа №11 «Электроизмерительные приборы»

1. Опишите принцип действия различных электроизмерительных механизмов.
2. Что такое класс точности и чувствительность прибора?
3. Как производится расширение пределов измерений амперметра и вольтметра? Произведите расчет добавочного сопротивления для любого из использованных вами в работе вольтметров, чтобы этот вольтметр позволял измерять напряжения до 750 В. Произведите расчет шунта для амперметра для расширения его предела измерения до 5 А. Результаты представьте в отчете.
4. Как влияет внутреннее сопротивление вольтметра на результаты измерений?
5. Как производится измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра?

Лабораторная работа №12 «Определение емкости конденсатора по кривой разряда»

1. Какие токи называются квазистационарными?
2. Что такое конденсатор и для чего он используется?
3. В каких единицах измеряется емкость конденсатора?
4. Получите зависимость заряда конденсатора от времени при его разряде, заряде.
5. Что такое время релаксации заряда конденсатора τ и от каких параметров схемы оно зависит?
6. Опишите схему установки и порядок выполнения работы.
7. Какова зависимость напряжения на конденсаторе $U(t)$ и тока в цепи $I(t)$ от времени в процессе заряда и разряда конденсатора?
8. Опишите методы определения времени релаксации заряда конденсатора.

Примерная тематика заданий для самостоятельного конспектирования

1. Блок-схема измерительного устройства. Передаточные характеристики.
2. Чувствительность измерительных приборов.
3. Принцип обратной связи. Системы автоматического регулирования.
4. Влияние электрических линий на результаты измерений.
5. Измерения электрических и неэлектрических величин. Измерительные преобразователи.

6. Аналоговые и цифровые приборы. Принципы работы АЦП и ЦАП.
7. Определение частоты методом биений. Доплеровский радиолокатор.
8. Измерение меняющихся во времени электрических сигналов: самописцы, аналоговые и цифровые осциллографы.
9. Естественные пределы точности измерений: возможности органов чувств человека, принцип неопределенности Гейзенберга.
10. Шумы в измерительных приборах. Броуновское движение, тепловой шум, дробовой эффект, квантовый шум. Измерение слабых сигналов в присутствии шумов.

Вопросы для собеседования:

1. Понятие физической величины. Измерение физических величин.
2. Системы единиц измерения.
3. Эталоны единиц физических величин в системе СИ.
4. Метод анализа размерностей.
5. Правила записи результатов физических измерений. Нормальное представление числа. Значащие и незначащие цифры.
6. Погрешности измерений, их классификация и методы их уменьшения.
7. Сравнение измеренных значений.
8. Анализ погрешностей для косвенных измерений.
9. Статистические характеристики погрешностей измерений: среднее значение, стандартное отклонение, стандартное отклонение среднего.
10. Построение и анализ гистограмм. Предельные распределения.
11. Основы теории вероятностей. Математическое ожидание, дисперсия, их свойства. Теоремы теории вероятностей.
12. Понятие функции распределения. Плотность вероятности. Нахождение математического ожидания и дисперсии. Нормировка.
13. Распределения в физике. Распределение Бернулли, Пуассона, Бозе-Эйнштейна, Ферми-Дирака.
14. Нормальное (гауссовское) распределение. Интеграл ошибок. Доверительный интервал. Распределение Стьюдента. Надежность.
15. Отбрасывание данных. Критерий Шовене.
16. Взвешенные средние.
17. Метод наименьших квадратов.
18. Корреляция.
19. Проверка статистических гипотез. Критерий Пирсона (χ^2) для распределений.
20. Методы измерения линейных размеров тел. Штангенциркуль, линейка, микрометр, сферометр. Их пределы измерения и погрешности.
21. Методы измерения температуры. Болометр, термометр, терморезистор, термопара, оптический и радиационный пирометры.
22. Классификация и принципы действия электроизмерительных приборов. Определение систематической погрешности прибора по классу точности.
23. Устройство и методы работы с оптическим микроскопом.
24. Методы точного взвешивания на технических весах и определение плотности жидких и твердых тел.